

**Universidad Nacional de Tucumán  
Facultad de Ciencias Naturales e Instituto  
Miguel Lillo**



**“Detección por satélite de parámetros limnológicos para evaluar la dinámica espacio-temporal de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía Central Brasileña”**

**Tesista: Lic. María del Carmen Mendoza España**

Tesis presentada para optar al Grado  
Académico Superior de Doctora en  
Ciencias Biológicas

**Director: Jean Michel Martinez (Ph.D)**  
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse - Francia

**Directora Asociada: Dra. Alcira Villagra de Gamundi**  
Departamento de Ecología – Universidad Nacional de Tucumán e Instituto  
Miguel Lillo

San Miguel de Tucumán- Argentina  
2014

*Dedicatoria*

*A la memoria del  
Dr. Marc Roulet  
Nov-2006*

## **Agradecimientos**

Al Dr. Jacques Gardon (actual Director del IRD en Bolivia) por su apoyo y colaboración para la presentación de este trabajo.

A los Doctores Bernard Francou y Jean Loup Guyot por toda su colaboración en Bolivia y Brasil para la conclusión de este trabajo.

Al Dr. Jean Michel Martinez, Tutor de esta tesis por su toda su orientación en la transmisión de conocimientos y su experiencia científica.

A la Dra. Alcira Villagra de Gamundi, Co-Tutora de esta tesis por brindarme todo su apoyo, amistad, consejos, sugerencias y haberme hecho sentir parte de su familia.

A los Miembros que conforman la Comisión de Evaluación y Supervisión de la Tesis, Dra. Beatriz Tracanna y Dra. Mirian Collantes por sus sugerencias y aportes al trabajo.

A los Miembros del Jurado (Dr. Xavier Lazzaro, Dra. Claudia Seeligmann y Dr. Carlos Molineri) por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Al IRD (Institut de Recherche pour le Développement) y la DSF (Département Soutien et Formation) por proporcionarme una Beca Doctoral.

A los investigadores: Dra. Patricia Turq, Dr. Patrick Seyler, Dr. Stephane Calmant, Alain Plenacassagne y al Dr. Jean Vacher por su apoyo, sugerencias y amistad.

A los Profesores: Dra. Claudia Padovesi, Dr. Dermeval do Carmo, Dr. Juan José Neiff, Dra. María do Socorro Ibañez, Dr. Paulo Meneses por todos los conocimientos impartidos en los cursos de Pos-Graduación y su amistad.

A Natalia Hauser, Máximo Mateinni, Ana Camila García, Tristan Rousseau, Simone Messias, Fabio Comes, Cristina Arantes, Cassia Coutinho, Alison Akerman, Carlos Pacheco, Christopher Braga y Valentina Nicosia los mejores amigos con los que compartí mi estadía en Brasilia y que fueron siempre un gran apoyo incondicional.

A Jorgelina Juarez, Martín Sirombra, Cecilia Locassio, Gabriela Vernieri, Flavia Armella y Gabriela Costilla mis mejores amigos en Tucumán. A toda la familia Gamundi Villagra por su hospitalidad y cariño.

A Edson Ramirez, Jean Emmanuel Sicart, Fernando Balderrama, Elmer Cuba, Norma Sarabia por su apoyo y gran amistad. Un especial agradecimiento al Dr. Fernando Palacios por su ayuda, amistad y sabios consejos.

A la Universidad Nacional de Tucumán e Instituto Miguel Lillo por permitirme realizar el Doctorado en Ciencias Biológicas (personalizado).

A los Proyectos compartidos entre el CNPQ de Brasil y el IRD de Francia desarrollados en la Amazonía. También a SAMSAT (CNES - Agencia Espacial Francesa) y CARBAMA (ANR) por el financiamiento para desarrollar este trabajo.

## INDICE

INDICE DE FIGURAS .....	I
INDICE DE TABLAS .....	IV
INDICE DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 Objetivo General .....	4
1.2.2 Objetivo Específicos .....	4
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 LA CUENCA AMAZÓNICA .....	6
2.1.1 Localización geográfica y climatología .....	6
2.1.2 Características hidrológicas .....	8
2.1.3 Geoquímica de la Cuenca Amazónica .....	11
2.2 LAS PLANICIES DE INUNDACIÓN DE LA AMAZONÍA .....	12
2.2.1 Características Generales .....	12
2.2.2 Posición y dinámica de un lago de várzea en la planicie .....	13
2.2.3 Vegetación y biodiversidad .....	14
2.2.4 Distribución espacial de las planicies de inundación.....	16
2.2.5 Conceptos de Pulso de inundación y Pulso hidrológico .....	18
2.3 EL FITOPLANCTON .....	19
2.3.1 Aspectos Generales .....	19
2.3.2 El proceso de eutrofización en aguas continentales.....	20
2.3.3 Factores que controlan la eutrofización en lagos tropicales .....	21
2.3.4 Índice de Estado Trófico (IET) para lagos tropicales .....	23
2.3.4 Síntesis de trabajos sobre fitoplancton en la Amazonía.....	24
2.4 RADIOMETRÍA .....	25
2.4.1 Respuesta espectral de las aguas .....	25
2.4.2 Propiedades ópticas del fitoplancton .....	27
2.4.2.1 Absorción de la luz.....	27
2.4.2.2 Dispersión de la luz .....	29
2.4.3 Clasificación óptica de las aguas .....	30
2.5 TELEDETECCIÓN EN AGUAS CONTINENTALES .....	31
2.5.1 Generalidades.....	31
2.5.2 Tipos de sensores .....	31

2.5.3 Tipos de resolución de las imágenes.....	32
2.5.4 Uso de las imágenes de satélite en las planicies de inundación.....	34

## CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
3.1 ÁREA DE ESTUDIO .....	36
3.1.1 Cuenca central del río Amazonas.....	36
3.1.1.2 Características geológicas y geomorfológicas .....	36
3.1.1.3 Dinámica hidrológica y zonas de inundación .....	39
3.1.2 Planicies de inundación estudiadas .....	41
3.1.3 Várzea de Curuaí .....	42
3.1.3.1 Características climáticas .....	42
3.1.3.2 Caracterización de los lagos y principales conexiones .....	43
3.1.3.3 Vegetación.....	45
3.1.3.4 Dinámica hidrológica .....	47
3.1.3.5 Estaciones de muestreo .....	48
3.1.4 Lago Paru .....	49
3.1.4.1 Dinámica hidrológica .....	49
3.1.4.2 Estaciones de muestreo .....	49
3.1.5 Lagos Camaçari y Mirituba.....	51
3.1.5.1 Dinámica hidrológica .....	53
3.1.5.2 Estaciones de muestreo .....	54
3.1.6 Várzea de Janauacá .....	55
3.1.6.1 Dinámica hidrológica .....	55
3.1.6.2 Estaciones de muestreo .....	56
3.1.7 Lago Grande de Manacapuru.....	56
3.1.7.1 Dinámica hidrológica .....	57
3.1.7.2 Estaciones de muestreo .....	57
3.2 PARÁMETROS LIMNOLÓGICOS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO .....	59
3.2.1 Datos Disponibles de Campañas Anteriores (2000-2005).....	59
3.2.1.1 Clorofila-a y Materia en suspensión.....	59
3.2.1.2 Fitoplancton.....	60
3.2.1.3 Otros datos.....	62
3.2.2 Campañas nuevas (2008-2010).....	62
3.2.2.1 Clorofila-a y Materia en suspensión.....	63
3.2.2.2 Fitoplancton.....	63
3.3 RADIOMETRÍA .....	64
3.3.1 Espectrorradiómetro de campo .....	64
3.3.2 Mediciones radiométricas .....	64
3.3.2.1 Mediciones de reflectancia en superficie .....	65
3.3.2.2 Mediciones de reflectancia en profundidad .....	67
3.3.3 Calibración y simulación de datos satelitales .....	68
3.4 DATOS DE SATÉLITE .....	69
3.4.1 Sensor MODIS .....	69
3.4.2 Especificaciones generales.....	70
3.4.3 Productos.....	70
3.4.4 Otras imágenes (MERIS).....	72

3.5 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE .....	73
3.5.1 Adquisición de las imágenes de satélite.....	73
3.5.2 Pos-tratamiento de las imágenes .....	75

## CAPITULO 4

4 ANÁLISIS DE DATOS .....	76
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL FITOPLANCTON.....	76
4.1.2 Composición y frecuencia relativa del fitoplancton .....	77
4.1.3 Biomasa fitoplanctónica .....	82
4.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DEL FITOPLANCTON.....	83
4.2.1 Comportamiento general de la reflectancia .....	83
4.2.2 Variación estacional de la reflectancia .....	85
4.2.3 Coeficiente de atenuación.....	91
4.2.3.1 Atenuación de la luz en la columna de agua .....	91
4.2.3.2 Variación vertical del coeficiente de atenuación en la zona eufótica .....	92
4.2.3.3 Comparación del coeficiente de atenuación en várzeas y otros lagos .....	94
4.3 SIMULACIÓN DE LOS DATOS SATELITALES .....	95
4.3.1 Clorofila-a.....	95
4.3.2 Materia en suspensión (MES).....	99
4.3.3 Estado trófico .....	100
4.3.3.1 Cálculo del Índice de Estado Trófico.....	100
4.3.4 Determinación del estado trófico mediante la técnica de simulación de bandas.....	101
4.3.5 Técnica Match-up entre las imágenes satelitales y datos de campo (2000-2010).....	103
4.3.6 Determinación del estado trófico mediante la técnica Match-up .....	104
4.3.7 Comparación de las técnicas simulación de bandas y Match-up.....	105
4.4 IMÀGENES DE SATÈLITE.....	106
4.4.1 Fusión de imágenes de los satélites TERRA y AQUA.....	107
4.4.2 Modelos para detección de estado trófico, floraciones y materia en suspensión .....	108
4.4.3 Variación espacial y temporal de la reflectancia en las imágenes MODIS .....	110
4.4.3.1 Variación espacial y temporal de la reflectancia en la Varzeas de Curuai .....	111
4.4.3.2 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Paru.....	113
4.4.3.3 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Camaçari.....	115
4.4.3.4 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Mirituba .....	117
4.4.3.5 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Manacapuru.....	119

## CAPITULO 5

5 RESULTADOS .....	122
5.1 Dinámica espacial y temporal del estado trófico en várzeas y otros lagos .....	122
5.2 Dinámica espacial del estado trófico en la várzea de Curuai y en el lago Paru .....	122
5.2.1 Dinámica espacial de estado trófico en un ciclo anual .....	123
5.2.1.1 Dinámica espacial de la materia en suspensión en un ciclo anual.....	125
5.2.2 Dinámica espacial del estado trófico en el periodo de aguas altas .....	127
5.2.2.1 Dinámica espacial de la materia en suspensión en aguas altas .....	130
5.2.3 Dinámica espacial del estado trófico en un ciclo anual en un evento de inundación extrema (Febrero-Agosto 2009).....	132

5.2.3.1 Dinámica espacial de la materia en suspensión en un evento de inundación extrema (Febrero-Agosto 2009) .....	133
5.2.4 Dinámica espacial del estado trófico en el nivel máximo de inundación (Junio de 2003 a 2010) .....	135
5.2.4.1 Dinámica espacial de la materia en suspensión en el nivel máximo de inundación (Junio de 2003 a 2010) .....	137
5.3 Dinámica temporal del estado trófico de várzeas y lagos en relación con el río Amazonas en una década (2000-2010) .....	139
5.3.1 Várzea de Curuai .....	140
5.3.2 Lago Paru .....	146
5.3.3 Lagos Camaçari y Mirituba .....	147
5.3.3.1 Lagos Camaçari .....	148
5.3.3.2 Lagos Mirituba .....	149
5.3.4 Várzea de Janauacá y lago Manacapuru .....	151

## CAPITULO 6

6 DISCUSIONES .....	152
6.1 Estudio del estado trófico en lagos tropicales y planicies de inundación .....	152
6.2 Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica .....	154
6.3 Relación de la eutrofización con la climatología .....	171
6.4 Relación de la eutrofización con la geoquímica .....	176
6.5 Relación con los conceptos de pulso de inundación y pulso hidrológico .....	180

## CAPITULO 7

7 CONCLUSIONES .....	188
----------------------	-----

## CAPITULO 8

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	192
------------------------------------	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Relación y detalle de los objetivos específicos .....	5
Fig. 2: Localización geográfica y delimitación de la Cuenca Amazónica .....	7
Fig. 3: El río Amazonas y sus principales tributarios .....	9
Fig. 4: Posición de un lago de Várzea en la planicie de inundación .....	13
Fig. 5: Principales ríos y planicies de inundación en la región amazónica .....	17
Fig. 6: Respuesta espectral del agua y sus componentes activos .....	25
Fig. 7: Absorción de los pigmentos fotosintéticos.....	28
Fig. 8: Representación de la Resolución Espacial.....	33
Fig. 9: Representación de la Resolución Espectral.....	33
Fig. 10: Representación de la cuantificación de las imágenes como medida de la resolución radiométrica .....	34
Fig. 11: Mapa de los sectores medio y bajo del río Amazonas que conforman la cuenca Central.....	36
Fig. 12: Mapa de las zonas litológicas en la cuenca Amazónica y localización de tributarios del río Amazonas.....	37
Fig. 13: Sección transversal tipo "graben" de la cuenca media del Amazonas .....	38
Fig. 14: Distribución de las planicies de inundación y áreas de vegetación.....	40
Fig. 15: Localización de las várzeas de Curuaí, Janauacá y de los lagos próximos en la Amazonía Central Brasileira .....	41
Fig. 16: Foto de la várzea de Curuaí, lago Grande con predominio de aguas blancas .....	42
Fig. 17: Caracterización de los lagos de la várzea de Curuaí y principales igarapés o canales de conexión .....	43
Fig. 18: Vegetación característica de la várzea de Curuaí.....	46
Fig. 19: Variaciones del nivel de agua del río Amazonas en la estación de Óbidos comparada con las variaciones en la várzea de Curuaí (2000-2009).....	47
Fig. 20: Dinámica hidrológica de la várzea de Curuai. Imágenes de satélite MODIS, periodos de aguas altas y de descenso de las agua .....	48
Fig. 21: Localización de la Várzea de Curuai y del lago Paru. Estaciones de muestreo .....	50
Fig. 22: Localización de los lagos Camaçari y Mirituba. Ubicación de las estaciones de muestreo .....	52
Fig. 23: Imágenes de satélite MODIS de los lagos Camaçari y Mirituba, periodos de aguas altas y bajas .....	54
Fig. 24: Foto de la Várzea de Janauacá. Canal de ingreso a la várzea .....	55
Fig. 25: Localización de la várzea de Janauacá y del lago Manacapuru. Ubicación de las estaciones de muestreo .....	58
Fig. 26: Ocurrencias relativas de las clases taxonômicas del fitoplancton de superficie en el lago Grande de Curuaí .....	61
Fig. 27: Riqueza específica de las clases registradas en el lago Grande de Curuaí.....	61
Fig. 28: Equipo de muestreo para colecta de aguas y análisis <i>in situ</i> .....	63
Fig. 29: Mediciones de reflectancia en superficie. Espectrorradiómetro y detalle de las mediciones de irradiancia y radiancia .....	66
Fig. 30: Gráficos de las mediciones de radiancia, irradiancia y reflectancia .....	67
Fig. 31: Mediciones radiométricas en profundidad .....	68
Fig. 32: Imágenes MODIS. Satélite TERRA y AQUA .....	74
Fig. 33: Planilla de información para descargar imágenes MODIS .....	74

Fig. 34:Frecuencia relativa de las divisiones algales presentes en los lagos de las várzeas de Curuaí, Janauacá y en los lagos Parú, Mirituba y Manacapuru (Mayo-2008).....	78
Fig. 35:Frecuencia relativa de las divisiones algales presentes en los lagos de las várzeas de Curuaí y Janauacá. Campaña Octubre-2008 .....	79
Fig. 36:Prncipales Géneros y especies de algas presentes en las várzeas y lagos de la Amazonía Central .....	80
Fig. 37:Espectros de reflectancia radiométrica con valores máximos y mínimos de absorción de los pigmentos en la várzea de Curuaí y en el río Amazonas .....	85
Fig. 38: Espectros de reflectancia radiométrica. Várzea de Janauacá (Mayo-2008).....	86
Fig. 39: Espectros de reflectancia radiométrica. Várzea de Janauacá (Octubre-2008) .....	87
Fig. 40: Espectros de reflectancia radiométrica. Várzea de Curuaí (Mayo-2008) .....	88
Fig. 41: Espectros de reflectancia radiométrica. Várzea de Curuaí (Octubre-2008).....	89
Fig. 42: Espectros de reflectancia radiométrica. Várzea de Curuaí (Julio-2010).....	90
Fig. 43:Valores promedio del coeficiente de atenuación (Kd) en lagos de diferentes regiones de la várzea de Curuaí.....	92
Fig. 44:Valores del coeficiente de atenuación (Kd) en diferentes profundidades y valor promedio en el lago Salé (A20) de la várzea de Curuaí .....	93
Fig. 45:Valores promedio del coeficiente de atenuación (Kd) en lagos de la várzea de Curuaí.....	94
Fig. 46:Valores promedio del coeficiente de atenuación (Kd) en lagos de la várzea de Janauacá y otros lagos (Manacapuru y Cabaliana) .....	95
Fig. 47:Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de clorofila-a en la várzea de Curuaí y en los lagos Mirituba y Camaçari .....	96
Fig. 48:Simulación de bandas MERIS vs. Concentración de clorofila-a en la várzea de Curuaí y en los lagos Mirituba y Camaçari .....	97
Fig. 49:Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de clorofila-a en la várzea de Janauacá y en el lago Manacapuru.....	98
Fig. 50:Simulación de bandas MERIS vs. Concentración de clorofila-a en la várzea de Janauacá y en el lago Manacapuru.....	98
Fig. 51:Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de materia en suspensión en las várzeas de Curuaí y Janauacá .....	99
Fig. 52:Simulación de bandas MERIS vs. Concentración de materia en suspensión en las várzeas de Curuaí y Janauacá .....	100
Fig. 53:Determinación del estado trófico de los lagos de la várzea de Curuaí, Mirituba y Camaçari, mediante la técnica de Simulación de bandas MODIS .....	102
Fig. 54:Técnica de Match-up entre los datos de reflectancia (Terra y Aqua) de MODIS vs. Concentración de clorofila-a .....	103
Fig. 55: Determinación del estado trófico de los lagos de la várzea de Curuaí mediante la técnica de Match-up .....	105
Fig. 56:Comparación de las técnicas de Simulación de Bandas y Match-up para determinar el índice de estado trófico de los lagos de la várzea de Curuaí.....	106
Fig. 57: Procesamiento de imágenes MODIS en ERDAS 9.1 .....	107
Fig. 58:Modelo de fusión de imágenes MODIS, satélites Terra y Aqua.....	108
Fig. 59: Modelo de clasificación del estado trófico y detección de floraciones de algas .....	109
Fig. 60:Modelo de detección de la concentración de materia en suspensión .....	110
Fig. 61: Variación espacial y temporal de la reflectancia en las diferentes regiones de la várzea de Curuaí .....	113
Fig. 62:Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Parú.....	114

Fig. 63: Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Camaçari.....	116
Fig. 64: Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Mirituba .....	118
Fig. 65: Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Manacapuru .....	120
Fig. 66: Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (ciclo anual 2003) .....	124
Fig. 67: Dinámica Espacial de la materia en suspensión en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (ciclo anual 2003) .....	126
Fig. 68: Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (periodos aguas altas y descenso de las aguas 2005).....	129
Fig. 69: Dinámica Espacial de la materia en suspensión en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (periodos aguas altas y descenso de las aguas 2005).....	131
Fig. 70: Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (evento de inundación extrema 2009).....	133
Fig. 71: Dinámica Espacial de la materia en suspensión en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (evento de inundación extrema 2009).....	134
Fig. 72: Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (nivel máximo de inundación mes de Junio 2003 a 2010) .....	136
Fig. 73: Dinámica Espacial de la materia en suspensión en la várzea de Curuaí y en el lago Parú (nivel máximo de inundación mes de Junio 2003 a 2010) .....	138
Fig. 74: Principales regiones de la várzea de Curuaí y del lago Parú con sus respectivas estaciones de muestreo que representan la variación del estado trófico.....	139
Fig. 75: Estado trófico de los lagos de la región conectada permanentemente con el río Amazonas, por canales o igarapés en la várzea de Curuaí .....	141
Fig. 76: Estado trófico de la región centro-oeste de la várzea de Curuaí .....	142
Fig. 77: Estado trófico del lago Grande do Poçãõ (región central) de la várzea de Curuaí ...	143
Fig. 78: Estado trófico del lago Grande de Curuaí en la región este de la várzea .....	145
Fig. 79: Estado trófico del lago Parú .....	146
Fig. 80: Principales regiones y estaciones de muestreo de los lagos Camaçari y Mirituba que representan la variación del estado trófico.....	147
Fig. 81: Estado trófico del lago Camaçari .....	149
Fig. 82: Estado trófico del lago Mirituba.....	150
Fig. 83: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Grande (región este) de la várzea de Curuaí .....	156
Fig. 84: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Grande do Poçãõ (región central) de la várzea de Curuaí.....	157
Fig. 85: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago do Poçãõ (sector centro-oeste) de la várzea de Curuaí.....	159
Fig. 86: Mapa de la várzea de Curuaí derivado de imágenes 21 J-ERS con condiciones de inundación y tipos de vegetación.....	160
Fig. 87: Presencia de floraciones o <i>blooms</i> de algas puntuales en el periodo de crecida de aguas en la várzea de Curuaí en 2010 .....	163
Fig. 88: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Parú .....	166
Fig. 89: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Camaçari .....	168
Fig. 90: Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Mirituba .....	170
Fig. 91: Series de niveles de caudal del río Amazonas en Óbidos durante (1970-2006) .....	173
Fig. 92: Concentraciones de carbono orgánico en (%) en los lagos de la várzea de Curuaí ...	178
Fig. 93: Posición de las planicies de inundación en relación a otros ecosistemas.....	181
Fig. 94: Representación del pulso hidrológico .....	182
Fig. 95: Representación del pulso de inundación o pulso hidrológico en la várzea Curuaí ...	184

Fig. 96: Representación esquemática de la dinámica a corto plazo de la conectividad hidrológica .....	186
Fig. 97: Desconexión hidroquímica en el lago Camaçari en periodos de aguas altas y aguas bajas .....	187

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características hidrológicas del río Amazonas y sus tributarios .....	10
Tabla 2: Extensión aproximada de las planicies de inundación en Sud América .....	16
Tabla 3: Variación del tamaño de algunas especies de fitoplancton .....	19
Tabla 4: Criterios y valores del estado trófico según la clasificación propuesta por Toledo (1990) .....	24
Tabla 5: Datos generales de clorofila-a( $\mu\text{g/L}$ ) de 11 campañas desarrolladas en la várzea de Curuai (2000-2005) (Proyecto HYBAM).....	60
Tabla 6: Datos generales de materia en suspensión ( $\text{mg/L}$ ) de 11 campañas desarrolladas en la várzea de Curuaí (2000-2005) (Proyecto HYBAM).....	60
Tabla 7: Datos de campañas nuevas realizadas en los años 2008 a 2010.....	62
Tabla 8: Especificaciones técnicas generales del Sensor MODIS .....	70
Tabla 9: Descripción general de los Productos MODIS.....	71
Tabla 10: Características y aplicaciones de las bandas del sensor MERIS .....	73
Tabla 11: Sumario de parámetros considerados en el procesamiento del software MOD3R .....	75
Tabla 12: Datos de campañas y estaciones de muestreo para el análisis de la composición y frecuencia relativa del fitoplancton .....	76
Tabla 13: Datos de campañas y estaciones de muestreo para el análisis de la biomasa fitoplanctónica y valores promedio de materia en suspensión (2008-2010) .....	83
Tabla 14: Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (IETm).....	101
Tabla 15: Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) y nuevos valores estimados mediante la técnica de Simulación de bandas .....	102
Tabla 16: Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) y nuevos valores estimados por satélite mediante la técnica de Match-up.....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>ANA</b>	Agencia Nacional de Aguas
<b>APHA</b>	sigla en inglés American Public Health Association
<b>AQUA</b>	Satélite del sensor MODIS
<b>ATTZ</b>	sigla en inglés: Zona de Transición entre Acuática y Terrestre
<b>C</b>	Carbono
<b>CARBAMA</b>	Proyecto Ciclo del Carbono en el río Amazonas
<b>Chl-a</b>	Clorofila-a (português de Brasil)
<b>CI</b>	Carbono inorgánico
<b>CID</b>	Carbono inorgánico disuelto
<b>CNPQ</b>	Conselho Nacional de Pesquisa
<b>CO</b>	Carbono orgánico
<b>COD</b>	Carbono orgánico disuelto
<b>Cond</b>	Conductividad
<b>COP</b>	Carbono orgánico particulado
<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>CT</b>	Carbono total
<b>CETESB</b>	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (português de Brasil)
<b>EOS</b>	Earth Observation System
<b>ESA</b>	sigla en inglés: Agencia Espacial Europea
<b>GETMODIS</b>	Base de datos específicos
<b>GF/F</b>	en inglés: filtros de fibra de vidrio
<b>HYBAm</b>	sigla en francés: Hidrología y geoquímica de la cuenca Amazónica
<b>IBAMA</b>	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (sigla en português Brasil)
<b>IETm</b>	Índice de Estado Trófico modificado
<b>INPA</b>	Instituto Nacional de Pesquisa na Amazônia
<b>IRD</b>	sigla en francés: Institut de Recherche pour le Développement
<b>JERS-1/SAR</b>	Imágenes radar
<b>LAGEQ</b>	Laboratorio de Geoquímica
<b>LANDSAT</b>	Land Remote Sensing Satellite
<b>MES</b>	Materia en suspensión
<b>MI</b>	Materia inorgánica
<b>MID</b>	Materia inorgánica disuelta
<b>MIR</b>	sigla en inglés: Infrarrojo medio
<b>MO</b>	Materia orgánica
<b>MOD</b>	Materia orgánica disuelta
<b>MOD3R</b>	sigla en inglés: MODIS <i>River Reflectance Retrieval</i>

<b>MODIS</b>	MOderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>MERIS</b>	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
<b>MSDA_XE</b>	Multi Sensor Data Acquisition System_Extended Edition
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>ND</b>	Nivel Digital
<b>NIR</b>	sigla en inglés: Infrarrojo cercano
<b>NT</b>	Nitrógeno Total
<b>OAC</b>	sigla en inglés: Componentes Ópticamente Activos
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
<b>OF</b>	Ortofósforo soluble
<b>P</b>	Fósforo
<b>PAR</b>	sigla en inglés: Radiación Fotosintéticamente Activa
<b>PT</b>	Fósforo Total
<b>PROCARBAMA</b>	Proyecto Ciclo del Carbono en el río Amazonas
<b>pH</b>	Potencial hidrogénico
<b>RGB</b>	en inglés: Rojo, Verde, Azul
<b>SAMSAT</b>	Proyecto de la Agencia Espacial Francesa
<b>SAR</b>	Imágenes radar
<b>SLAR</b>	Imágenes radar
<b>SRTM</b>	Misión Topográfica Radar Shuttle
<b>T</b>	Temperatura
<b>TERRA</b>	Satélite del sensor MODIS
<b>TRA</b>	Transparencia
<b>UFF</b>	Universidad Federal Fluminense
<b>UNB</b>	Universidad de Brasilia
<b>VIS</b>	Región Visible
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergencia del Atlántico Sur
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergencia Intertropical

## RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la dinámica espacial y temporal de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía central brasilera, basada en los parámetros clorofila-a y materia en suspensión usando datos de satélite adquiridos para un periodo de 10 años. La hipótesis planteada es que el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales permite identificar los parámetros limnológicos espacial y temporalmente, los mismos que son controlados por la dinámica hidrológica. Para probar esta hipótesis se integraron y relacionaron tres técnicas: los muestreos *in situ* de los parámetros, las mediciones radiométricas y las imágenes de satélite. La relación entre las dos primeras técnicas permitió entender las propiedades ópticas de los parámetros mediante 6 campañas de muestreo realizadas durante los años 2008 a 2010. En estas campañas fueron colectadas muestras de agua para analizar la clorofila-a y la materia en suspensión y también se realizaron colectas de fitoplancton. Adicionalmente se consideraron datos existentes de ambos parámetros de 11 campañas realizadas en el periodo 2000 a 2005. Todos los muestreos fueron acompañados simultáneamente por mediciones radiométricas en superficie y en profundidad para determinar la variación estacional de la reflectancia y el coeficiente de atenuación. La radiometría de campo (segunda técnica) fue usada para simular las bandas del sensor MODIS (tercera técnica) para entender y cuantificar la sensibilidad de las imágenes a los parámetros. Las mediciones radiométricas y su correspondencia con las bandas espectrales verde y roja de MODIS establecieron una relación para estimar la presencia de floraciones algales y concentración de materia en suspensión. Los datos provenientes de las tres técnicas fueron comparados mediante calibraciones directas (Match-up) e indirectas (Simulación de bandas) con las que se estimó la distribución espacial de la clorofila-a y materia en suspensión. También fueron validados algoritmos para la elaboración de mapas temáticos, encontrándose una buena correlación entre el Match-up y el Índice de Carlson modificado para áreas tropicales, definiendo el estado trófico de los lagos en mapas multitemporales. Los resultados reportan: Una dominancia de la división Cyanophyta en las várzeas en el periodo de descenso de las aguas con presencia de floraciones. La detección de clorofila-a en presencia de bajas y altas concentraciones de materia en suspensión mediante la simulación de bandas. Los lagos de planicies de inundación clasificados como “oligotróficos a mesotróficos” que fueron aquellos lagos que tienen conexión directa con el río principal y como “mesotróficos a eutróficos” los grandes lagos en las várzeas y lagos próximos. Estos resultados fueron interpretados usando datos de hidrología, climatología y geoquímica. Según la dinámica hidrológica las mayores concentraciones de clorofila-a fueron registradas en los periodos de aguas altas y de descenso de las aguas (época seca). La relación de la eutrofización con la climatología dio las variaciones periódicas por eventos climáticos extremos: fuertes sequías (2005 y 2010) que disminuyen la permanencia de las floraciones algales, e inundaciones severas (2006 y 2009) que reducen o anulan la eutrofización. Geoquímicamente, los lagos de aguas blancas (várzeas) ricos en nutrientes tienen alta producción fitoplanctónica. La eutrofización y la presencia de materia en suspensión fueron controladas por las fluctuaciones de los niveles de agua relacionadas directamente con la hidrología y climatología.

## ABSTRACT

The present study aims to assess the spatial and temporal dynamics of floodplain lakes in the Central Brazilian Amazon, based on the parameters of chlorophyll-a and suspended matter, using satellite data acquired during a 10 year-period. The hypothesis is that the multi-temporal analysis using satellite imagery enables to identify variations of limnological parameters in space and time, the same that are controlled by hydrological dynamics. To test this hypothesis, we applied and compared three techniques: in situ measurements of the parameters, radiometric measurements and satellite imagery. The comparison between the first two techniques allowed understanding the optical properties of the parameters during six measurement campaigns made from 2008 to 2010. In these campaigns, water samples were collected to analyze the chlorophyll-a and suspended matter, phytoplankton analyses were also conducted. Additionally, we used previous data of both parameters collected during 11 campaigns from 2000 to 2005. All samples were accompanied simultaneously by radiometric measurements in surface and in depth to determine the seasonal variations of reflectance and attenuation coefficient. The field radiometry (second technique) was used to simulate the MODIS sensor bands (third technique) to understand and quantify the sensitivity of the images to the parameters. Radiometric measurements and its relationship with the green and red spectral bands of MODIS established a relationship to estimate the presence of algal blooms and suspended matter. Data from the three techniques were compared by direct (Match-up) and indirect (Simulation bands) calibrations with which we estimated the spatial distribution of chlorophyll-a and suspended matter. We also validated algorithms to realise thematic maps and found good correlations between the match-up and the modified Carlson index for tropical areas, defining trophic status of lakes in multi-temporal maps. The results report a dominance of the division Cyanophyta in the 'varzeas' during low water periods in the presence of blooms and detection of chlorophyll during of low and high concentrations of suspended matter detected by simulated bands. The floodplain lakes were ranked as "oligotrophic to mesotrophic", those with direct connection to the main river, and as "mesotrophic to eutrophic" the great lakes in the 'varzeas' and nearby lakes. These results were interpreted using data from hydrology, climatology and geochemistry. According to hydrological dynamics, the highest concentrations of chlorophyll-a were recorded during periods of high water (dry season) and water lowering. Linking the eutrophication to the climate, the temporal variations were caused by extreme weather events: severe droughts (2005 and 2010) that decrease algal blooms permanence, and severe flooding (2006 and 2009) that reduce or nullify eutrophication. Geochemically, white-water lakes ('varzeas'), highly concentrated in nutrients, have high phytoplankton productions. Eutrophication and the presence of suspended matter were controlled by fluctuations in water levels directly related to the hydrology and climate.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La teledetección junto con los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen herramientas tecnológicas importantes, utilizadas como parte de las actividades de manejo, evaluación y monitoreo ambiental (Moizo Marrubio 2004). La aplicación de esta herramienta en ambientes marinos (Morel & Priur 1977; Mobley 1999; Marrari et al. 2006) y su posterior incursión en aguas continentales contribuyeron al desarrollo de nuevos campos de investigación. Tal es el caso de la teledetección aplicada al campo de la limnología, en estudios sobre la calidad del agua, el grado de eutrofización y el estado trófico de los lagos (Koponen 2006; Tyler et al. 2006; Peña-Martínez et al. 2004; Gitelson 2000; Schalles et al. 1998; Serrano et al. 1997).

Particularmente los estudios mediante satélite se basan en el análisis de los componentes ópticamente activos (OAC) presentes en el agua, como el fitoplancton, la materia orgánica disuelta y la concentración de sólidos en suspensión. Estos componentes son responsables por el color del agua, determinado principalmente por la interacción de la luz incidente en la columna de agua a través de procesos de absorción o dispersión (Kirk 1994). En lo concerniente al fitoplancton, su interacción con la radiación solar en el agua tiene lugar en los pigmentos fotosintéticos (clorofilas, carotenoides y biliproteínas) que se encuentran en los cloroplastos, absorbiendo la radiación electromagnética entre 400 a 700 nm. El más importante de todos estos pigmentos es la clorofila-a, cuya concentración en el agua es un indicador del grado de eutrofización y por ende, del estado trófico (Carlson 1977; Toledo 1990; Lamparelli 2004) y a su vez, es la principal variable detectada por las bandas de satélite (Kirk 1994). Por lo tanto, la información satelital es considerada como uno de los métodos de estimación de la producción primaria en ambientes acuáticos (Holm-Hansen & Helbling 1995).

Se ha demostrado que la información satelital es más ventajosa y complementaria a los métodos empleados tradicionalmente. En primer lugar, la cobertura geográfica de las

imágenes satelitales proporciona información continua de la calidad de agua en la totalidad del ambiente estudiado. En segundo lugar, los sensores remotos nos permiten obtener información acerca de lugares inaccesibles. Finalmente, la teledetección presenta mayor accesibilidad a los conjuntos de datos espaciales y a la cantidad de productos (Platnick et al. 2003). Ya que las diferentes resoluciones (espaciales, espectrales y temporales) permiten obtener series de datos que proporcionan estimaciones históricas facilitando el proceso de monitoreo.

Las planicies de inundación en la Amazonía constituyen ambientes extensos, complejos y dinámicos que oscilan entre las fases terrestre y acuática (Junk et al. 1989). En particular, las “várzeas” o planicies de inundación de aguas blancas (Sioli 1975, 1984; Junk et al. 2011) son áreas de aguas permanentes o inundadas periódicamente (Junk et al. 2012), altamente productivas por el aporte de aguas ricas en nutrientes y de material en suspensión procedentes del río Amazonas (Mertes et al. 1996). Estos sistemas forman complejos mosaicos que gracias al concepto de conectividad (Ward & Tockner 2001) entre el río principal y la planicie mantienen una gran biodiversidad (Junk & Wantzen 2004). Por ejemplo, representan uno de los macro ambientes más importantes para la actividad pesquera, con más de 100 especies de peces utilizadas comercialmente para la alimentación (ProVárzea 2007). También juegan un papel fundamental en el comportamiento morfo-hidráulico del sistema fluvial principal, el río Amazonas (França 2005). Las fluctuaciones hidrométricas en estos sistemas actúan como elemento regulador de la productividad primaria y la biomasa algal, respondiendo al fenómeno “aguas bajas-aguas altas” (Espíndola et al. 1996) asociado a la influencia y control del pulso de inundación (Putz & Junk 1997) y de las condiciones climáticas (Schöngart & Junk 2007; Marengo et al. 2008 a y b; 2011; Tomasella et al. 2011).

De todas las planicies de inundación, la várzea de Curuaí es la más extensa y representativa, de la región baja del río Amazonas. Con una mayor área superficial de lagos permanentes y menor área de vegetación inundada, formada por más de 20 lagos de aguas blancas y algunos lagos de aguas negras (Sioli 1984) que se conectan entre sí temporalmente y otros de forma permanente al río principal por pequeños canales (Bonnet et al. 2008). Esta planicie alcanza hasta 3600 km<sup>2</sup> en periodos de inundación extrema (Martinez & Le Toan 2007) lo cual corresponde al 13 % del total del área de inundación del río Amazonas entre los sectores de Manacapuru y Óbidos (Maurice-Bourgoin et al. 2007). Los estudios realizados por Moreira-Turcq et al. (2003) y Perez (2008) en esta várzea, caracterizan este sistema como un ambiente de alta producción que tiene un papel significativo en la exportación de materia

orgánica particulada y disuelta hacia el río Amazonas. Además el material orgánico presente en la várzea es consecuencia de procesos de producción *in situ*, por lo que este material es de naturaleza reciente y lábil debido principalmente a la producción fitoplanctónica.

De acuerdo a su gran extensión y complejidad, estos sistemas requieren para su estudio el uso de imágenes de satélite con mayor resolución espacial y temporal, ya que un estudio convencional no proporciona información suficiente sobre la distribución espacial de sus componentes debido a que el número de lagos y la frecuencia de muestreos son bastante limitados.

Varios estudios en la región amazónica, en planicies de inundación usando series temporales de imágenes satelitales como MODIS, MERIS y LANDSAT fueron desarrollados por Martínez et al. (2003); Martínez et al. (2004); Barbosa et al. (2006); Alcântara (2007); Alcântara et al. (2008) en monitoreo de sedimentos y calidad de agua. Por otra parte, también fueron realizados estudios específicos usando imágenes MODIS en planicies de inundación en la misma región, sobre la distribución del fitoplancton (Novo et al. 2005), de la clorofila-a (Novo et al. 2006) y el estudio del estado trófico relacionado a la ocupación de rebaños (Freire 2010).

Este estudio propone evaluar la dinámica espacio-temporal de los lagos de planicies de inundación o várzeas y lagos próximos en la región de la Amazonía Central basada en los parámetros clorofila-a y materia en suspensión mediante series de datos MODIS. A partir de esta información se intentará entender los factores que controlan esta dinámica. La hipótesis planteada es que el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales permite identificar los parámetros limnológicos (concentraciones de clorofila-a y materia en suspensión) espacial y temporalmente en los lagos de planicies de inundación de la Amazonía, que son controlados por la dinámica hidrológica. Para probar esta hipótesis los muestreos *in situ* acompañados de mediciones radiométricas, fueron realizados para la caracterización espacial y temporal en diferentes periodos hidrológicos y las imágenes satelitales adquiridas correspondieron a un periodo de diez años.

Esta tesis fue realizada a través de los proyectos CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) de Brasil – IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de Francia: “Biogeoquímica de los lagos de Várzea en la cuenca Amazónica” y “Estudio y modelaje de las transferencias de agua, de sedimentos y de los elementos químicos entre las zonas inundables (várzeas) y el curso principal de los ríos de la

Amazonía”. También contó con el apoyo de los proyectos: SAMSAT (CNES – Agencia Espacial Francesa) y CARBAMA (ANR)

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

Evaluar mediante la aplicación de imágenes satelitales la dinámica espacial y temporal de los parámetros limnológicos de los lagos de planicies de inundación de la Amazonía, para entender los factores de control.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Integrar tres técnicas (muestreo de campo *in situ*, radiometría de campo y las imágenes de satélite) para detectar y caracterizar la presencia de eutrofización, floraciones algales y materia en suspensión.
- ✓ Relacionar las dos primeras técnicas para:  
Entender las propiedades ópticas del fitoplancton (análisis de la biomasa y grupos dominantes del fitoplancton) y de la materia en suspensión, a través de los muestreos y de los espectros de reflectancia de las mediciones radiométricas *in situ* (Figura 1)
- ✓ Relacionar la segunda y tercera técnica para:  
Entender y cuantificar la sensibilidad de las imágenes de satélite a los parámetros limnológicos (análisis de los espectros de reflectancia de las mediciones radiométricas *in situ* y de las imágenes de satélite en conjunto) (Figura 1)
- ✓ Confrontar los datos provenientes de las tres técnicas para:
  - Obtener la calibración de las imágenes satelitales y validación de algoritmos para la elaboración de mapas multitemporales de los parámetros limnológicos respectivos (Figura 1).
  - Interpretar los resultados usando datos auxiliares (Climatología, Geoquímica e Hidrología) generados en otros proyectos.
  - Determinar los factores que controlan la dinámica limnológica de estos sistemas.

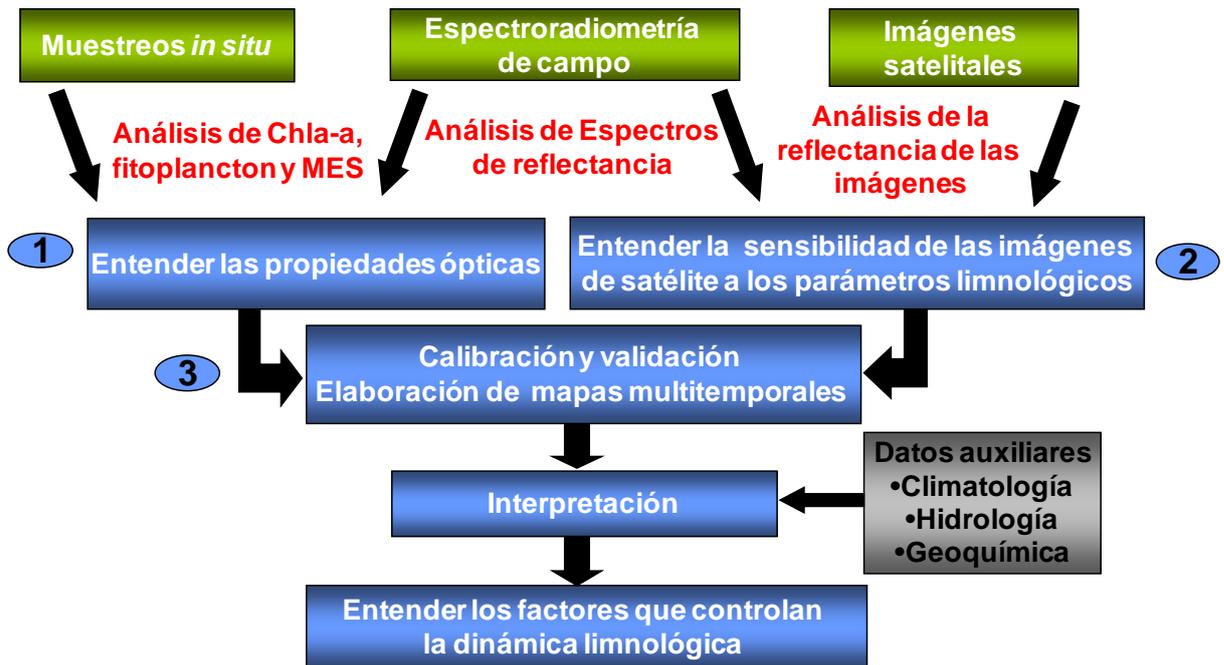


Figura 1. Relación y detalle de los objetivos específicos

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 CUENCA AMAZÓNICA

##### 2.1.1 Localización geográfica y climatología

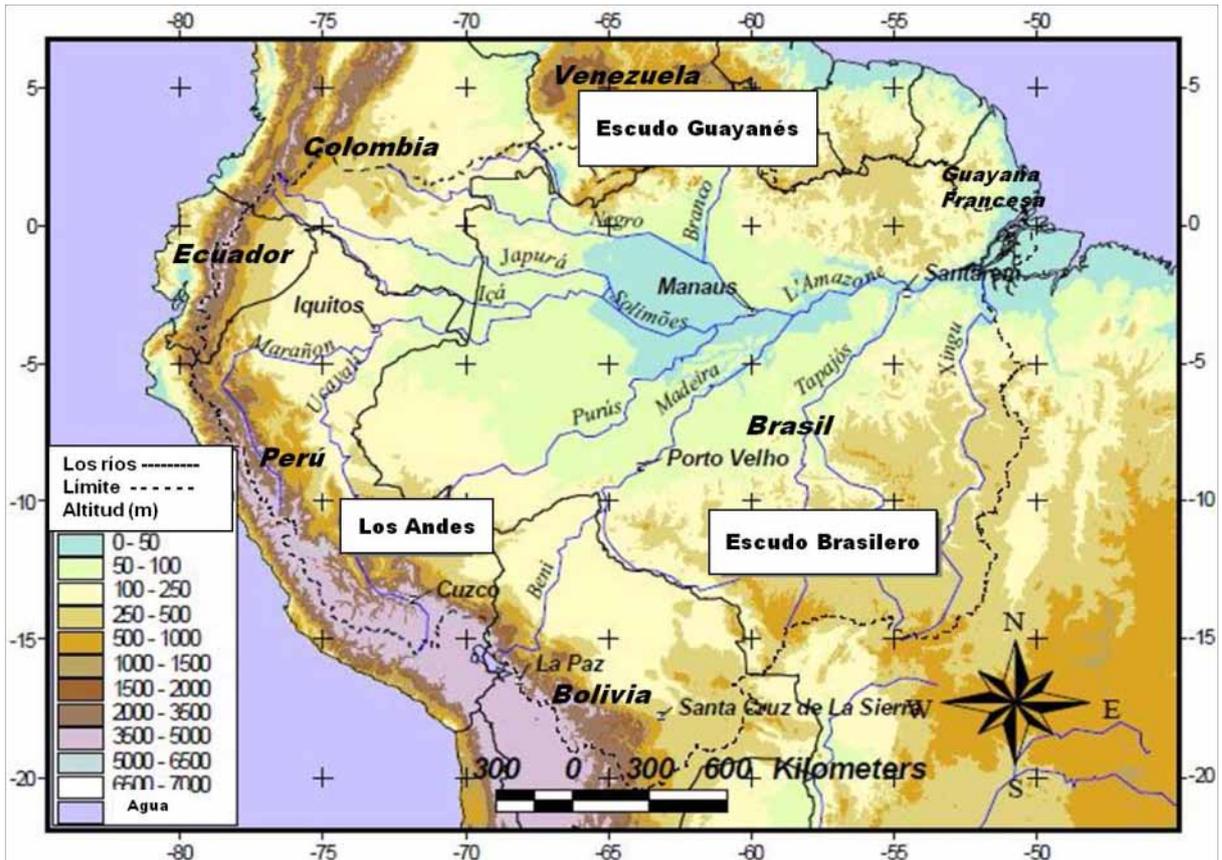
La cuenca del río Amazonas está situada entre las latitudes 5° N, 20° S y el río Amazonas, ingresa al Océano Atlántico aproximadamente al nivel de la línea ecuatorial a una longitud de -50° O. Su territorio está conformado por 7 países: Brasil (63%), Perú (17%), Bolivia (11%), Colombia (5,8%), Ecuador (2,2%), Venezuela (0,7%) y la Guyana Francesa (0,2%). Esta región está delimitada al Norte por el Escudo Guyanés, al Sur por el Escudo Brasileiro, al Este por el Océano Atlántico y al Oeste por Los Andes (Figura 2).

Esta cuenca está constituida por una extensa red hidrográfica ocupando un área total de 6.200.000 km<sup>2</sup>, desde sus nacientes en los Andes Peruanos hasta su desembocadura en el Océano Atlántico, en la región norte de Brasil. Aporta un volumen de agua que representa el 15% de los aportes de aguas dulces al océano (Molinier et al. 1996). En territorio brasileiro incluye los estados de Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima y Mato Grosso. Además de 294 municipios, destacándose las ciudades capitales: Manaus (AM), Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), Boa Vista (RR), Macapá (AP) y los municipios de Santarém (PA) y Sinop (MT) entre otros (ANA 2010).

La cuenca amazónica tiene un clima tropical húmedo. Según Salati & Marquéz (1984) el movimiento meridional del sol es mayormente responsable por los patrones de clima en la región. Por otro lado, el Océano Atlántico también juega un papel importante como fuente de humedad y aire caliente para toda la región amazónica. La media anual de la humedad relativa del aire es uniforme, con un valor de 80%, el mes más húmedo es marzo mientras que en el mes de agosto se presentan los menores porcentajes de humedad.

Debido a la localización geográfica y a su gran extensión territorial, la cuenca amazónica está fuertemente influenciada por dos regímenes de lluvia diferenciados: la parte norte sujeta

al desplazamiento meridional (norte-sur) de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y la parte sur resultante de la convección organizada, asociada a la zona de convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) durante los meses de verano. Ambas zonas representan el encuentro de masas de aire de diferentes características determinantes sobre las precipitaciones en extensas áreas, particularmente durante los meses de verano y otoño (Tomasella & Marengo 2011).



**Figura 2.** Localización geográfica y delimitación de la Cuenca Amazónica. Límites de la Cuenca (línea negra punteada). Principales tributarios (línea azul continua). (Modificado de Filizola 2003).

La precipitación media oscila entre 2300 a 2460 mm/año (Molinier et al. 2002; Fisch et al. 2006) a lo largo de la región hidrográfica. Según Kousky 1988; Ronchail 2002; Marengo 1992; Tomasella et al. 2011, la distribución de la precipitación varía en todo el territorio y presenta gran amplitud anual: períodos lluviosos y estaciones secas que definen regiones importantes:

-La región norte del Amazonas presenta una precipitación máxima registrada entre Abril y Agosto, con los porcentajes máximos registrados de Junio a Agosto a lo largo del río

Branco. Esta región no presenta estación seca ya que la misma está muy cerca de la línea ecuatorial.

-En la región este, el máximo de lluvia ocurre de Enero a Mayo, cuando el máximo de convección continental migra para el sur. Sin embargo, ningún período seco real está registrado y un régimen bimodal ecuatorial se identifica a menudo.

-La región noreste del Amazonas que incluye el área que se extiende desde la desembocadura del Amazonas hasta Manaus, presenta una temporada de lluvias de Diciembre a Abril.

-En la región sur, la estación lluviosa se registra de Octubre a Abril. Esta región recibe casi el 50% de la lluvia anual, de Diciembre a Febrero. En la cuenca del suroeste las precipitaciones de invierno pueden alcanzar el 5 y el 15% de la cantidad anual y el porcentaje sigue siendo bajo 5% en el sureste, debido a la advección de aire frío a lo largo de los Andes y frentes asociados.

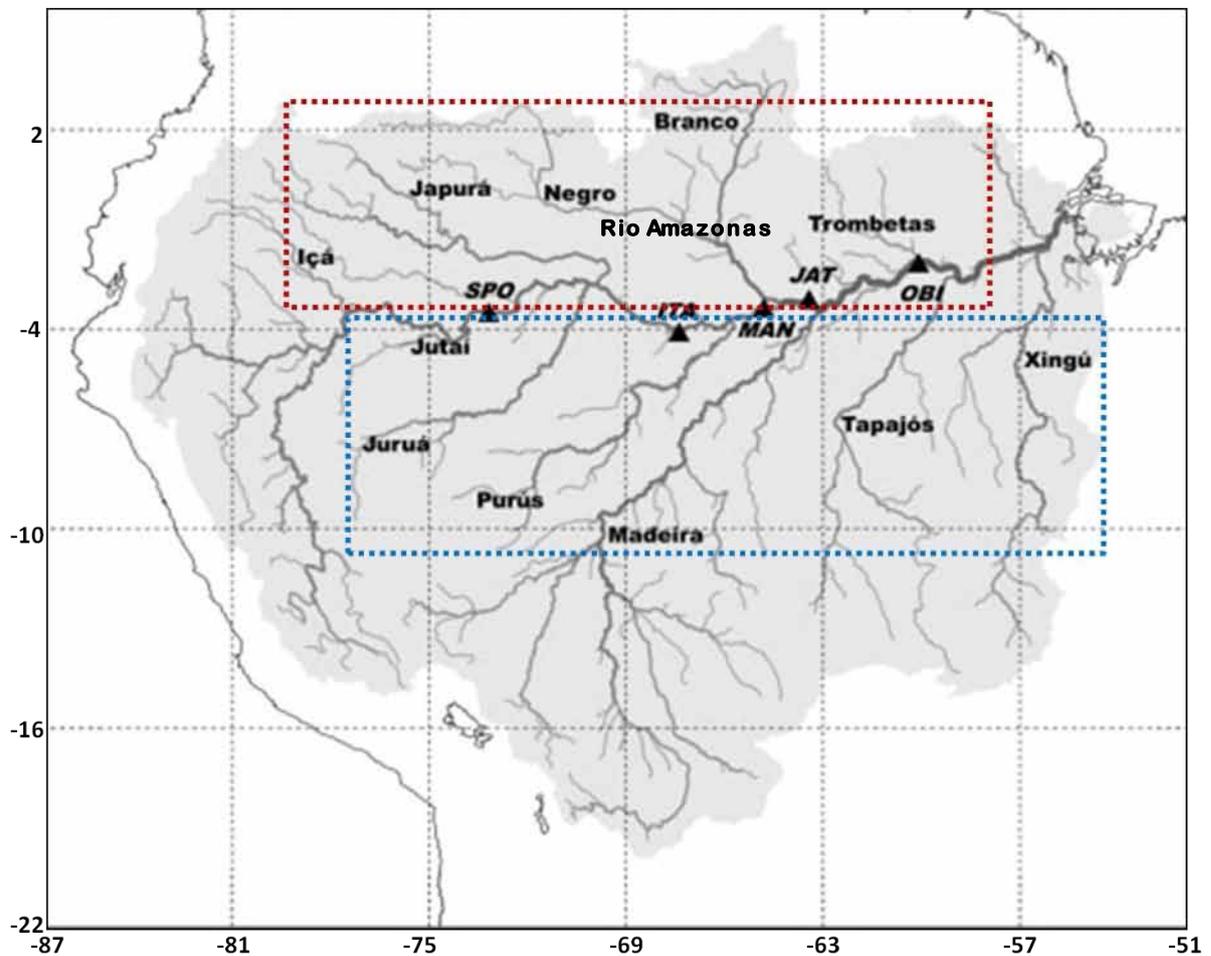
-La región central presenta el máximo de precipitación de Febrero a Abril que puede estar asociada con la penetración de sistemas frontales de la región sur interactuando y organizando una convección local. Por otro lado, el mínimo de precipitación en la parte central y sur de la cuenca ocurre en los meses de Junio a Agosto. Como el inicio de la temporada de lluvias en el hemisferio sur comienza en Septiembre, el periodo de Septiembre a Agosto ha sido elegido como el año hidrológico.

La temperatura media anual de la mayor parte de la región hidrográfica se sitúa en el rango de entre 24° C y 29° C (Molinier et al. 1996). Los meses más cálidos son Septiembre y Octubre en tanto que, los meses más fríos van de Junio a Agosto. La insolación media anual varía de 1500 a 3000 horas, representando un porcentaje de 35% a 60% del total de horas de insolación y caracterizando la elevada nubosidad. La evapotranspiración media anual es de 1320 mm, con una variación entre 441 y 1667 mm. A lo largo del año, el período comprendido de Agosto a Octubre presenta los mayores valores registrándose los menores de Febrero a Abril (Brasil das Aguas 2003-2004).

### **2.1.2 Características hidrológicas**

La cuenca de drenaje del Amazonas aporta 209 000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en media por año al Océano Atlántico (Molinier et al. 1996). Está generalmente dividida en tres sub-regiones hidrológicas principales: Los tributarios o afluentes de la región sur, los tributarios o afluentes de la región

norte y la planicie de inundación del río principal (Figura 3), la cual recibe el agua de los tributarios de ambas regiones.



**Figura 3.** El río Amazonas y sus principales tributarios. En rojo se indica la sub-región hidrológica de los tributarios del norte. En azul se indica la sub-región hidrológica de los tributarios del sur. Los triángulos negros indican la ubicación de las principales estaciones de caudal: São Paulo de Olivença (SPO); Itapeuá (ITA); Manacapuru (MAN); Jatuarana (JAT) y Óbidos (OBI). (Modificado de Tomasella et al. 2011).

El curso del río aguas arriba de la estación São Paulo de Olivença fue clasificado como Alto Amazonas, dominado por la descarga de los Andes, mientras que aguas abajo de la estación de Óbidos, el río fue clasificado como Bajo Amazonas donde la influencia de las aguas provenientes de la Guayana y del Escudo Brasileiro se extienden. Entre ambas secciones existe una mezcla de aguas que define el Medio o Amazonas Central (Tomasella et al. 2011).

Las características hidrológicas del río Amazonas y sus tributarios se encuentran sintetizadas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Características hidrológicas del río Amazonas y sus tributarios (Modificado de Tomasella et al. 2011)**

Río	Drenaje Área (km <sup>2</sup> )	Precipitación (mm año <sup>-1</sup> )	Caudal media anual (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
<b>Curso principal del río</b>			
<b>Solimões (São Paulo de Olivença)</b>	990 780	2900	46 500
<b>Solimões (Itapeuá)</b>	1 769 000	n/d	85 485
<b>Solimões (Manacapurú)</b>	2 147 740	2880	103 000
<b>Amazonas (Jatuarana)</b>	2 854 300	2780	131 600
<b>Amazonas (Óbidos)</b>	4 618 750	2520	168 700
<b>Tributarios Norte</b>			
<b>Iça</b>	143 760	3160	8 800
<b>Japurá</b>	248 000	3000	18 620
<b>Negro</b>	696 810	2566	28 400
<b>Trombetas</b>	128 000	1822	2 555
<b>Tributarios Sur</b>			
<b>Jutaí</b>	77 280	2781	3 020
<b>Juruá</b>	185 000	2452	8 440
<b>Purus</b>	370 000	2336	11 000
<b>Madera</b>	1 420 000	1940	31 200
<b>Tapajós</b>	490 000	2250	13 500
<b>Xingu</b>	504 300	1930	9 700
<b>Totalidad de la Cuenca</b>			
<b>Amazonas</b>	6 112 000	2460	209 000

n/d no disponible. Ambos precipitación y caudal corresponden al periodo 1973-1990. Los caudales medios anuales y drenajes fueron calculados en las estaciones de medición ( ). Para los tributarios, el área de drenaje fue estimada en su confluencia con el curso principal del río Amazonas. El caudal medio anual fue extrapolado en la confluencia de regionalización de flujo. La última línea indica una extrapolación del caudal para toda la cuenca.

La hidrología del río Amazonas está regida principalmente por sus tres mayores afluentes: Solimões, Negro y Madera. Entre los tributarios del sur, los ríos Juruá y Purus se extienden de la zona sub-Andina a la planicie central. El pico de inundación en el río Purus precede al pico de inundación del río Solimões por uno o dos meses. El río Madera es el más importante de todos los tributarios del sur, nace en los Andes bolivianos, cruza las tierras altas brasileras y finalmente desemboca en la planicie central. El pico de inundación del río Madera ocurre normalmente 2 meses antes que el pico del río Amazonas en la confluencia de ambos ríos. El nivel mínimo de agua en el río Madera ocurre 4 a 5 meses después del periodo de aguas bajas en el río Negro (Meade et al. 1991, Molinier et al. 1996).

En la parte sudeste de la cuenca, el río Amazonas recibe dos grandes tributarios: los ríos Xingú y Tapajós ambos nacen en el cerrado (sabana) y bosque transicional extendiéndose

de las tierras altas brasileras a la planicie central. Con respecto a los tributarios del norte, los ríos Içá y Japurá se originan en los Andes Colombianos, fluyen a través de la zona sub-Andina y llegan a la planicie central. El río Negro no es un río andino, tiene sus nacientes en el Escudo Guayanés drenando las áreas de sabana del norte de Brasil y Venezuela luego fluye hacia el sudeste en la planicie central donde recibe contribución de otros ríos como el río Branco para finalmente llegar al curso principal en la ciudad de Manaus. En promedio, el periodo de aguas altas ocurre 2 a 3 meses después que en el río Madera (Meade et al. 1991). Por último, el río Trombetas al este con sus nacientes también en el Escudo Guayanés drena sus aguas al sur hacia la planicie central.

### 2.1.3 Geoquímica de la Cuenca Amazónica

Los sistemas fluviales amazónicos fueron clasificados por Sioli (1975, 1984) dentro de una tipología de ríos que se distinguen por presentar tres tipos de aguas según sus propiedades físicas y químicas:

- 1) **Ríos de aguas blancas** o de aguas turbias, color ocre y con transparencia de más o menos 10 a 60 cm de visibilidad (medido con el disco de Secchi). Presentan elevadas concentraciones de sólidos disueltos provenientes de planicies aluviales y regiones andinas (conductividad eléctrica = 40 a 100  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Los valores de pH oscilan entre alcalino a neutro (6,2 a 7,2). Las sustancias húmicas son bajas y la fertilidad del sustrato y agua es alto. Como ejemplos de ríos de aguas blancas podemos citar a los ríos Amazonas, Solimões, Madera y Branco.
- 2) **Ríos de aguas claras** que poseen una transparencia alta de más o menos 60 cm a 4 m, presentan color verde olivo. Los valores de pH son variables (5 a 8) y las concentraciones de sedimentos en suspensión son bajas (conductividad eléctrica =  $<20 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Presentan baja concentración de sustancias húmicas y la fertilidad del sustrato y agua es de baja a intermedia. Como ejemplos tenemos a los ríos Tapajos y Xingu como también a la mayoría de los afluentes del bajo Amazonas.
- 3) **Ríos de aguas negras** caracterizados por el color castaño, de castaño-olivo, hasta castaño-rojizo. Estas aguas presentan alta concentración de materia orgánica disuelta o sustancias húmicas y baja concentración de sólidos suspendidos (conductividad eléctrica de 5 a 40  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). Sus valores de pH son ácidos (3,8 a 4,9). La fertilidad del sustrato y agua es baja. Como ejemplos están el Río Negro (clásico río de aguas negras).

## 2.2 LAS PLANICIES DE INUNDACIÓN DE LA AMAZONÍA

### 2.2.1 Características generales

Las planicies de inundación fueron definidas como áreas periódicamente inundadas por el desbordamiento lateral de los ríos o lagos y/o por la precipitación directa o infiltración de agua en la capa freática, resultando este ambiente físico-químico propicio y causal para la biota, la cual responde en adaptaciones morfológicas, anatómicas, fisiológicas, fenológicas y etológicas, produciendo comunidades de características peculiares (Junk et al. 1989).

Desde el punto de vista hidrológico, las planicies de inundación son parte del sistema de drenaje de los ríos y son periódicamente afectadas por el transporte de agua y material disuelto y particulado. Desde el punto de vista ecológico, las planicies de inundación representan zonas de transición que alternan entre los estados acuático y terrestre (ATTZ en inglés) y conectan los canales del río con cuerpos lénticos y con tierra firme permanente (Junk et al. 1989). Pueden ser clasificadas de acuerdo a su amplitud, frecuencia, previsibilidad y la fuente de inundación. Las planicies de inundación de grandes ríos son caracterizadas por un pulso de inundación monomodal previsible y una gran amplitud de inundación. Por ejemplo, las planicies de inundación del río Amazonas y sus principales afluentes (Junk 1997).

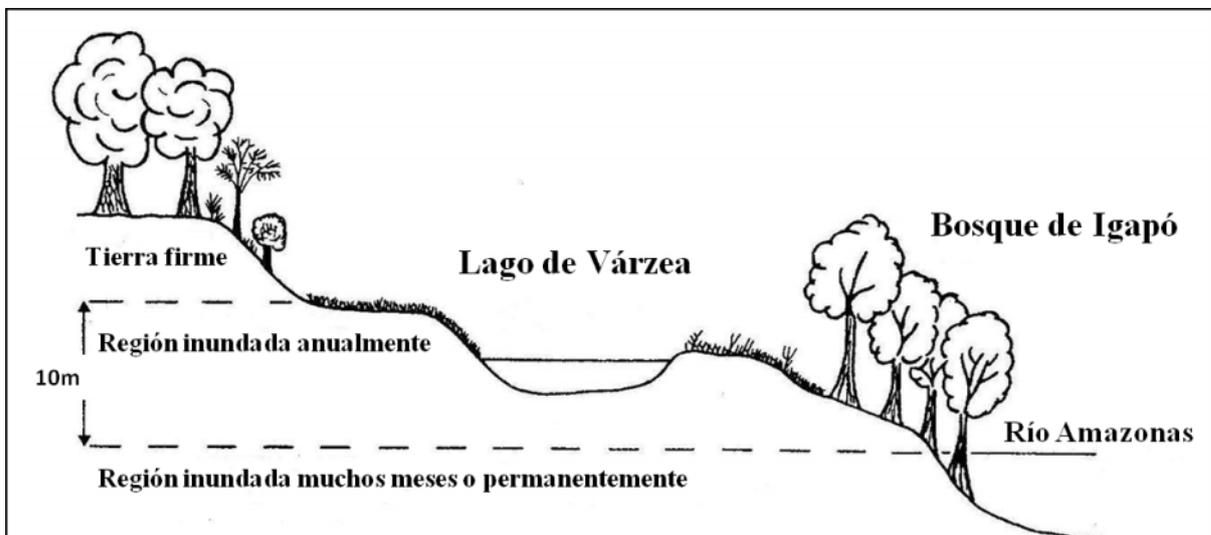
Las planicies de inundación de la cuenca del Amazonas fueron clasificadas por Sioli (1975) en base a los criterios de su origen orográfico, tipos de agua y transformaciones biológicas como:

- Planicies de inundación de aguas blancas, provenientes de los Andes, presentan mayor turbidez y son ricas en nutrientes.
- -Planicies de inundación de aguas negras, con una cantidad de materia orgánica disuelta y particulada extremadamente pobres en nutrientes.
- -Planicies de inundación de aguas claras que presentan características intermedias.

En la Amazonía son frecuentes los llamados lagos de “Várzea” o lagos de planicies de inundación, formados por las aguas provenientes principalmente de los ríos de aguas blancas y lagos de “Igapó” o los lagos de planicies de inundación que provienen de los ríos de aguas negras (Sioli 1984; Junk 1997).

### 2.2.2 Posición y dinámica de un lago de várzea en la planicie

En la Amazonía los lagos de várzea se inundan anualmente y se encuentran situados en la planicie de inundación, entre la parte de tierra alta conocida como “tierra firme” que no se inunda y el bosque de igapó que es un área sujeta a sumersión prolongada o permanente (Irion et al. 1997). Particularmente, en la Amazonía central, la altura del nivel del agua en la estación seca para el río es igual al nivel del bosque de igapó y en la estación húmeda la marca de aguas altas es igual al nivel de agua por encima de la várzea que es como de 10m (Figura 4) (Williams 1987).



**Figura 4.** Posición de un lago de várzea en la planicie de inundación en la Amazonía (Modificado de Williams 1987)

Las planicies de inundación de aguas blancas o várzeas fueron clasificadas por Junk et al. (2012), en función de parámetros hidrológicos, químicos de suelos y agua y botánicos en:

1) Sistemas acuáticos permanentes

- Agua permanente
  - Lagos incrustados en tierras altas: Ría Lagos
  - Lagos en la planicie de inundación:
    - Lagos profundos con reducida y alta conectividad
    - Lagos Oxbow (meandros) con reducida y alta conectividad
    - Lagos Scroll (desplazamiento) con reducida y alta conectividad

- Sistemas artificiales: Reservorios hidroeléctricos, estanques de peces, plantaciones de arroz con cáscara
- Agua corriente
  - Canales de ríos (de acuerdo al tamaño)  
Zona del canal central y Zona de ribera
- 2) Sistemas acuáticos inundados periódicamente (Zona de Transición Acuática-Terrestre)
  - Sistemas inundados periódicamente con aguas corrientes
    - Canales pequeños de longitud variable, paranás largos, cinturón de vegetación acuática de hierbas robustas enraizadas en el sedimento, furos cortos.
  - Sistemas inundados periódicamente cubiertos por aguas permanentes
    - Áreas de aguas abiertas
    - Áreas cubiertas por macrófitas acuáticas
    - Áreas cubiertas por bosque inundable
  - Sistemas artificiales
- 3) Sistemas terrestres permanentes (tierra firme)
  - Sistemas ribereños de la planicie de inundación activa
    - Tierras altas del terciario
    - Tierras altas de origen pleistocénico
  - Sistemas dentro de la planicie de inundación activa (paleo-várzeas de diferente edad)
  - Hábitats de origen antropogénico (carreteras)
- 4) Sistemas terrestres periódicamente inundados (ATTZ)
  - Sistemas sin o con escasa vegetación (bancos de arena, lodo, pendientes, rocas)
  - Sistemas predominantemente cubiertos con plantas herbáceas
  - Sistemas predominantemente cubiertos con arbustos y árboles
    - Bosques bajos y altos de várzea
    - Bosques pantanosos

### 2.2.3 Vegetación y Biodiversidad

La vegetación en las planicies de inundación depende de diversos factores como la edad de existencia, corriente, textura de los sedimentos, sedimentación y periodicidad de inundación. En la fase terrestre, las áreas bajas son colonizadas por plantas herbáceas

terrestres, las cuales son reemplazadas por algunas plantas acuáticas cuando el nivel de agua aumenta (Junk 1984). Las macrófitas incluyen una variedad de pastos principalmente en las planicies de inundación tipo sabana, las cuales son mayormente *rhizomatus* y densos bosques de árboles resistentes al proceso de inundación en las regiones de bosques lluviosos de África, Asia y Sud América, ejemplo los bosques de Igapó de la Amazonía. Otros elementos importantes de la flora son las formas flotantes, entre estas las especies flotantes libres que forman praderas (Williams 1987).

Según Junk & Piedade (1997) y Piedade et al. (2010) la vegetación de várzea se clasifica por el sustrato de contacto y la posición de los órganos fotosintéticos en:

-Vegetación enraizada de hojas flotantes ej. *Victoria amazónica*(Poepp.) Sowerby y de hojas emergentes por ej. *Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock.

-Vegetación flotante libre que puede ser variable: sumergida bajo la superficie, por ej. *Lemna* spp. con hojas extendidas cerca a la superficie del agua, ej. *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.

-Un Tipo de Transición entre las dos anteriores. Plantas con hojas emergentes por ej. *Paspalum repens* P. J. Bergius.

En cuanto a la biodiversidad las planicies de inundación son sistemas que albergan no solo plantas y animales específicos de los humedales, sino también muchas especies de hábitats terrestres colindantes y de aguas profundas que pueden tener un impacto fundamental en las estructuras y funciones de las planicies de inundación. Por ejemplo, las especies de plantas terrestres contribuyen sustancialmente a la diversidad de hábitats, producción primaria y ciclo de nutrientes (Junk & Wantzen 2004). También muchas especies de aves viven permanentemente o temporalmente en estos humedales, ya que para las aves migradoras que anidan en las altas latitudes tropicales y subtropicales húmedas son lugares esenciales para invernar (Junk 2002).

Por otra parte la conectividad entre el canal principal y la planicie de inundación ha sido un tema central en el debate de la biodiversidad (Junk & Wantzen 2004). La conectividad se refiere a la transferencia de energía y materia (incluyendo la biota), a través de las fronteras del ecotono con mayores implicaciones para la biodiversidad (Ward & Stanford 1995a; Ward & Tockner 2001). Un gran número de peces tropicales realizan migraciones de desove y alimentación. Sin embargo, la reproducción y el desarrollo de las poblaciones son seriamente afectados por la interrupción de rutas de migración o accesos bloqueados a las planicies de inundación (Junk 2002). La diversidad de especies será máxima

en un nivel intermedio de la conectividad hidrológica, entre parches dentro de los corredores fluviales. Los efectos de la conectividad sobre la riqueza de las especies son determinadas por el tipo, la intensidad y los atributos geomorfológicos de los canales cortados. Por ejemplo, la conectividad puede reducir la diversidad de especies, si la carga de nutrientes que lleva el río es excesiva y conduce al proceso de eutrofización de los cuerpos de agua de las planicies de inundación conectados (Ward & Tockner 2001).

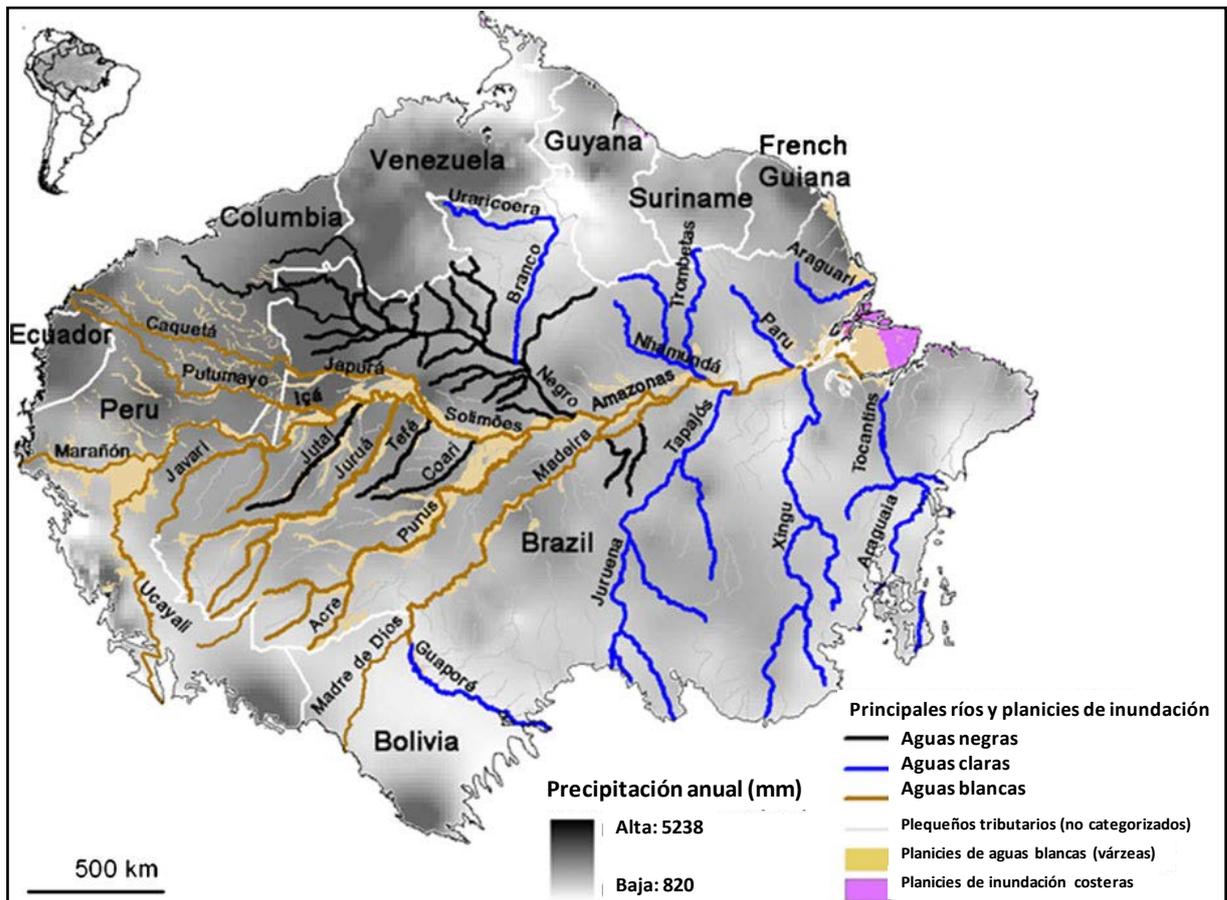
### 2.2.4 Distribución espacial de las planicies de inundación

El área total cubierta por las planicies de inundación a nivel mundial ha sido fuertemente subestimada porque muchas de ellas no han sido reconocidas como tales. Sin embargo, una clasificación continental presenta en orden decreciente la integridad de las planicies de inundación neotropicales o húmedales en: América del Sur, Africa, Australia y Asia (Junk 2002). Las mayores planicies de inundación naturales en Sud América se presentan descritas en la Tabla 2.

**Tabla 2. Extensión aproximada de las principales planicies de inundación en Sud América. Modificado de Junk (1997).**

<b>Regimen Hidrológico/Planicie de inundación</b>	<b>Extensión (km)</b>
<b>A. Polimodal Imprevisible</b>	
A lo largo de las corrientes de orden inferior dentro de las planicies amazónicas	1100
Pie o faldas de los Andes	>100
<b>B. Monomodal</b>	
Río Amazonas y sus tributarios en Brasil	300
Ríos Beni, Mamoré y Guaporé	150
Pantanal, Brasil	140
Brasil Central	100
Llanos, Venezuela	80
Río Araguaia (Banal y adyacentes)	65
Río Negro (medio)	50
Planicies de Roraima y Rupununi, Guianas	33
<b>C. Bimodal</b>	
Río Magdalena	20
<b>D. Régimen de mar, región costera</b>	
Costa del Atlántico-Caribe	120
Estuario del Río Amazonas	50
Delta del Río Orinoco	22
Delta del Río Magdalena	5
Costa del Pacífico	1

El río Amazonas y sus grandes tributarios son acompañados a lo largo de su trayecto medio y bajo por grandes planicies de inundación las cuales cubren un área aproximada de 300 000 km<sup>2</sup> (Irion et al. 1997). La disposición exacta de las zonas de várzea todavía no pueden ser identificadas con exactitud (Figura 5), porque desde un punto de vista ecológico, solo las zonas afectadas directamente por los ríos de aguas blancas se pueden considerar várzeas (Junk et al. 2011). Además es importante remarcar que no se hace una diferencia entre várzeas recientes y paleo-várzeas (planicies de inundación donde los sedimentos provenientes de los Andes fueron depositados durante los períodos interglaciares anteriores y presentan un nivel de nutrientes bajo comparado con las planicies recientes) (Irion et al. 2010). Las paleo-várzeas ocupan grandes áreas a lo largo de los ríos de aguas blancas en la Amazonía Central, donde se supone que por lo menos 125 000 km<sup>2</sup> de la superficie total de várzea consiste en paleo-várzeas (Junk et al. 2011).



**Figura 5.** Principales ríos y planicies de inundación en la región amazónica (Modificado de Junk et al. 2011).

Entre los principales lagos de várzea, presentes en la región amazónica brasilera podemos citar: lago do Castanho, Maicá, Redondo, Grande de Maicuru, Itaudema, Grande de

Curuaí, Lago do Poço. Los lagos de várzea también pueden ser encontrados en las partes centrales de islas de aluviones como en el lago do Reis, en la Isla Carneiro, foz del río Negro; o lago de Piracicaba en la isla Grande do Tapava y el lago Camaleão en la isla de Marchantaria, Ilha dos Mouras. (Irion et al. 1984).

### **2.2.5 Conceptos de Pulso de inundación y Pulso hidrológico**

El concepto de pulso de inundación (Junk et al. 1989) implica la fluctuación del nivel de agua (oscilación media de 10 m) que responde a un patrón estacional, de una época de máxima inundación a otra de estiaje. Entre estos dos extremos se presentan épocas de transición (ascenso y descenso de la inundación). Este concepto está basado en consideraciones hidrológicas del río, su área de influencia y su planicie de inundación. Desde el punto de vista hidrológico el río y su planicie de inundación pueden ser considerados una unidad indivisible debido a su balance sedimentario y agua en común. La dinámica de este pulso modula la proporción de componentes suspendidos y disueltos en el agua alterando sus características físico-químicas. También ejerce influencia sobre la distribución y funcionamiento de los ecosistemas causando efectos sobre la ecología y la dinámica del ciclo de vida (Junk 1997).

Debido a los avances logrados en estudios detallados sobre la hidrología, la ecología, la hidroquímica, el clima, el paleoclima, la biogeografía, la biodiversidad, el paisaje y también a través de la restauración de humedales y manejo sostenible de las planicies de inundación en diferentes latitudes y continentes, el concepto de pulso de inundación (Junk et al. 1989) ha sido modificado, ampliado y restringido por varios autores. Las discusiones sobre la ecología de las planicies de inundación y el manejo están muy influenciadas por los datos obtenidos en lo referente al pulso de inundación y la conectividad, al modelo de productividad fluvial y al concepto de uso múltiple (Junk & Wantzen 2004).

De esta manera fue propuesto el concepto de pulso hidrológico (Neiff 1990) el cual responde también a un patrón de variabilidad estacional tomando en cuenta, un periodo de inundación o potamofase y un periodo de estiaje o limnofase, en relación con un nivel de referencia o desborde, que constituye el límite a partir del cual el agua comienza a ingresar a la planicie aluvial. La dinámica de tales pulsos está caracterizada por atributos hidrológicos: 1) Espaciales que definen los efectos del pulso sobre la planicie en un punto dado del curso del río (Amplitud, Intensidad, Tensión) y 2) Temporales que están relacionados con el comportamiento

histórico de los atributos espaciales (Frecuencia, Regularidad, Estacionalidad). El pulso hidrológico es responsable de los principales procesos que tienen influencia en la estabilidad de los ecosistemas fluviales (Neiff, 1990, 1999, 2004; Neiff et al. 2008).

## 2.3 EL FITOPLANCTON

### 2.3.1 Aspectos Generales

Se define como fitoplancton la comunidad de micro-organismos o productores primarios en su mayoría fotosintéticos (micro-algas, cianobacterias, flagelados heterótrofos y otros grupos sin clorofila) que persisten en suspensión en la masa de agua y son susceptibles al movimiento pasivo por el viento y la corriente (Reynolds 2006). Dentro de la comunidad planctónica ejerce un papel fundamental en la ecología acuática, tanto en la construcción de la cadena trófica como en la conducción de procesos esenciales como la producción de oxígeno y la descomposición de la materia orgánica. Las especies del fitoplancton varían en tamaño (<1µm a 1mm, los agregados pueden ser más grandes) (Tabla 3), forma (la mayoría de las especies pueden ser comparadas con formas geométricas simples como barras, elipses, conos o paralelepípedos o combinaciones), posición filogenética y evolutiva, demanda de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y energía (Padisák 2005).

**Tabla 3. Variación del tamaño de algunas especies de fitoplancton (Modificado de Padisák 2005)**

Nombre	Límite Bajo	Límite Alto	Ejemplos
Picoplancton	0.2 µm	2 µm	<i>Synechococcus, Nanochloris, Chlorella</i>
Nanoplancton	2 µm	20 µm	<i>Rhodomonas</i> , muchos <i>Chlorococcales</i> , pequeños chrysophytes
Microplancton	20 µm	200 µm	<i>Asterionella, Ceratium, Sphaerocystis, Snowella</i> , verde-azules filamentosas
Mesoplancton	200 µm	2 mm	<i>Gloeotrichia, Aphanizomenon, Aulacoseira</i> , cadenas formadas por Pennales
Macroplancton	2 mm	2 cm	Colonias de <i>Microcystis</i> extremadamente grandes

La composición y abundancia del fitoplancton en lagos y embalses depende de los siguientes factores:

- Condiciones físicas e hidrológicas: luz, temperatura, turbulencia/estabilidad del agua, tiempo de residencia del agua y tasa de sedimentación del plancton.

- Composición química del agua: nutrientes, estequiometría (razón N:P) y materia orgánica, mineralización (compuestos de proporción constante) pH y oligoelementos.
- Factores biológicos: Depredación por parte de filtradores planctófagos (zooplankton y peces) y competencia entre especies. Existen efectos alelopáticos y toxicidad inducida por algunas especies. Parasitismo fúngico, infecciones por parte de hongos y cromistas heterótrofos flagelados capaces de reducir densas poblaciones fitoplanctónicas. (Infante 1988)

Defínase como producción primaria a la productividad fitoplanctónica representada por la síntesis de materia orgánica (Wetzel 1983). A través de su evaluación se conoce la tasa de incorporación del carbono inorgánico durante la fotosíntesis por parte del fitoplancton. La distribución vertical de la productividad fitoplanctónica es determinada principalmente por la intensidad de la radiación lumínica, la disponibilidad de nutrientes, la transparencia, la estratificación y la mezcla (Estevez 1998).

### 2.3.2 El proceso de eutrofización en aguas continentales

El proceso de eutrofización se define como uno de los estados de sucesión de los lagos, originado por la acumulación e incremento de nutrientes especialmente el nitrógeno (N) y el fósforo (P) y que tiene como consecuencia el aumento de la productividad primaria caracterizada por el crecimiento de poblaciones algales, siendo común la aparición de floraciones de algas, lo que altera totalmente el equilibrio de las cadenas tróficas (Salas & Martino 2001; Tundisi & Matsumura-Tundisi 1992; Wetzel 1983). Este proceso puede tener un origen natural, de forma lenta y hoy en día es fundamentalmente de carácter cultural acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico.

Para poder caracterizar el estado de eutrofización en que se encuentra un cuerpo de agua, se ha adoptado un sistema de clasificación (OECD 1982; CETESB 2002) donde se consideran los siguientes niveles de trofia o escalas tróficas:

- *oligotrófico* (lagos de aguas claras con baja productividad)
- *mesotrófico* (lagos con productividad intermedia)
- *eutrófico* (lagos con elevada productividad) hacia hipereutrófico.

La eutrofización puede causar cambios significativos en la estructura taxonómica de los ecosistemas acuáticos, reduciendo la biodiversidad por el incremento de la abundancia de algunas especies, particularmente Cianobacterias, las cuales tienen la capacidad de formar *blooms* o floraciones de algas superficiales. Este patrón ha sido documentado para ecosistemas boreales, templados, subtropicales y tropicales (Fernandes et al. 2009)

El término *bloom* o floración es descrito como la biomasa fitoplanctónica significativamente más elevada que la media del lago y es utilizado para indicar el crecimiento explosivo de microalgas. Generalmente, una floración se presenta cuando existen acumulaciones masivas (de  $10^4$  a  $>10^6$  células·mL<sup>-1</sup>) de una especie de alga o de dos especies coexistentes, que es menos frecuente (Paerl 1988; Pizzolon 1996), con concentraciones de clorofila-a que pueden superar los 40µg/L. Usualmente las floraciones son evaluadas a través de análisis de especies presentes (cualitativos) y de medidas de biomasa (clorofila-a) (Reynolds 2006).

Las floraciones o *blooms* de Cianobacterias son frecuentemente precedidas por el enriquecimiento de nutrientes (N y P), lo cual coincide con cambios ambientales como la estratificación y/o elevación de temperatura y/o ausencia del zooplancton consumidor. Estas floraciones son comunes en los sistemas lenticos bajo condiciones de alta insolación, altas temperaturas, estabilidad de la columna de agua y calma de los vientos (Paerl 1988; Reynolds 2006).

### **2.3.3 Factores que controlan la eutrofización en lagos tropicales**

A diferencia de los lagos templados donde la productividad primaria es controlada principalmente por la temperatura, que supera al efecto de la irradiación (Lewis 1987), en lagos tropicales el principal factor de control es la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y sílice (Salas & Martino 1991; Toledo et al.1990 y Wetzel 1983). Sin embargo los estudios de Schmidt (1973) en el lago Castanho, Melack & Forsberg (2001) en el lago Calado y Carvalho et al. (2001) sobre la comparación de la limnología de las planicies de inundación en Sud América determinaron además de los nutrientes otros factores como la disponibilidad de luz y la temperatura. Otros factores como la precipitación, el viento y la fluctuación de los niveles de agua fueron considerados por Espíndola et al., (1996) como factores que regulan los patrones estacionales del fitoplancton y que desarrollan patrones de

variación entre la disponibilidad de la luz y nutrientes reflejándose en los ciclos de las poblaciones fitoplanctónicas.

Por otro lado, Fisher & Parsley (1979), Dellamano-Oliveira et al. (2003), Melo et al. (2004) y Chalar (2006) consideraron también importante la interacción de los factores climatológicos e hidrológicos, ya que poseen una vinculación directa con la entrada de nutrientes y otros materiales disueltos y particulados. Al mismo tiempo estos factores regulan la periodicidad del fitoplancton determinando el tiempo de residencia de la biomasa y afectando su estructura horizontal y vertical, además de introducir nutrientes y energía en el ecosistema acuático.

Particularmente, en los lagos de la Amazonía Central, los factores luz, nutrientes y fluctuaciones del nivel de agua aparecen como mecanismos dominantes que controlan el crecimiento de la productividad primaria (Rai & Hill 1984). Los sistemas de lagos de várzea del Amazonas, son caracterizados por presentar fluctuaciones hidrométricas, que responden al fenómeno “aguas bajas - aguas altas” como mecanismo regulador de la productividad en este medio (Espíndola et al. 1996). Principalmente en los sistemas río-planicie la variación temporal de los factores físicos, químicos y bióticos fue asociada con los cambios en los niveles hidrométricos y la producción primaria fue asociada a la influencia y control del pulso de inundación (Putz & Junk 1997).

Muchos de los lagos en la várzea son caracterizados por presentar conexiones con el río (Bonnet et al. 2008; Perez 2008), que en periodo de aguas altas transbordan de sus lechos ocasionando una inundación generalizada en la región, dando origen a inmensas áreas inundadas. En este periodo existe un intercambio de información entre los sistemas acuáticos y terrestres y en el periodo de descenso de las aguas, ese depósito de nutrientes retorna al medio acuático constituyéndose en un ambiente altamente productivo (Junk & Wantzen 2004).

En muchos cuerpos de aguas tropicales y subtropicales, las cianobacterias pueden ser el grupo predominante del fitoplancton durante algunos periodos del año, formando densos *blooms* y dominando en número como también en biomasa. Además este grupo de algas puede desarrollarse a bajas intensidades de luz encontrándose en periodos de aguas bajas y alta turbidez (Nogueira et al. 2005). A pesar de que las floraciones algales pueden desarrollarse en ambientes naturales no impactados, su probabilidad de ocurrencia aumenta mucho en ambientes ricos en nutrientes (Lamparelli 2004; Freire 2010).

### 2.3.4 Índice de Estado Trófico para lagos tropicales

El fitoplancton se ha usado ampliamente como indicador del estado trófico de los cuerpos de agua. El Índice de Estado Trófico (IET) es un instrumento para evaluación de la calidad del agua en un proceso de monitoreo. Este índice está basado en las concentraciones de nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), clorofila-a y la profundidad del disco de Secchi y fue utilizado con éxito en lagos de clima templado (Carlson 1977; OECD 1982; Salas & Martino 1991).

Carlson (1977) definió un índice de estado trófico, usando una transformación linear de la transparencia medida por el disco de Secchi, que evalúa la concentración de biomasa. Debido a su simplicidad y objetividad, este índice es uno de los más utilizados para la clasificación de lagos. Además de la transparencia el índice puede ser expresado en función de las concentraciones de fósforo y clorofila-a. Los modelos utilizados fueron basados en datos obtenidos en lagos de clima templado. Posteriormente este índice fue adaptado a lagos y reservorios de clima tropical y subtropical utilizando una serie histórica de niveles de nutrientes, fósforo, nitrato y clorofila-a (Toledo 1990; Salas & Martino 1991).

#### Modelo de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (IETm) para lagos tropicales

Toledo (1990) propusieron una modificación en las expresiones del Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977) que incluía también una expresión para el ortofosfato soluble. Las siguientes ecuaciones obtenidas expresan el Índice de Estado Trófico de Carlson Modificado (IETm):

$$\mathbf{IETm (Tra)} = 10*[6-(0,64+\ln (Tra)/\ln 2)] \quad (\text{ecuación 1})$$

$$\mathbf{IETm (PT)} = 10*[6-\ln (80,32/PT)/\ln 2] \quad (\text{ecuación 2})$$

$$\mathbf{IETm (OF)} = 10*[6-\ln (21,67/OF)/\ln 2] \quad (\text{ecuación 3})$$

$$\mathbf{IETm (Cl a)} = 10*[6-(2,04-0,695\ln Cl a/\ln 2)] \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde: Tra= Transparencia, PT= Fósforo Total,  
OF= Ortofosfato Soluble, Cl a = Clorofila a

Los valores y criterios del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado (IET)m se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4 Criterios y valores del estado trófico según la clasificación propuesta por Toledo (1990).**

<b>Criterio</b>	<b>Estado trófico</b>	<b>Transparencia (m)</b>	<b>Fósforo Total (mg/L<sup>-2</sup>)</b>	<b>Clorofila <i>a</i> (µg/L<sup>-2</sup>)</b>
<b>IET ≤ 24</b>	Ultraoligotrófico	≥ 7,8	≤ 0,006	≤ 0,51
<b>24 &lt; IET ≤ 44</b>	Oligotrófico	7,7 – 2,0	0,007 – 0,026	0,52 – 3,81
<b>44 &lt; IET ≤ 54</b>	Mesotrófico	1,9 – 1,0	0,027 – 0,052	3,82 – 10,34
<b>54 &lt; IET ≤ 74</b>	Eutrófico	0,9 – 0,3	0,053 – 0,211	10,35 – 76,06
<b>IET &gt; 74</b>	Hipereutrófico	< 0,3	> 0,211	> 76,06

Esta versión modificada del índice fue presentada como la más adecuada para la determinación del estado trófico en lagos y reservorios de clima tropical y subtropical, según Calijuri (1988), Duarte (1999), Mercante & Tucci-Moura (1999), CETESB (2002), Naval et al. (2004), Crossetti & Bicudo (2005), Sartório (2011).

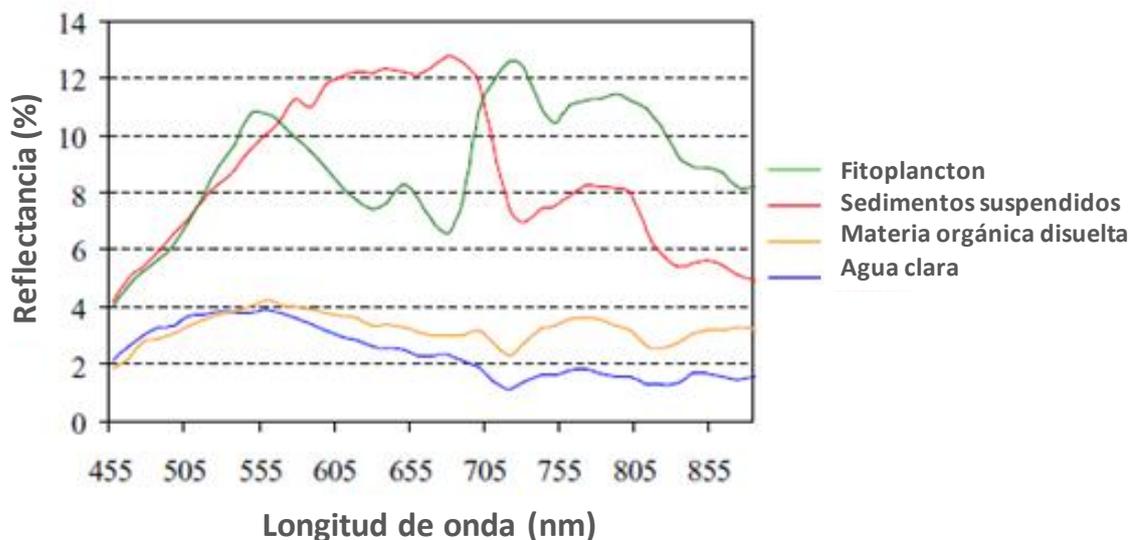
### **2.3.5 Síntesis de trabajos sobre fitoplancton en la Amazonía Brasileira**

En Brasil existe un amplio conocimiento del fitoplancton en especial en los reservorios. Los estudios sobre las comunidades fitoplanctónicas en la región central Amazónica destacan su importancia a nivel taxonómico y ecológico. Entre los principales estudios se pueden citar: Uberkovich (1984) Fitoplancton del río Negro y río Tapajos; Huszar & Reynolds (1997), Huszar et al. (2000) y Melo et al. (2004) Estudios en los Lagos Batata y Mussurá; Esteves et al. (1994) Lago Trompetas; Ibañez (1997) Lago Camaleão; Dellamano-Oliveira (2003) Lago Maraño. La biodiversidad del fitoplancton en la várzea de Curuaí está descrita en los trabajos de Arantes Gama & Nogueira (2008) y Nogueira et al. (2010). Otros artículos que contienen información cuantitativa del fitoplancton de la Amazonia Central son: Fischer & Parsley (1979); Pessoa-Aragão (1984) en estudios sobre la dieta de los peces de Janauacá. Sobre la variación de las concentraciones de clorofila-a en la Amazonía Central y en el Bajo Amazonas se tienen los trabajos de Barbosa (2005); Rudorff (2006) y Alcántara (2007).

## 2.4 RADIOMETRÍA

### 2.4.1 Respuesta espectral del agua

La respuesta espectral de las aguas continentales está relacionada a las sustancias presentes en la columna de agua (Figura 6). Estos elementos llamados componentes ópticamente activos (OAC) son los responsables por las diferentes respuestas espectrales del agua captadas por los sensores. La región de mayor penetración de la luz en el agua y de mayor interacción entre la radiación electromagnética (REM) y los componentes se localiza entre 400 - 500 nm. La reflectancia del agua es muy pequeña, en torno al 4%, lo que hace que los sensores disponibles sean muchas veces insensibles a los cambios del color del agua. La reflectancia de la superficie es más elevada que la del volumen y es afectada por factores como el viento y la geometría de adquisición (Meneses & Netto 2001; Sayuri et al. 2010).



**Figura 6.** Respuesta espectral del agua y sus componentes activos (Modificado de Meneses & Netto 2001)

El agua pura presenta excelentes propiedades de transmisión de la mayor parte de la radiación electromagnética en la región del visible (VIS) y de absorción en la región del infrarrojo (IR). Sin embargo, hacia el infrarrojo medio (MIR) es prácticamente nula. Esta falta de reflectancia va a ser la clave para distinguir entre áreas de tierra y agua tanto en costas o lagos como en ríos. El espectro de radiación que interesa para los procesos vitales de los sistemas acuáticos es la radiación conocida como fotosintéticamente activa (PAR) o sea

aquella que va a proporcionar la energía necesaria para que ocurra la fotosíntesis. Esta radiación se encuentra comprendida entre 400 y 700 nm.

Cuando el agua presenta turbidez, la respuesta espectral va a depender del tipo de partículas (materia en suspensión, fitoplancton y materia orgánica disuelta), de la cantidad y de la calidad de estas. Por ejemplo, si se trata de fitoplancton, aparecerán importantes alteraciones en la banda verde, la reflectancia aumenta en esta banda y en la banda azul disminuye. Si se trata de sedimentos inorgánicos, la reflectancia aumenta, especialmente en la banda roja.

Solamente los elementos capaces de alterar las propiedades ópticas del agua podrán ser monitoreados por sensores remotos. Las partículas en suspensión son capaces de afectar estas propiedades modificando la turbidez del agua y provocando una dispersión de la radiación incidente, resultante de la radiación emergente del cuerpo de agua en las bandas del visible (VIS). La radiación que emerge es el resultado de la zona de radiación de dispersión eufótica. Por lo tanto, se aplica la ley de Beer, que establece que la irradiancia disminuye exponencialmente con la profundidad:

$$I_z = I_0 \exp - Kz$$

Donde:  $z$  = el máximo de energía en la zona eufótica

$o$  = nivel de energía de la profundidad del agua

$K$  = coeficiente de atenuación vertical ( $> K >$  atenuación)

La carga de material disuelto está constituida por sustancias húmicas, responsables por la coloración amarilla atribuida al agua. Según Rudorff (2006) la presencia de sustancias húmicas provoca una absorción selectiva de radiación en la longitud de ondas cortas. El material en suspensión que se constituye por minerales, partículas finas o gránulos, provocan un efecto de dispersión en la columna de agua. Así los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua, provocan cambios en la interacción de la radiación electromagnética con el agua y por consecuencia en su color. En este sentido, esos componentes ópticamente se tornan en indicadores de la calidad del agua.

## 2.4.2 Propiedades ópticas del fitoplancton

### 2.4.2.1 Absorción de la luz

La absorción de la luz en aguas naturales es atribuida a cuatro componentes de los ecosistemas acuáticos: Agua pura, pigmentos amarillos disueltos (gilvin), la biota fotosintética (fitoplancton y macrófitas) y la materia particulada inanimada o materia inorgánica (tripton) (Kirk 1994). El agua tiene una capacidad de absorción muy fuerte en todas bandas del espectro electromagnético, desde la región del visible (VIS) hasta las regiones del Infrarrojo medio (MIR) y de las microondas.

La interacción del fitoplancton con la radiación solar que incide en un cuerpo de agua tiene lugar en los pigmentos fotosintéticos, los cuales son moléculas con capacidad para absorber radiación electromagnética (400 a 700 nm) y se encuentran dentro de los organelos conocidos como cloroplastos. A su vez cada cloroplasto en su interior contiene además un material amorfo, gelatinoso y rico en enzimas llamado estroma, donde se encuentra un sistema de membranas en forma de láminas y sacos cerrados y aplanados, similares a vesículas, los tilacoides. Entre las algas eucarióticas los cloroplastos varían grandemente en tamaño, número y morfología (Kirk 1994).

Existen tres tipos químicamente distintos de pigmentos: las clorofilas, los carotenoides y las biliproteínas (Kirk 1994) que pueden ser clasificados según su función en fotosintéticos y fotoprotectores (Bricaud et al. 2004).

Las clorofilas son compuestos de tipo tetrapirrol unidos por medio de puentes de metilo. Todas las plantas fotosintéticas contienen clorofila-a y muchas clases de plantas contienen adicionalmente clorofila-b o clorofila-c o raramente clorofila-d. Normalmente la clorofila-a es la que se encuentra mayormente presente. Presentan fluorescencia, máximo a 680 nm. Las clorofilas-a y b tienen una fuerte absorción en la banda roja y otra fuerte absorción en la banda azul. En la región verde del espectro, al medio, la absorción es muy baja sin llegar a cero, de aquí el color verde de estos pigmentos. Su función es la fotoquímica (fotosintéticos) y captura de luz.(Figura 7).

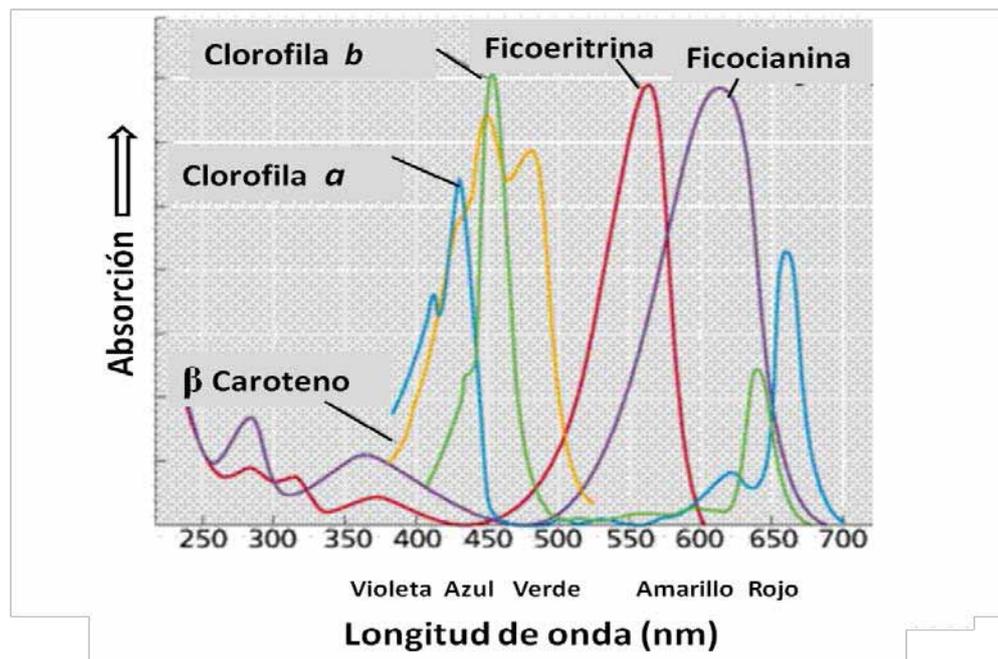
El coeficiente de absorción de la clorofila tiene dos máximos, uno en la región del azul, en torno a 450 nm y otro en la región del rojo, entorno de 650 nm. Estos máximos están

asociados a las clorofilas a y b, las cuales tienen picos de absorción en 430 nm y 665 nm, respectivamente.

Los carotenoides son otra clase de pigmentos fotosintéticos, rojos, anaranjados o amarillos, estructura de hidrocarburos conjugados. Existen dos tipos principales: carotenos (ej. b-caroteno) y xantofilas (ej. fucoxantina). Algunos son fotoprotectores y otros fotosintéticos que capturan la luz. Estos pigmentos absorben luz en la región verde-azul. (Figura 7).

Las biliproteínas son pigmentos de color brillante (rojo, anaranjando, rosa) Presentan una estructura molecular con tetrapirroles (solubles en agua). Existen cuatro tipos principales: Ficocianina, Ficoeritrina, Aloficocianina y Ficoeritrocianina. Presentan fluorescencia, máximo a 570 nm. Su función es la captura de luz (fotosintéticos) (Figura 7).

Todas las algas fotosintéticas contienen clorofilas y carotenoides. Las algas rojas, las algas verde-azules, las Cryptofitas y los Dinoflagelados contienen además biliproteínas. La absorción de la luz por los pigmentos fotosintéticos (clorofilas, carotenoides y biliproteínas) del fitoplancton contribuye a la atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) con la profundidad (Kirk 1994).



**Figura 7.** Absorción de los pigmentos fotosintéticos (Clorofilas, Carotenoides y Biliproteínas) en solvente orgánico. (Modificado de Meneses & Netto 2001).

La presencia de materia orgánica disuelta en el agua provoca profundas modificaciones en los procesos de absorción de la luz en el medio acuático. El máximo de

absorción de agua con materia disuelta ocurre en la región mínima de absorción del agua pura. Es en la región del azul en que se da el mayor contraste de la absorción del agua pura y del agua con altas concentraciones de materia orgánica disuelta. Sus coeficientes de absorción equivalen numéricamente a los coeficientes de absorción del agua pura en el infrarrojo. En la región del verde y rojo ese coeficiente es menor. La presencia de partículas orgánicas e inorgánicas en el agua también aumenta su coeficiente de absorción. Se presentan espectros de absorción similares a los de la materia orgánica disuelta, pero su magnitud es menor, variando entre  $0,3 \text{ m}^{-1}$  a  $1,5 \text{ m}^{-1}$  en condiciones de mayor turbidez.

### 2.4.2.2 Dispersión de la luz

La dispersión de la luz en el medio acuático es estimulada por la propia agua y por las partículas bióticas y no bióticas en suspensión. Las células y colonias del fitoplancton dispersan la luz en función de su forma y tamaño, así como de la presencia de estructuras rígidas de naturaleza calcárea o silíceas. A su vez, pueden contribuir significativamente al comportamiento de dispersión total del medio acuático, pero en una proporción que varía de una especie a otra. Un parámetro utilizado para comparar las tendencias de dispersión de diferentes especies es el coeficiente de dispersión específica  $b_c$  el cual puede ser exhibido por las células suspendidas de especies dadas a una concentración correspondiente de 1 mg de clorofila-a  $\text{m}^{-3}$  (Kirk 1994).

El material particulado presente en la columna de agua posee dos orígenes distintos: biológico y físico. Las partículas de importancia óptica son las bacterias, el fitoplancton y el zooplancton los cuales dan origen a partículas orgánicas en función de su ciclo de vida. Las partículas inorgánicas tienen su origen en el intemperismo de las rocas y suelos, son generalmente las que más afectan las propiedades ópticas del agua.

Las partículas orgánicas ocurren en diversas formas tales como: virus, coloides, bacterias, fitoplancton, detritos orgánicos, zooplancton. Individualmente virus y coloides no son dispersores eficientes de luz, ya que sus dimensiones son menores que las longitudes de onda del visible. Varios estudios muestran que estas partículas, debido a la gran concentración con que se presentan en el agua, contribuyen significativamente para la retro-dispersión. Cabe recalcar que las bacterias presentes con grandes concentraciones en agua natural ( $10^{11}$  a  $10^{13} \text{ m}^{-3}$ ) son los más importantes microorganismos a contribuir para la dispersión por partículas.

El fitoplancton presenta gran diversidad de especies, tamaños, formas y concentraciones. El tamaño de las células puede variar entre 1  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$ . Esas partículas son en general mayores que la longitud de onda y son dispersores eficientes de la luz. Según Kirk (1994) las partículas responsables por la mayor proporción de dispersión en el medio acuático poseen diámetros mayores a 2  $\mu\text{m}$ . Como la dispersión es proporcional también al número de partículas en el medio acuático y para un mismo peso de partículas, a mayor número de partículas pequeñas, en general partículas finas se presentan mayores coeficientes de dispersión.

### 2.4.3 Clasificación óptica de las aguas naturales

La primera clasificación óptica fue propuesta por Jerlov (1976) para aguas oceánicas (tres tipos I, II y III) y aguas costeras (9 tipos). La clasificación encontrada usualmente en el contexto de los sensores remotos es la clasificación dada por Morel & Prieur (1977) y Morel (1980) con dos tipos:

**Aguas Caso 1:** Cuerpos de agua donde el fitoplancton y sus productos derivados (detritus orgánico y sustancia amarilla disuelta, que surgen por el pastoreo del zooplancton o por el decaimiento natural de las células algales) desempeñan un papel dominante en la determinación de las propiedades ópticas. La radiancia medida por sensores remotos es solo dependiente de los pigmentos (clorofilas y productos derivados).

**Aguas Caso II:** Cuerpos de agua donde la contribución importante o dominante para las propiedades ópticas proviene de sedimentos re-suspendidos de la plataforma continental, o de partículas inorgánicas. La radiancia medida por sensores remotos es dependiente de los pigmentos (clorofila y productos derivados) y al menos otro componente ópticamente activo (por ejemplo sedimentos suspendidos, materia orgánica disuelta colorida). En estas aguas el fitoplancton y sus productos derivados pueden o no pueden también estar presentes. En ambos casos la sustancia disuelta amarilla está presente en cantidades variables y también contribuye en la absorción en cantidades significativas.

## 2.5 TELEDETECCION EN AGUAS CONTINENTALES

### 2.5.1 Generalidades

La teledetección ha sido utilizada en estudios relacionados con el agua tanto desde la perspectiva de la hidrología como desde la perspectiva de la ecología acuática. Ambas ciencias tienen en común el estudio de la calidad del agua. Los trabajos desarrollados a partir de los usos de imágenes de satélite para la determinación de la calidad de los recursos hídricos van encaminados a determinar la concentración de clorofila-a, la concentración de materia en suspensión, la identificación y cuantificación de macrófitas acuáticas, la transparencia y temperatura superficial de las distintas masas de agua, especialmente lagos y embalses.

También se tienen trabajos enfocados a la precisión de fenómenos hidrológicos adversos como las sequías y en el caso de las inundaciones, las imágenes procedentes de satélite se restringen a la delimitación del área inundada. Este tipo de datos pueden ser de mucha utilidad considerando escalas espaciales grandes y periodos largos de tiempo (Dominguez Gomez et al. 2011).

### 2.5.2 Tipos de sensores

Los sensores son definidos como dispositivos capaces de detectar y registrar la radiación electromagnética, en determinada banda del espectro electromagnético y generar informaciones que puedan ser transformadas en un producto para su interpretación, en la forma de imagen, gráfico o de tablas (Alves 2001). Generalmente un sistema sensor está constituido por un colector que puede ser un conjunto de lente, espejo o antena y un sistema de registro (detector) que puede ser una película u otros dispositivos y un procesador.

Los sensores son clasificados en dos grupos, los de percepción pasiva y los de percepción activa (Alves 2001):

- Los sensores pasivos son los encargados de obtener información de la energía electromagnética proveniente de fuentes naturales, reflejada por la superficie de la tierra, estos se distribuyen en tres grupos diferentes los fotográficos, los óptico-electrónicos y de antena. En esta categoría se encuentran los sensores ópticos que

operan simultáneamente en varias bandas espectrales del espectro óptico y captan datos con varias resoluciones temporales, espaciales y espectrales. Entre los principales podemos citar a: LANDSAT, SPOT HRV, SPOT, AVHRR, AVIRIS, ASTER, MODIS y MERIS.

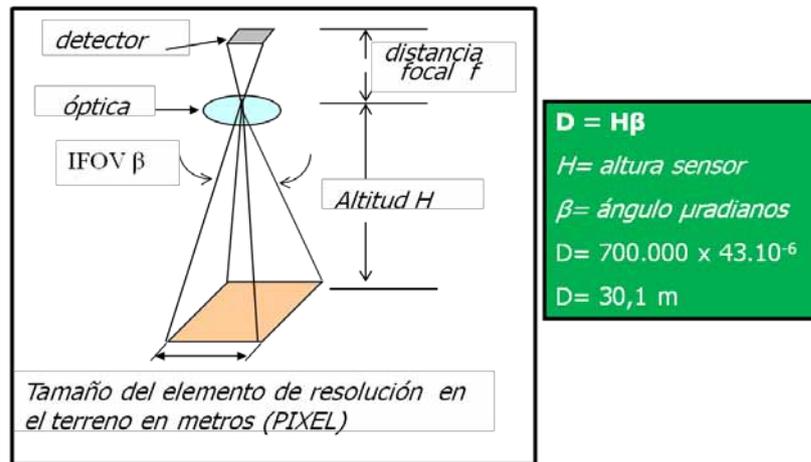
- Los sensores activos poseen una fuente de radiación, es decir no depende de una fuente externa para irradiar el objeto. En este caso, el sensor emite un flujo de radiación en determinada faja espectral que interactúa con los objetos en la superficie de la tierra y la parte que es reflejada es captada por el sensor. Como ejemplo de sistemas activos se tienen a los radares, el laser, radiómetros de microondas y cámaras fotográficas cuando utilizan como fuente de radiación el flash.

Las imágenes de sistemas ópticos y de radar posibilitan la identificación de formas de lagos, a partir de las cuales se pueden deducir sus procesos de origen. Las imágenes ópticas proveen informaciones sobre las características físico-químicas de los objetos, en tanto que las imágenes de radar generan informaciones sobre las características dieléctricas, la textura y la geometría de los objetos (Rosot 2003).

### 2.5.3 Tipos de resolución de las imágenes

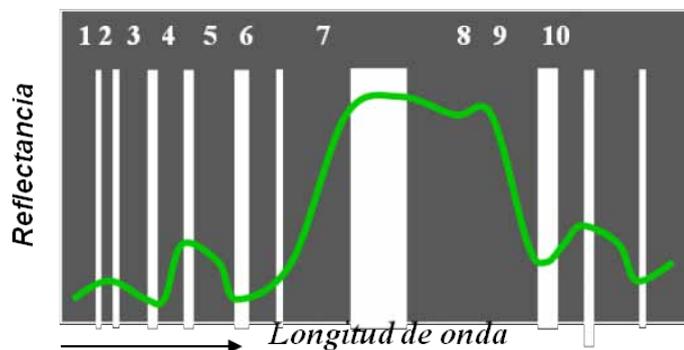
La detección e identificación de un objeto se determina por cuatro tipos diferentes de resolución (Meneses & Netto 2001):

**1) Resolución Espacial** Tamaño del área mínima en el terreno correspondiente a cada elemento en la imagen (Figura 8), puede variar de 1 m hasta 1,1 Km. dependiendo de la plataforma y del sistema sensor. Las características técnicas del satélite determinan su resolución espacial, las cuales definen el grado de detalle con que podemos visualizar una imagen. Para efectos prácticos significa que elementos con tamaños inferiores al del píxel, no son visibles en la imagen. Por definición un objeto solo puede ser detectado cuando el tamaño de ese objeto fuera igual o menor que el tamaño de la resolución espacial de la imagen.



**Figura 8.** Representación de la Resolución Espacial (Modificada de Meneses & Netto 2001)

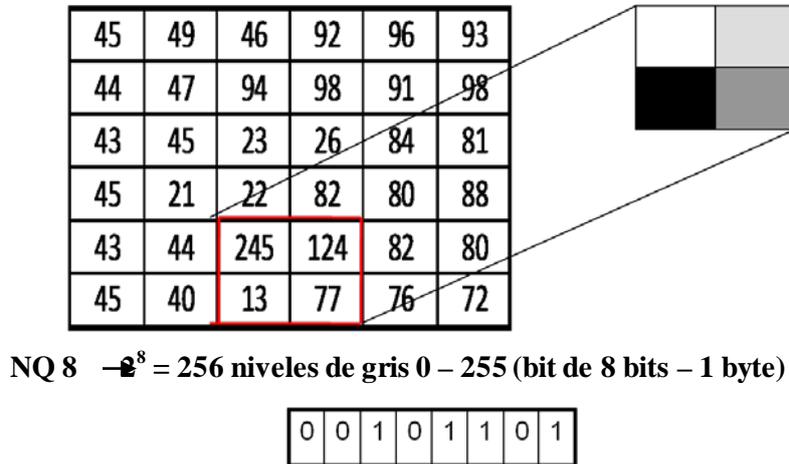
**2) Resolución Espectral** Se refiere al número de bandas espectrales del sistema sensor a ser utilizado que comprende la posición de las bandas en el espectro y el ancho de bandas (Figura 9). Por su parte, el sensor recoge esta energía que le llega de la superficie en varias bandas del espectro de acuerdo a su resolución espectral. Ésta será mayor cuanto más bandas del espectro sea capaz de manejar.



**Figura 9.** Representación de la Resolución Espectral (Modificado de Meneses & Netto 2001)

**3) Resolución Radiométrica** Determina el detalle de la reflectancia de los objetos que son medidos por el sensor. La cuantificación de las imágenes es la medida de la resolución radiométrica, que mide en números digitales (ND) de (0-255, 0-1023, 0-2047). El número digital es el valor en bits (notación binaria) que presenta el pixel en la imagen. Este puede variar de 6 bits ( $2^6 = 64$ ), 8 bits ( $2^8 = 256$ ) conforme al sistema sensor y se expresa en niveles de gris, un número digital alto es mostrado como un pixel con nivel de gris claro y uno bajo

como un pixel oscuro (Figura 10). Por ejemplo, 8 Bits es el nivel de cuantificación (NQ) para imágenes con baja resolución espacial de decenas de metros, tipo LANDSAT: escala de observación regional.



**Figura 10.** Representación de la cuantificación de las imágenes como medida de la resolución radiométrica (Modificado de Meneses & Netto 2001).

**4) Resolución Temporal.** El tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio. En los sistemas orbitales, el retorno del satélite al mismo punto varía de 12 horas a 25 días, conforme el sistema. Cuanto menos tiempo tarde el satélite en pasar por el mismo sitio y captar la misma imagen, mayor resolución temporal tendrá. Esta capacidad de recoger la misma porción de terreno cada cierto tiempo hace de la teledetección una herramienta especialmente interesante para estudios multitemporales y de monitoreo.

### 2.5.4 Uso de las imágenes de satélite en los estudios de las planicies de inundación en la Amazonía

Los estudios en las planicies de inundación del río Amazonas empleando imágenes de satélite y radar fueron desarrollados en varias áreas de investigación. Entre los principales estudios se pueden citar a: Melack (1984) sobre la clasificación de la forma de los lagos en la planicie aluvial del río Amazonas, con imágenes radar (SLAR). França (2005) con su estudio acerca de la influencia de la dinámica estacional del río Amazonas sobre la morfología de los lagos usando imágenes JERS-1/SAR y MODIS. En cuanto al monitoreo de la calidad de agua son importantes los trabajos de Martínez et al. (2003); Martínez et al. (2004); Alcántara

(2007) y Alcântara et al. (2008) usando series de imágenes multitemporales (MERIS, MODIS y LANDSAT) referidos a la concentración de sedimentos. Sobre la dinámica de área y volumen y el mapeo de áreas inundables en la várzea de Curuaí a partir de datos del sensor MODIS se destacan los trabajos de Barbosa et al. (2006) y Freitas & Novo (2005). También se destaca en la misma región el trabajo referido al mapeo de la dinámica de inundación y la distribución de la vegetación usando datos multitemporales de radar (SAR) realizado por Martinez & Le Toan (2007)

Otros estudios específicos en la várzea de Curuai usando imágenes MODIS fueron desarrollados por Novo et al. (2005) y Novo et al. (2006) referidos a la distribución del fitoplancton y de la clorofila-a. Además de un estudio relacionado al impacto de los rebaños sobre el estado trófico en el bajo Amazonas usando imágenes MODIS realizado por Freire (2010).

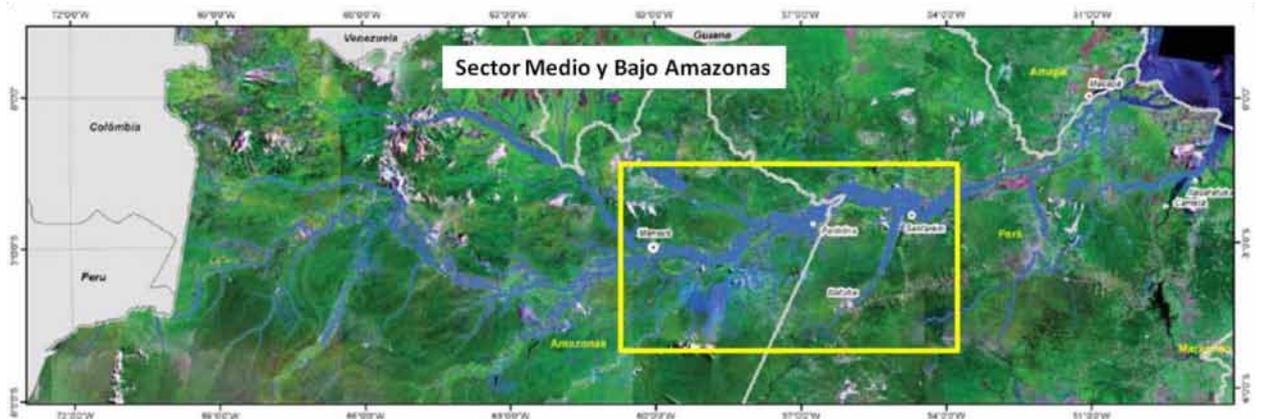
## CAPÍTULO 3.

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 AREA DE ESTUDIO

##### 3.1.1 Cuenca central del río Amazonas

El río Amazonas y sus grandes tributarios son acompañados a lo largo de su trayecto medio y bajo (Figura 11) por grandes planicies de inundación, las cuales cubren un área aproximada de 300 000 km<sup>2</sup> (Irion et al. 1997).

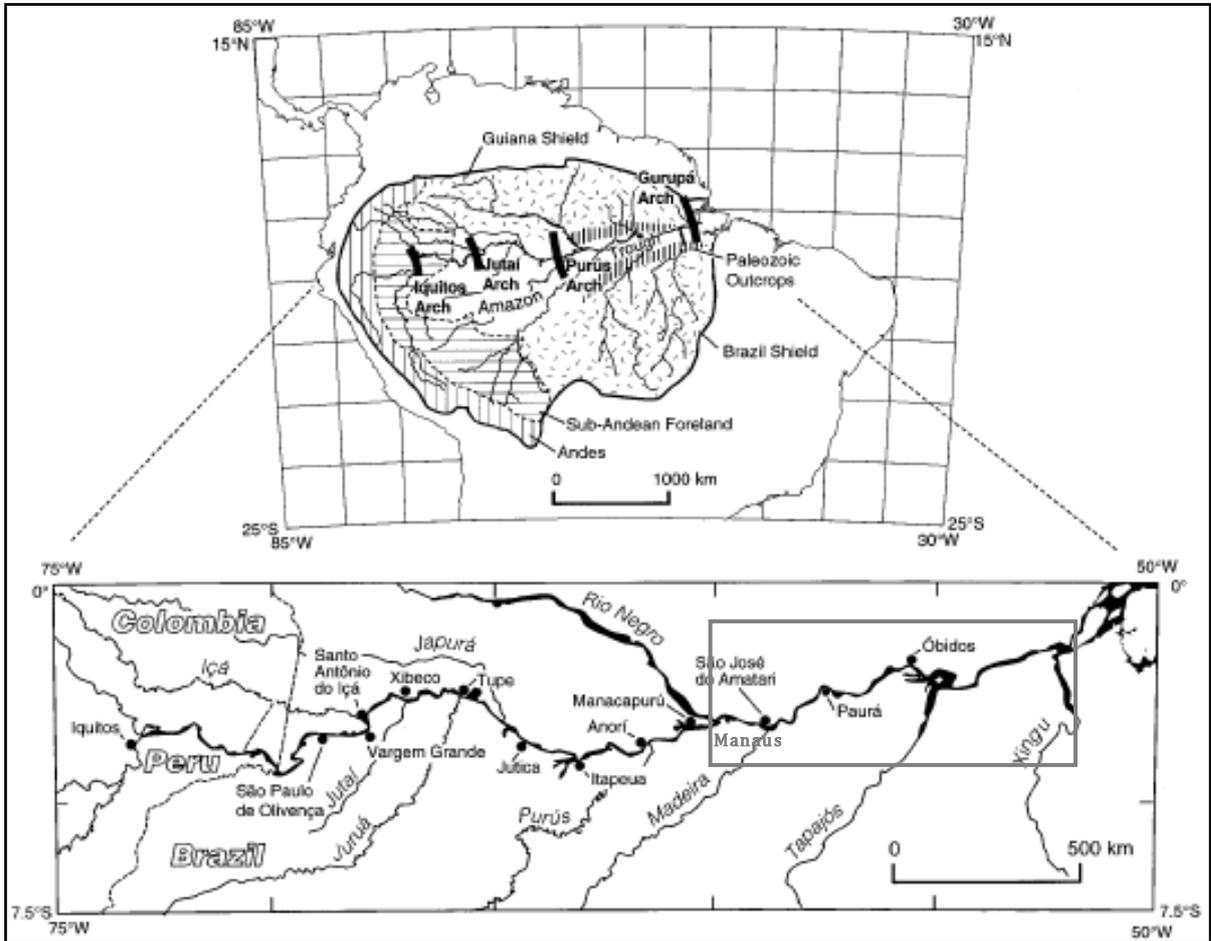


**Figura 11.** Sector medio y bajo del río Amazonas que conforman la cuenca central (Modificado de ProVárzea/IBAMA 2007)

##### 3.1.1.2 Características Geológicas y Geomorfológicas

La morfología de la cuenca amazónica mantiene una directa relación con la geología y la litología. Cerca del límite peruano extendiéndose hasta el océano Atlántico, se presentan las zonas litológicas generales y cuatro arcos estructurales que atraviesan el valle del canal principal del río Amazonas, en intervalos que varían de 600 a 1300 km (Figura 12). La presencia de los arcos en el valle de la Amazonía Central ha sido propuesta para explicar la estratigrafía discontinua a lo largo del curso principal del Amazonas. La estratigrafía está

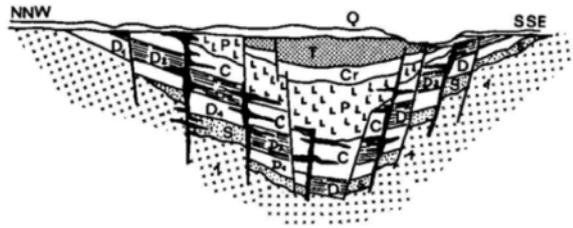
basada en datos de núcleos de sedimentos y estudios sísmicos. La estratigrafía de los depósitos de las cuencas indica que los arcos Jutai y Purus han sido áreas de relieve desde el Paleozoico y los arcos Iquitos y Gurupá fueron los primeros en desarrollarse durante el Mesozoico (Mertes et al. 1996).



**Figura 12.** Mapa (superior) de las zonas litológicas generales y características estructurales en la cuenca Amazónica. La localización aproximada de los cuatro arcos intracratónicos que atraviesan el eje del canal principal del río Amazonas es marcada: De este a oeste, tenemos los arcos Iquitos, Jutai, Purus y Gurupá. Mapa (inferior) de la localización de tributarios del río Amazonas correspondiente a las secciones de los arcos. (Modificado de Mertes et al. 1996)

Según Putzer (1984) cada una de las tres partes de la cuenca del Amazonas (cuenca alta, media y baja) tiene una columna estratigráfica individual debido a su historia paleogeográfica diferente. Tal es el caso, de la cuenca media del Amazonas localizada entre los arcos Purús y Gurupá ubicada desde Manaus hasta la boca del río Xingú (Figura 12), que presenta una estructura de tipo “graben” o fosa tectónica limitada por fallas paralelas levantadas en ambos lados (Figura 13). La cuenca media del Amazonas es una depresión

relativamente estrecha dirigida de oeste a este entre los bordes del escudo de la Guiana en el norte y del escudo central brasilero en el sur (Sioli 1984).



**Figura 13.** Sección transversal tipo “graben” de la cuenca media del Amazonas 1. Precambrico, S. Silúrico, D1.Devoniano (Formación Maecurú), D2. Devoniano (Formación Curuá), C. Carbonífero, P. Pérmico (Formación Nova-Olinda), CR. Cretáceo, T. Terciario, Q. Cuaternario. (Fuente: Putzer 1984).

El transporte y distribución de sedimentos derivados de la erosión de los Andes a través del paisaje cratónico de Brasil, ha causado el desarrollo de una tendencia aguas arriba y aguas abajo en el carácter geomorfológico e hidrológico del sistema canal-planicie de inundación. Las planicies de inundación del Amazonas son complejos mosaicos de lagos y depósitos de lagos, canales, “scroll bars” (barras de desplazamiento) y depósitos fluviales “overbank”. Los sectores localizados aguas arriba se caracterizan por la erosión sedimentaria que se produce en el canal principal y por la deposición en los canales de la planicie de inundación. Esta deposición y la migración de los canales desencadenan un proceso de colmatación de los lagos de tipo “oxbows” (meandros de un río), produciendo una topografía de tipo “scroll-bar” que forma los límites de centenas de lagos estrechos y alargados. En estos sectores la planicie es más grande, los lagos son pequeños y se encuentran en estrechas depresiones entre los “scroll-bars”. Por otra parte, los sectores localizados debajo de la confluencia con el Río Madeira presentan canales de estabilización antigua, diques marginales y una planicie de inundación dominada por la deposición fluvial (“overbank”). Esta deposición encubre los “scroll-bars” formando una planicie de inundación plana cubierta por un mosaico de lagos grandes, superficiales y homogéneos. Los mayores lagos ( $\pm$  65 km de ancho) se encuentran aguas abajo de la estación de Óbidos (Mertes et al. 1996).

El número de lagos también es irregular, estos aumentan en los sectores próximos a la confluencia del río Madera con el río Amazonas y disminuyen en los sectores próximos a la confluencia del río Tapajós con el río Amazonas. Aguas arriba desde Vargem Grande hasta Jutica, el gradiente del canal aumenta ligeramente provocando erosión y la sinuosidad del río en estos sectores es menor. Como resultado de la rápida migración del canal, los lagos e islas

son pequeños, estrechos y alargados. En los sectores intermedios del río Amazonas, entre Itapeuá y San José do Amajari, se observan características de los sectores aguas arriba y aguas abajo, tornándose el río más recto y su valle estrecho. La migración del canal es lenta, la proporción del área de la planicie cubierta por los ‘scroll-bars’ es menor y las islas son más largas. Los lagos de tipo “scroll” se mezclan con lagos grandes redondeados. A medida que el río decrece ocurre una regular y consistente deposición de arena. De la región de San José do Amajari hasta la confluencia del río Tapajós, el río Amazonas es relativamente recto y migra lentamente comparado con los sectores localizados aguas arriba (Mertes et al. 1996).

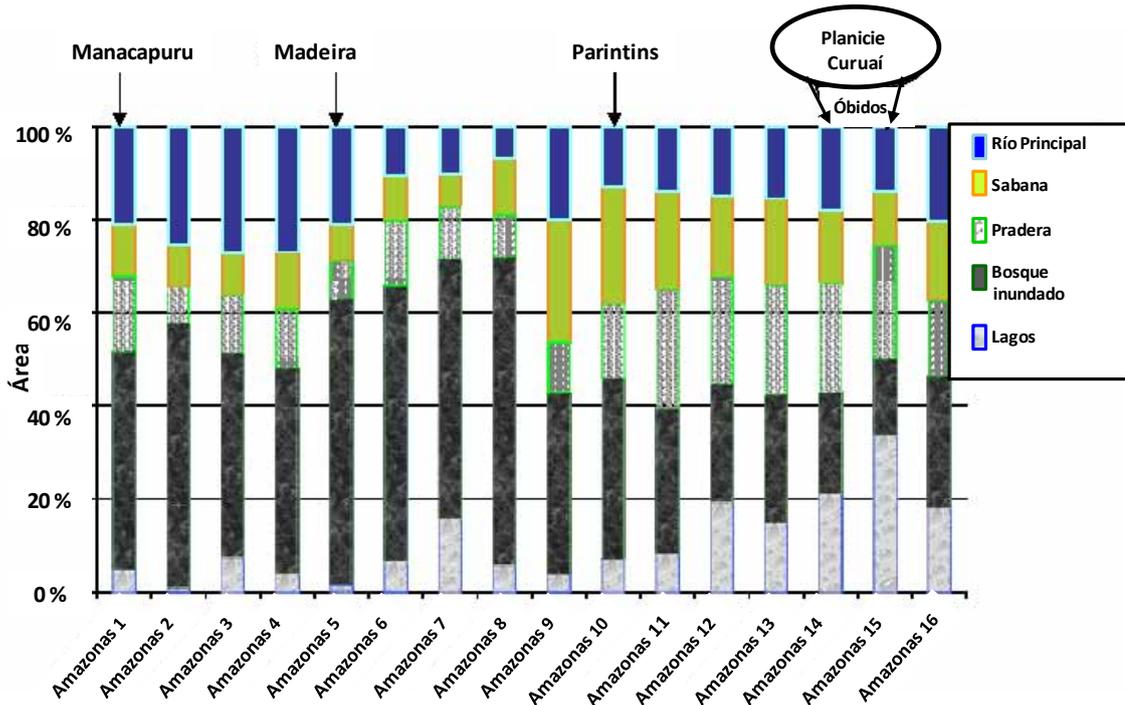
Las planicies de inundación denominadas localmente “Várzeas” e “Igapós” son mosaicos a pequeña escala de diferentes elementos estructurales de origen fluvial. La formación de estos sistemas, está fuertemente relacionada a las fluctuaciones del nivel del mar durante el Pleistoceno y es un resultado directo de los cambios climáticos globales. Debido a la baja elevación de la cuenca amazónica (> 1.000.000 km<sup>2</sup> a 100 m bajo el nivel del mar actual), las variaciones del nivel de mar originaron alternadamente una incisión en los sectores medio y bajo Amazonas y sus tributarios, durante periodos de bajo nivel del mar o un bloqueo de las inundaciones cuando el nivel del mar fue alto (Irion et al. 1997).

La várzea en el Amazonas es usualmente considerada una planicie de depósito Holoceno (Klammer 1984). En la várzea, los grandes lagos están permanentemente conectados con los ríos principales a través de largos canales profundos llamados “furos”. Estos canales permiten encontrar niveles de agua en los lagos, excepto durante el periodo extremo de aguas bajas. Los lagos pequeños pueden conectarse con el río solamente en máximas inundaciones y mantener constante los niveles de agua. A orillas de la várzea, en tierra firme, los lagos son dendríticos bifurcados con bancos inclinados denominados “Ria lagos” ó “Lagos de tierra firme”. Los grandes canales o “paraná” frecuentemente recorren cientos de kilómetros en tierra firme transportando el agua que fluye, a través de numerosos afluentes hacia el río Amazonas y la planicie de inundación (Irion et al. 1984).

### **3.1.1.3 Dinámica hidrológica y zonas de inundación**

Todos los grandes ríos de la Amazonía están sujetos a grandes fluctuaciones del nivel de agua debido a las marcadas diferencias en la precipitación durante las estaciones seca y húmeda en sus áreas de captación. La estación de lluvias comienza en periodos diferentes y su distribución es heterogénea en la Amazonía. Los tributarios localizados en la región sur como

los ríos Purús y Madera crecen primero, llegando al pico de inundación en los meses de marzo a abril, mientras que los tributarios localizados al norte como los ríos Negro y Branco, alcanzan su mayor nivel de agua en los meses de Junio a Julio. De igual manera, el río Amazonas alcanza su máximo nivel en los meses de Mayo a Junio. En muchos de los casos, los patrones de inundación siguen una curva sinoidal indicando el desarrollo de los periodos terrestre y acuático en las planicies de inundación. A su vez, la amplitud varía en un rango extenso en diferentes ríos y en diferentes partes del mismo río (Junk 1984).

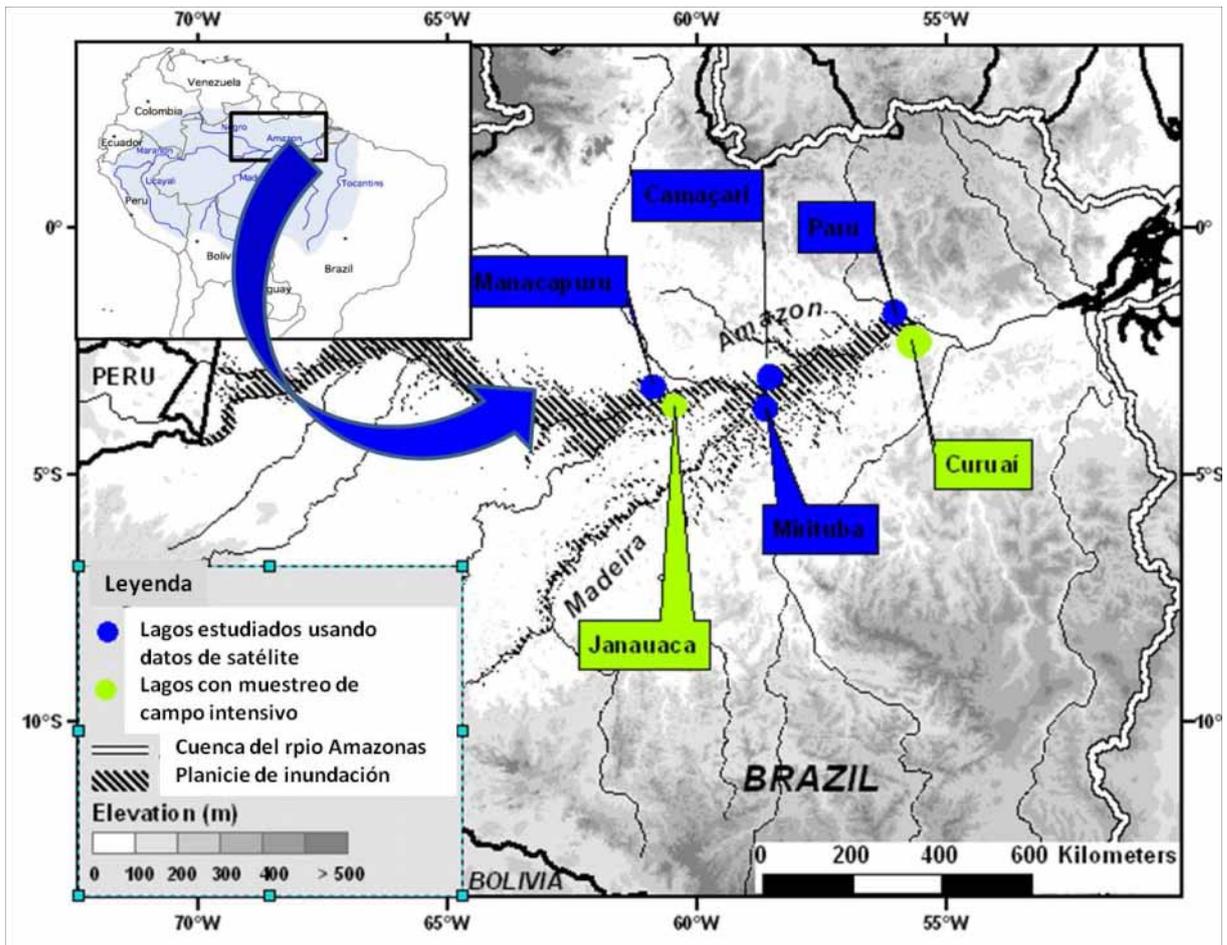


**Figura 14.** Distribución de las planicies de inundación y áreas de vegetación (% km/sector) para 650 km en el Río Amazonas entre Manacapuru y Santarém. La extensión de las várzeas y las clases de vegetación fueron cartografiadas usando una imagen SAR, en periodos de aguas altas y bajas. Las cinco clases de áreas presentaron tres tipos de vegetación: Vegetación inundada, sabana y pradera; y dos clases de cuerpos de agua permanentes: lagos de várzea y el canal principal del río. (Modificado de Maurice-Bourgoin et al. 2007).

La región del río Amazonas comprendida entre Manacapuru y Santarém fue dividida en 16 sectores por Maurice-Bourgoin et al. (2007), los cuales representan una alta heterogeneidad en las características geomorfológicas de las várzeas o planicies de inundación localizadas a lo largo de este trayecto (Figura 14). Estos autores observaron que en Parintins, aguas abajo de Santarém se produce una disminución significativa (50 a 20%) del área de vegetación inundada y un aumento de las áreas de lagos permanentes (de 5 a 20%).

### 3.1.2 Planicies de inundación estudiadas

El área de estudio comprende dos várzeas y cuatro lagos ubicados en la región central de la Amazonía brasilera (Figura 15). La várzea de Curuai es la planicie de inundación más representativa y extensa de la región, constituye el área de referencia para este estudio, puesto que, se dispone de información correspondiente a diez años en diferentes áreas de investigación. La várzea de Janauacá, es una planicie de inundación menor y de características diferentes, en relación a la anterior y se cuenta con información disponible sobre esta várzea desde el año 2007. Los otros lagos considerados en este estudio son: el lago Manacapuru próximo a la várzea de Janauacá, el lago Paru próximo a la várzea de Curuai, y los lagos Camaçari y Mirituba próximos entre sí. La información sobre estos lagos será generada en este estudio.



**Figura 15.** Localización de la Várzea de Curuai, Várzea de Janauacá y de los lagos próximos Manacapuru, Paru, Camaçari y Mirituba en la Amazonía Central Brasilera.

### 3.1.3 Várzea de Curuaí

La várzea de Curuaí enmarcada entre los 01° 50' y 02° 15' S y los 55° 00' y 56° 05' O, está localizada en la planicie baja del río Amazonas, a una distancia de 850 km del Océano Atlántico (Moreira-Turq et al. 2004). El área ocupada por esta várzea es compartida por tres municipios: Óbidos, Juruti y Santarem, que corresponden al Estado de Pará (Figura 21 a). Esta planicie está delimitada al norte por el río Amazonas y al sur por áreas de tierra firme y se caracteriza por presentar mayormente lagos de aguas blancas (Figura 16).



**Figura 16.** Vista de la Várzea de Curuai. Estación (A02) en el Lago Grande de Curuaí, lago de aguas blancas (Campaña de Octubre-2008).

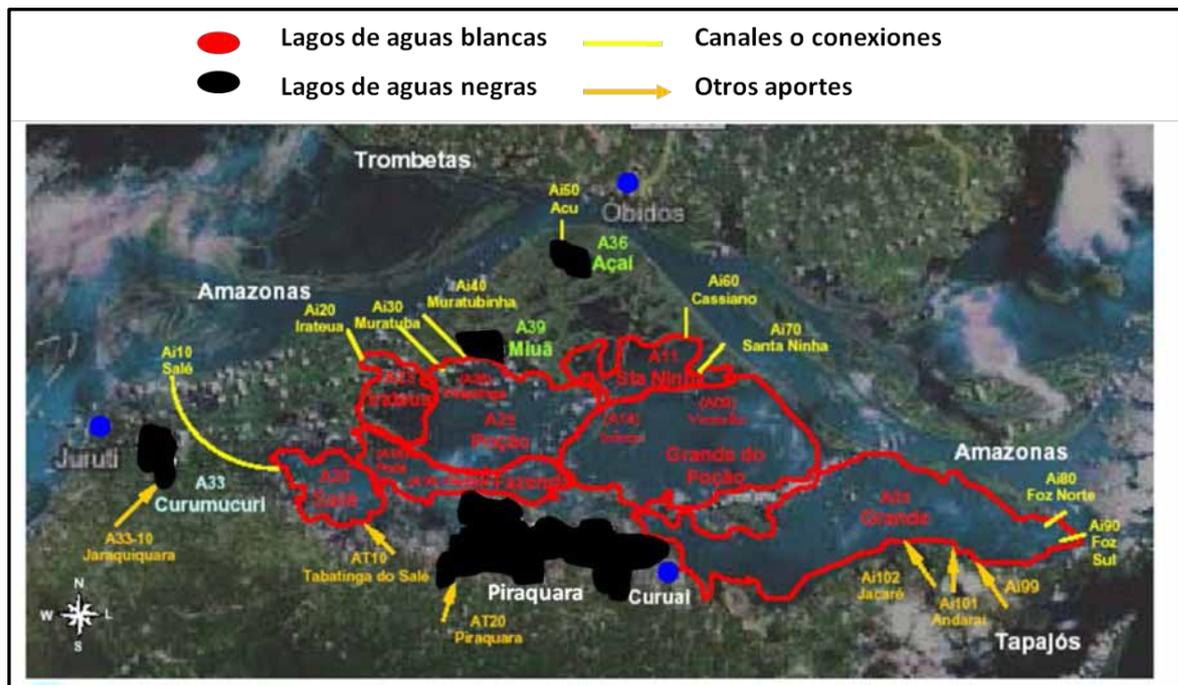
#### 3.1.3.1 Características Climáticas

El clima es tropical húmedo, la precipitación es claramente periódica, con una estación de lluvias que se presenta de diciembre a abril alternada claramente con una estación seca que se extiende de mayo a octubre. Entre octubre y diciembre se registra un periodo de lluvias corto que abarca algunos días o pocas semanas. La precipitación media anual es de 2400 mm,

el valor máximo es observado entre los meses de febrero a abril y la media de evapotranspiración es de 1400 mm. La temperatura media anual varía de 25 a 28 °C con una humedad relativa registrada de 86% (Kosuth 2002).

### 3.1.3.2 Caracterización de los lagos de la várzea de Curuai y principales conexiones

La várzea de Curuai está formada por más de 20 lagos, los cuales mayormente son de aguas blancas aunque también presenta algunos lagos de aguas negras (Sioli 1984). Estos lagos (Figura 17) se encuentran conectados entre sí temporalmente y otros se encuentran conectados de forma permanente al río principal, por pequeños canales (Bonnet et al. 2008).



**Figura 17.** Caracterización de los lagos de la várzea de Curuai y principales igarapés o canales de conexión. Modificado de Perez (2008)

- **Lagos de aguas blancas**

Los lagos de aguas blancas y sus principales conexiones en la várzea de Curuai son presentados en la Figura 17 y se describen a continuación. El lago Salé se encuentra en la región oeste de la várzea, está rodeado por vegetación tropical, recibe continuamente las

aguas del río Amazonas por el canal o Igarapé de Salé (Bonnet et al. 2008; Amorim et al. 2009) que presenta una longitud de más de 30 Km, el más largo de toda la várzea. También recibe las aguas del Lago Curumucurí, un lago de aguas negras y de la cuenca de drenaje en tierra firme por el canal AT10 (Perez 2008).

El lago Santa Nina se encuentra en la región norte de la várzea, está delimitado por vegetación tropical al norte y al sur. Limita al sudoeste por los lagos Inferno y Vermelho pertenecientes al sistema del Lago Grande do Poçã (Perez 2008). Este lago se encuentra en contacto permanente con el Río Amazonas, mediante igarapés o canales de conexión: Igarape de Cassiano e Igarape de Santa Nina los cuales son relativamente cortos (Bonnet et al. 2008; Amorim et al. 2009). Este lago, además presenta altos niveles de sedimentos finos en suspensión procedentes del Amazonas (Moreira et al. 2009; Cordeiro et al. 2008).

El lago de Poçã presenta dos canales de conexión temporal con el río Amazonas durante el periodo de aguas altas: el Igarape Muratuba y el Igarape Muratubinha (Bonnet et al., 2008) más próximos al lago Piripitinga. El lago Poçã junto con el lago Grande do Poçã presentan la segunda mayor área inundada. Ambos son lagos de grandes dimensiones y se encuentran en el camino de desagüe de la várzea hacia el río Amazonas. (Amorim et al., 2009). El lago da Fazenda es un lago mayor formado por el lago da Porta y el lago da Piedade. Este complejo mayor está delimitado entre el lago do Poçã al norte y los lagos de Salé e Irateua al oeste (Perez, 2008). Este último se conecta al Río Amazonas por el canal o Igarape Ai20 (Bonnet et al. 2008).

El lago Grande de Curuaí se extiende en la región este de la várzea, recibe las aguas del Río Amazonas a través de dos canales permanentes Foz norte y Foz sur. Representa la mayor entrada de aguas durante la época de crecida (Diciembre hasta Mayo) y la mayor salida durante la época de descenso (Julio hasta Octubre). Es un sistema diferente al Lago Grande del Poçã. Presenta la mayor área inundada de la várzea, con una longitud de 50 Km (Amorim et al. 2009).

- ***Lagos de aguas negras***

Los lagos de aguas negras en la várzea se Curuaí presentados en la Figura 17 se describen a continuación. El lago Curumucuri está localizado al sudoeste de la várzea, representa el menor cuerpo de agua y también la menor área inundada (Martinez & Le Toan

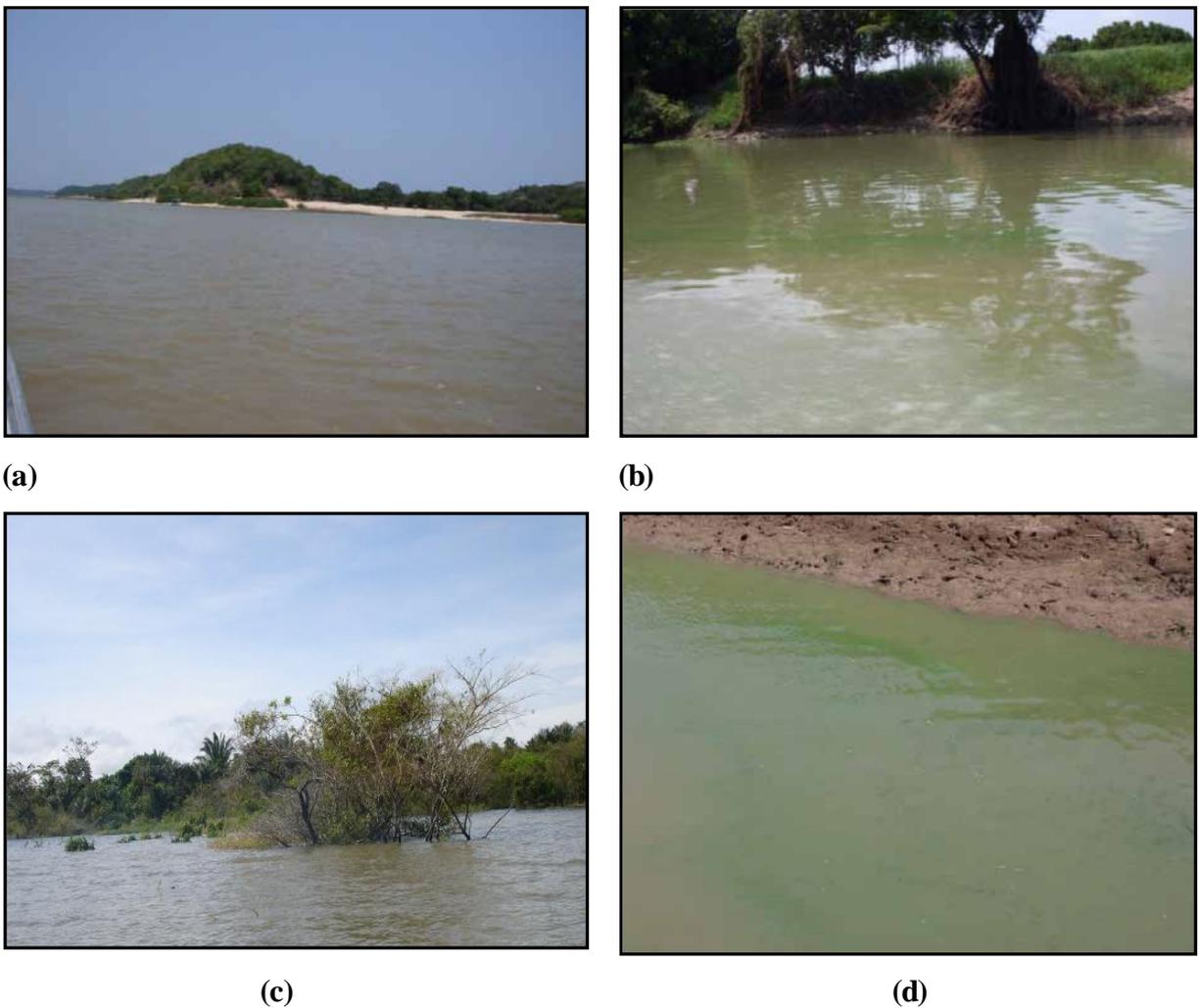
2007). Este lago se encuentra rodeado por vegetación tropical, presenta un canal de conexión entre el Río Amazonas y el lago de Salé, sin intercambio significativo de agua entre los dos lagos. Las aguas de este lago ya diluídas con las del río Amazonas desembocan en el lago de Sale (Perez 2008). Además, el lago Curumucuri se caracteriza por presentar los menores niveles de materia en suspensión, así como aguas muy ácidas y una elevada concentración de carbono (Amorim et al. 2009). Los lagos Açai y Miuã se encuentran al norte de la várzea, son lagos pequeños casi próximos. Solo el primero presenta un canal de conexión con el río Amazonas. Las aguas de estos lagos son más ácidas, presentan una elevada concentración de carbono y bajos niveles de materia en suspensión. Sin embargo, en periodo de aguas altas ambos lagos son influenciados por las aguas del río Amazonas, presentando una mezcla entre sí o muchas veces solo características de aguas blancas (Perez 2008; Amorim et al. 2009). El lago Piraquara está localizado al sur de la várzea, rodeado mayormente por vegetación tropical como bosque denso. Es un lago de tierra firme abastecido por agua de lluvia (Martinez & Le Toan 2007), presenta un canal o igarapé Piraquara AT20 procedente de la cuenca de drenaje (Perez 2008).

### 3.1.3.3 Vegetación

La vegetación característica de la várzea depende de la periodicidad de inundación. En periodo de aguas bajas las áreas de inundación son cubiertas por gramíneas y en el periodo de aguas altas por vegetación de tipo macrófitas, alcanzando su punto máximo entre los meses de mayo y julio (Junk & Piedade 1997; Piedade et al. 2010). Al mismo tiempo, se presentan sabanas o grandes prados de arenas blancas, muy pobres en nutrientes llamadas regionalmente *catinga* o algunas veces *campina* o *campinarana*. En general, se encuentran cubiertos por gramíneas y árboles aislados, rodeados por bosques de galería a lo largo de los canales y lagos (Figura 18 a). Los bosques localizados en la planicie son regionalmente conocidos como *bosques de várzea*, (Figura 18 b) cuando las inundaciones son muy frecuentes estos son llamados *bosques de igapó*, (Figura 18 c) constituyendo el principal paisaje en la planicie de inundación (Murça Pires 1984; Martinez & Le Toan 2007).

Dentro de las macrófitas se tienen formaciones de vegetación menor, referidas a formaciones pioneras que consisten en densos parches interconectados a la sabanas y áreas de bosque aluvial, compuestos por vegetación herbácea y leñosa menor a 1 m. Dentro de estas

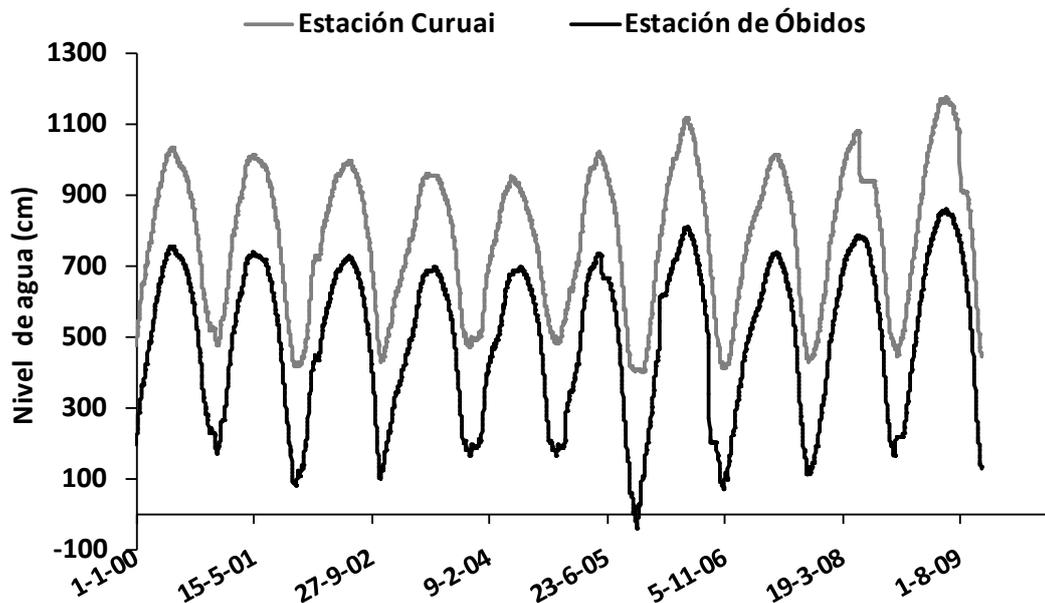
formaciones se destacan especies perennes como *Paspalum repens* P. J. Bergius y *Echinochloa polystachya*(H.B.K.) Hitchcock, adaptadas a la transición de las fases terrestre a la acuática, creciendo rápidamente cuando el nivel del agua sube en la fase de inundación (Junk 1984; Martinez & Le Toan 2007). Dependiendo de la dinámica hidrológica de la várzea se presentan extensas floraciones fitoplanctónicas (Figura 18 d) predominantes durante el pico de inundación y en el comienzo de la época seca (aguas altas). También es predominante el perifiton durante este periodo (Piedade et al. 2010). Las macrófitas flotantes compiten con el fitoplancton por nutrientes y luz. Sin embargo, la mayor producción primaria deriva de las macrófitas (Williams 1987).



**Figura 18.** Vegetación característica de la várzea de Curuai (a) Vegetación tipo Sabanas o Catinga. (b) Bosque de Várzea (c) Bosque de Igapó (d) Floraciones fitoplanctónicas.

### 3.1.3.4 Dinámica hidrológica

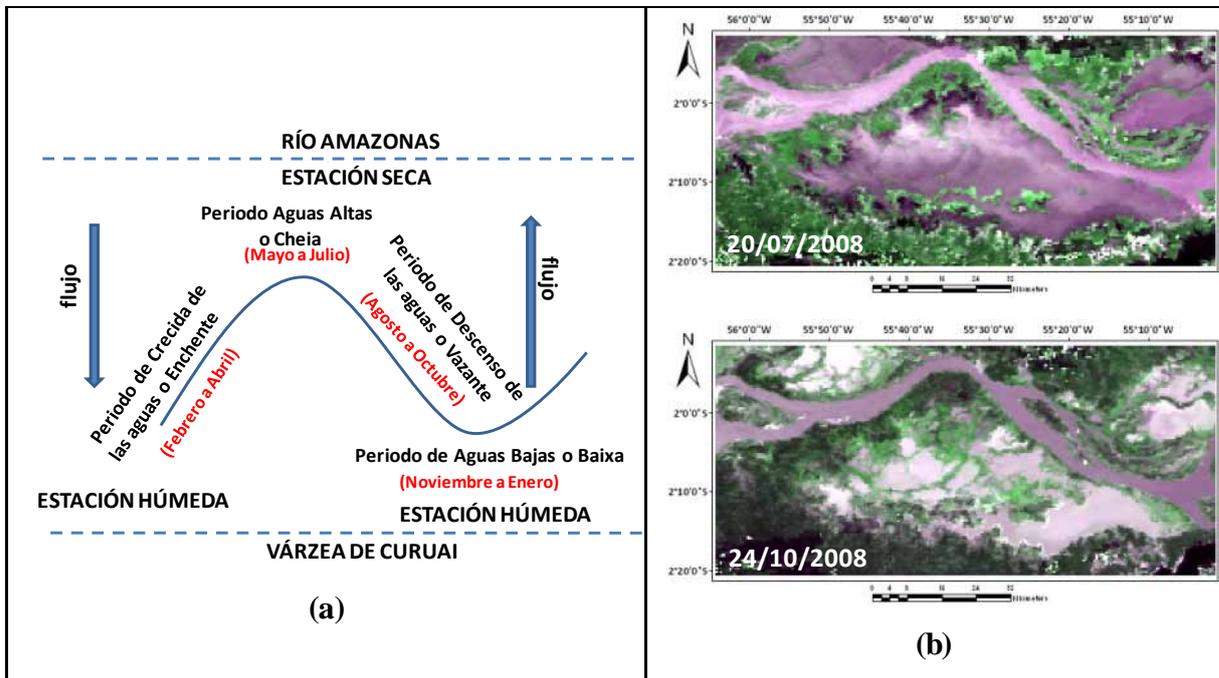
La variación anual del nivel de agua en la várzea de Curuai (Figura 19) sigue las fluctuaciones del Río Amazonas (Bonnet et al. 2008). De esta manera, las aguas provenientes del río y los aportes de las cuencas de drenaje de tierra firme, constituyen las principales fuentes de agua para esta planicie. Se estima que entre el 70 y 90% del agua que ingresa a la várzea, proviene del río Amazonas, mientras que los otros aportes constituyen solo un 5%.



**Figura 19.** Variaciones del nivel de agua del río Amazonas en la estación de Óbidos comparada con las variaciones en la várzea de Curuai (2000-2009).

El periodo de aguas bajas ocurre en los meses de noviembre a enero (estación húmeda), el periodo de crecida de las aguas va de febrero al mes de abril. El almacenaje del agua en la planicie de inundación concluye en los meses de mayo a julio, correspondiendo a la estación seca. El tiempo de residencia del agua en la planicie varía de 3 y 5 meses (Bonnet et al. 2008). Así el nivel máximo o pico de inundación ocurre entre mayo a junio y el mínimo entre noviembre y diciembre (Moreira-Turq et al. 2004) durante la estación húmeda (Figura 20 a y b). En general la entrada de las aguas del río Amazonas a la várzea tiene lugar de febrero a abril (periodo de crecida). Adicionalmente, varios estudios demostraron que la planicie también representa una fuente de agua para el río Amazonas cuya exportación de las aguas de la várzea al río fue registrada en el periodo de descenso de las aguas (agosto-

octubre) a través de los canales de flujo permanente Foz norte y Foz sur localizados al este de la várzea (Moreira Turcq et al. 2005; Maurice-Bourgoin et al. 2007; Perez 2008) (Figura 20 a y b).



**Figura 20.** (a) Dinámica hidrológica de la várzea de Curuaí. (b) Imágenes color real (RGB) de los periodos de aguas altas (Julio 2008) y descenso de las aguas (Octubre 2008).

En la región amazónica, Maurice-Bourgoin et al. (2007) determinaron que esta várzea corresponde al 13 % del total del área de inundación del río Amazonas entre los sectores de Manacapuru (Amazonas 1) y Óbidos (Amazonas 14 y 15) (Figura 14). De acuerdo con Martinez & Le Toan (2007) la várzea de Curuaí es una de las planicies más extensas y representativas de la región baja del río Amazonas, con una mayor área superficial de lagos permanentes y una menor área de vegetación inundada. Según los mismos autores, esta área varía entre 1340 y 2000 km<sup>2</sup> durante los periodos de aguas bajas, pudiendo alcanzar en aguas altas hasta 3600 km<sup>2</sup> con la vegetación inundada en periodos de inundación extrema.

### 3.1.3.5 Estaciones de muestreo

La várzea de Curuaí fue dividida en tres regiones: Una región influenciada directamente por el río Amazonas, una región central y una región que se encuentra al este de la várzea, estas dos últimas constituyen una región de aguas permanentes y de gran extensión

(Figura 21b). En la región influenciada directamente por el río Amazonas, se seleccionaron los lagos: Santa Nina con la estación de muestreo A11 y el lago Salé con la estación A20. La región central comprendió dos lagos: el lago Grande do Poção, con las estaciones A08, A09 (lago Vermelho) y A14 (lago Inferno) y el lago Poção, un poco más al oeste (centro-oeste) con las estaciones A24 (sur) y A25 (norte). En la región este de la várzea representada por el lago Grande de Curuai fueron seleccionadas cuatro estaciones de muestreo, las estaciones A01 y A02 próximas a los canales Foz norte y Foz sur que tienen relación con el río Amazonas temporalmente y las estaciones A03 y A05 que se encuentran en la parte central de este lago (Figura 21 b). Cabe recalcar que las estaciones de muestreo fueron determinadas en las campañas realizadas por el proyecto HYBAM (Hidrología y Geoquímica de la Cuenca Amazónica), entre los años 1999 y 2000 incrementando en número en las campañas posteriores hasta 2005.

### **3.1.4 Lago Paru**

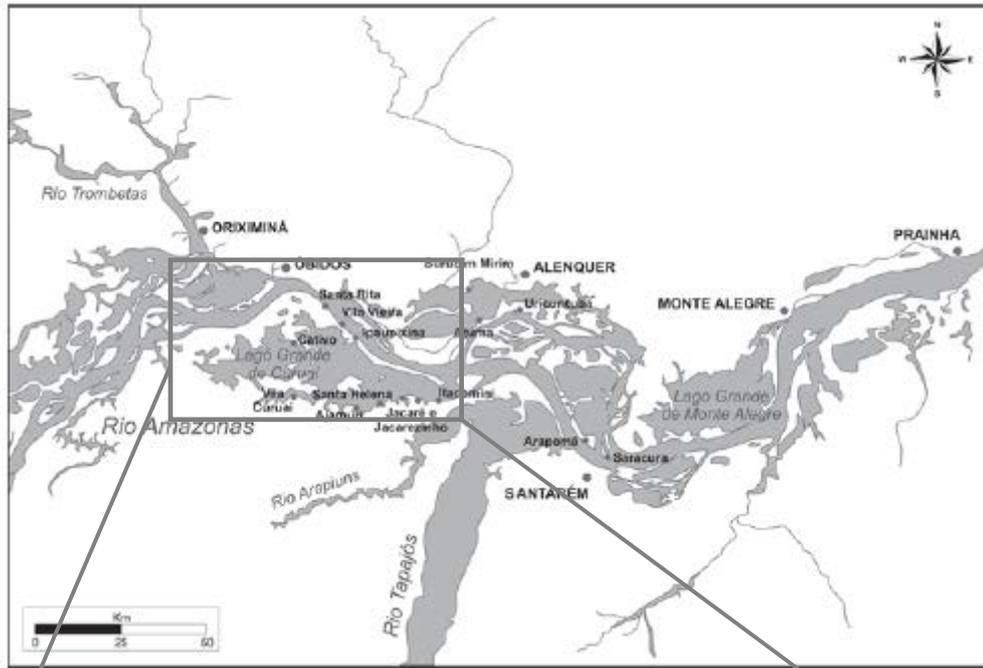
El Lago Paru es un lago de aproximadamente 200 km<sup>2</sup>. localizado entre los municipios de Oriximiná y Óbidos. Se encuentra limitado al sur y al oeste por el río Amazonas y al este por el río Trombetas (mezclado aún con un brazo del Amazonas) A su vez este lago se encuentra en la región ubicada al noroeste en relación con la várzea de Curuai, separado de esta várzea por el río Amazonas (Figura 21 a).

#### **3.1.4.1 Dinámica hidrológica**

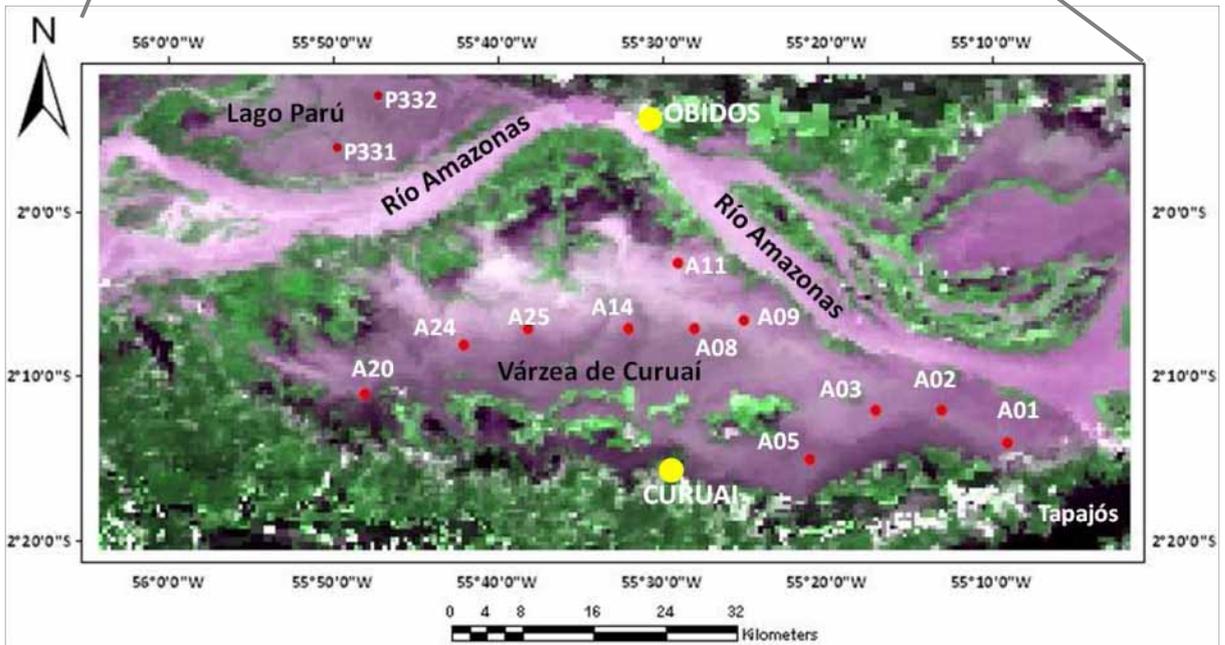
El lago Paru es un lago de aguas blancas influenciado por el río Amazonas en la región sur del lago principalmente en el periodo de aguas altas, durante el cual se encuentra completamente inundado (Figura 20 a). También se encuentra influenciado por el río Trombetas, de aguas negras en su sector este, pero esta influencia es menor. Durante el periodo de aguas bajas el lago se encuentra desconectado de ambos ríos (Figura 20 b).

#### **3.1.4.2 Estaciones de muestreo**

En este lago fueron seleccionadas 2 estaciones de muestreo (Figura 21 b) debido al tamaño menor del lago, estas estaciones abarcan dos sectores principales. El sector próximo a la conexión con el curso principal del Río Amazonas localizado al sur del lago representado por la estación Paru 1 (P331) y el sector central representado por la estación Parú 2 (P332).



(a)



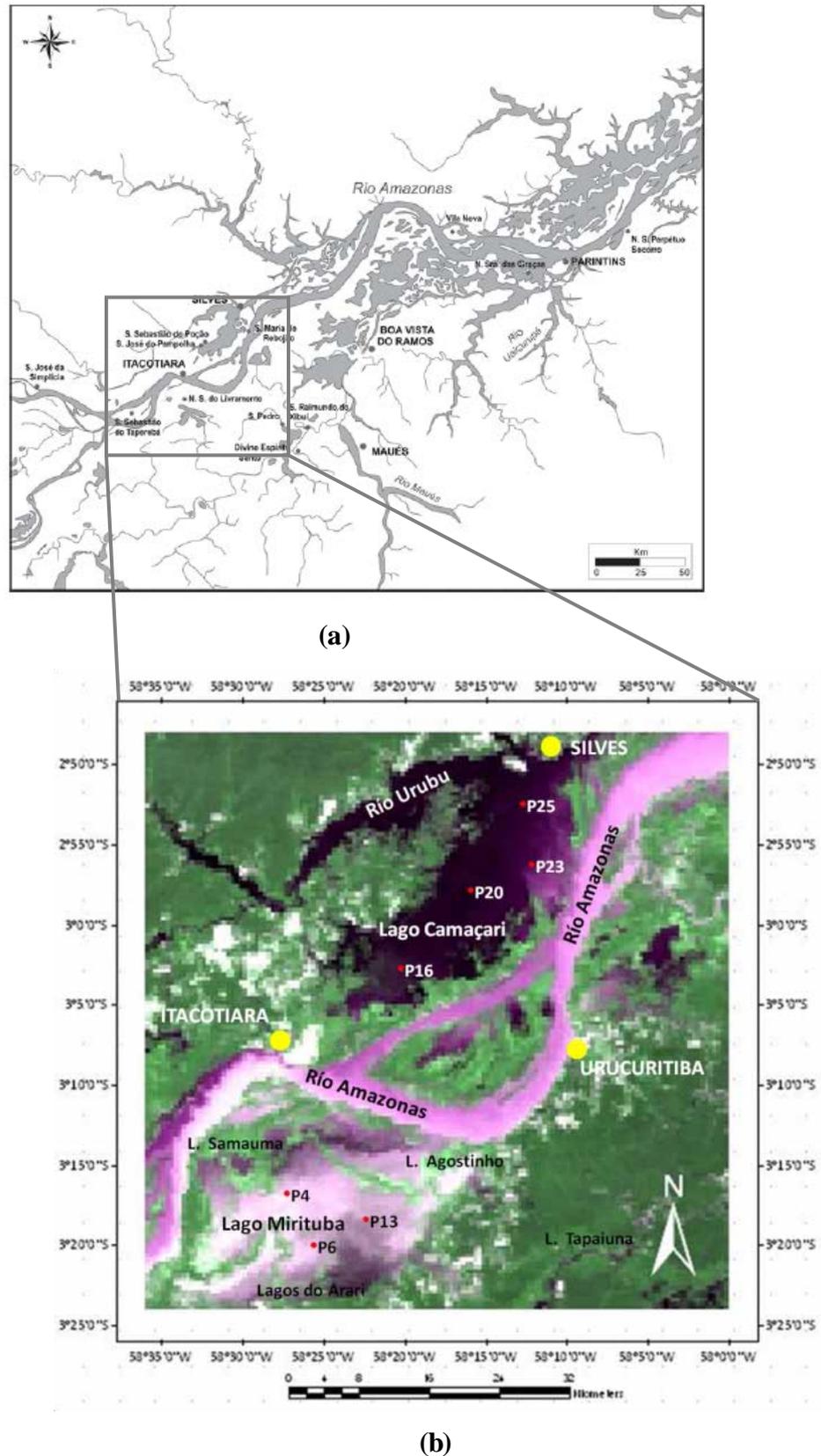
(b)

**Figura 21.** (a) Localización de la várzea de Curuai y del lago Paru en la región central de la Amazonía brasilera. Fuente: ProVárzea/IBAMA (2005). (b) Ubicación de las estaciones de muestreo en la várzea de Curuai y en el lago Paru.

### 3.1.5 Lagos Camaçari y Mirituba

El lago Camaçari posee aproximadamente 40 km de extensión y una media de 15 km de ancho, constituyendo un área total aproximada de 600 km<sup>2</sup>. Este lago deriva del Río Urubu y su área es compartida por el Municipio de Silves en un 90% y por las áreas pertenecientes a Itacoatiara en un 10%. Este lago limita al norte con el lago de Sacará donde se encuentra la Isla de Silves, que también es bañada por el río Urubu, al este limita con un inmenso banco de arena que lo separa del río Amazonas y al oeste con una pequeña península de suelo arcilloso e islas localizadas en el margen derecho del río Urubu (Figura 22 a). Este lago puede ser comparado a una gran cuenca, con una profundidad que varía entre 3 m y 15 m durante el periodo de aguas bajas y el periodo de crecida de las aguas, respectivamente (Ferreira de Faria 2010).

El lago Mirituba tiene un área aproximada de 400 km<sup>2</sup> en plena inundación, pero llega a secarse casi totalmente en el periodo de estiaje. El lago Mirituba está localizado en el margen derecho del río Amazonas, al sur del Lago Camaçari, separado de este lago por un área extensa que comprende el curso principal del río Amazonas. Se encuentra frente a la población portuaria de Itacoatiara (Figura 22 a). Está limitado por lagos menores, al norte limita con los lagos Samauma y Agostinho, al noreste con la margen del río principal y la población de Urucurituba, al sur con los lagos de Arari, al sureste con el lago Tapaiuna y al oeste con el río Amazonas (Figura 22 b). Este lago está influenciado principalmente por aguas blancas aunque sectores reducidos del lago presentan también influencia de aguas negras provenientes de los lagos circundantes.



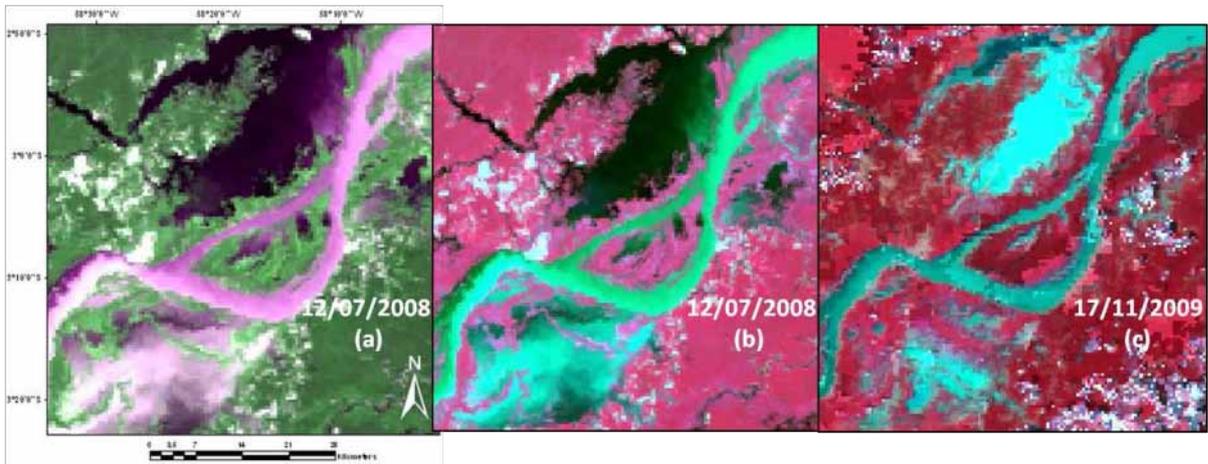
**Figura 22.** (a) Localización de los lagos Camaçari y Mirituba en la región central de la Amazonía brasilera. Fuente: ProVárzea/IBAMA (2005). (b) Ubicación de las estaciones de muestreo en los lagos Camaçari y Mirituba.

### 3.1.5.1 Dinámica hidrológica de los lagos Camaçari y Mirituba

La red hidrográfica del Municipio de Silves está constituida por los ríos Amazonas, Urubu, Anebá, Itapaní, Uatumã, Sanabaní, además de los igarapés de Piramiru, Liberato y Maraquará, presentando los tres tipos de ríos existentes en la región: ríos de aguas claras (río Sanabaní), ríos de aguas blancas (río Amazonas) y ríos de aguas negras (río Urubu). La ciudad de Silves que se encuentra en una isla elevada, está localizada en el margen izquierdo del río Amazonas, separando el río Urubu del lago Camaçari, esta región se caracteriza por la presencia de tierras bajas y áreas de várzea inundables, presentando las dos estaciones típicas de la región amazónica, estación de aguas altas que ocurre de enero a julio (Figura 23 b) y la de aguas bajas que va de agosto a diciembre (Figura 23 c). Al mismo tiempo esta región presenta gran diversidad de sistemas geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y fitogeográficos, formados por terrazas aluviales cubiertas por vegetación de tierra firme, suelos hidromórficos, por mata de igapó y diques fluviales que forman lagos y várzeas (Ferreira de Faria 2010).

El lago Camaçari considerado uno de los mayores lagos de la región deriva del río Urubu y puede ser comparado con una gran cuenca, cuya profundidad varía entre 3 y 15 m durante el periodo de aguas bajas y el de crecida de las aguas. Cuando el volumen de agua supera los límites de este lago, en el periodo de aguas altas, permanece enteramente conectado al río Amazonas (Figura 23 b) y en la época de aguas bajas permanece desconectado del río principal (Figura 23 c) (Ferreira de Faria 2010).

El lago Mirituba recibe dos tipos de agua: aguas blancas provenientes de los ríos Amazonas y Madeira a través de canales de conexión y aguas negras provenientes de la cuenca local, produciéndose una mezcla entre las dos. Permanece conectado con los lagos menores Samauma y Agostinho en la región norte y con los lagos do Arari en el sur durante el periodo de aguas altas (Figura 23 b) mientras que en el periodo de aguas bajas, estos lagos tienden a secarse y desaparecer quedando el sistema reducido a una gran parte del lago Mirituba (Figura 23 c). Cabe destacar que este sistema es también considerado un “lago/isla” ya que un brazo del río Madeira pasa por el sur de la várzea y aísla los lagos de tierra firme que se encuentran al sur y al este casi el año entero.



**Figura 23.** Periodo de aguas altas: (a) Imagen MODIS (Julio 2008) color real (RGB 321) (b) Imagen MODIS (RGB 432). Periodo de aguas bajas: (c) Imagen MODIS (Noviembre 2009) (RGB 432).

### 3.1.5.2 Estaciones de muestreo

En el lago Camaçari fueron seleccionadas 4 estaciones de muestreo, que corresponden a cuatro sectores del lago (Figura 22 b) que lo caracterizan en su totalidad, debido a la presencia de dos tipos de aguas (aguas blancas y negras). El sector sur del lago está representado por la estación P16, el sector central del lago por la estación P20, ambas estaciones se caracterizan por la presencia de aguas blancas o de una mezcla entre los dos tipos de aguas, dependiendo del periodo hidrológico. El sector este del lago que corresponde a la estación P23, es una estación próxima a la conexión con el río Amazonas caracterizada mayormente por la presencia de aguas blancas debido a la influencia del mismo, principalmente en la época húmeda. La estación P25 está localizada en el sector norte del lago, influenciada por la presencia constante de aguas negras provenientes del río Urubu.

En el lago Mirituba fueron seleccionadas 3 estaciones de muestreo, en tres sectores del lago, la estación P4 localizada en el sector oeste mantiene contacto con el río Amazonas, la estación P6 localizada en el sector central del lago y la estación P13 ubicada en el sector este del lago (Figura 22 b). Pese a que el lago Mirituba se encuentra más influenciado por el río Amazonas, con predominio de aguas blancas, también recibe el aporte de aguas negras provenientes de la cuenca local, produciéndose una mezcla de ambos tipos de aguas en algunos sectores.

### 3.1.6 Várzea de Janauacá

La Várzea de Janauacá está localizada a 40 Km arriba de la confluencia de los ríos Solimões y Negro sobre el margen derecho del río Solimões, entre los 3.29° y 3.50° S y los 60.38° y 60.17° O. Presenta un segmento de 8 km de planicie de inundación, compuesto por un gran lago con un canal permanente simple (Figura 24) que lo conecta al río Solimões (Bonnet et al. 2011). Esta várzea está localizada en el Municipio de Carero Castanho, Amazonas. Limita al noroeste con la población de Manaquiri, al sur con el lago Janauacá, al este con el río Solimões al cual se conecta por un canal o igarapé y al oeste con el lago Manaquiri, que es parte de una várzea similar (Figura 25 a y c).



**Figura 24.** Vista de la Várzea de Janauacá. Zona del canal de ingreso a la várzea en la campaña de Octubre-2008.

#### 3.1.6.1 Dinámica hidrológica

La cuenca local extraída de datos SRTM (Misión Topográfica Radar Shuttle) cubre un área de 620 km<sup>2</sup> y la zona máxima inundada es aproximadamente de 180 km<sup>2</sup>. La várzea es influenciada directamente por el río Solimões, que es un río de aguas blancas según la

clasificación de Sioli (1984) a través de un canal de conexión localizado en la región este de la várzea. Pequeños afluentes de aguas negras drenan el sur de la cuenca durante la época húmeda (Enero a Julio). Cada año, la planicie de inundación comienza a inundarse a principios del mes de Noviembre, el periodo de aguas altas recae en el mes de Junio y el descenso de las aguas se inicia en el mes de Julio (Bonnet et al. 2011). En la época seca que se extiende de Agosto a Diciembre se mantiene un único canal que conecta la várzea con el río Solimões. La vegetación predominante en el lago es característica de la vegetación de várzea existiendo también extensos bancos de gramíneas macrófitas (Junk 1997)

### **3.1.6.2 Estaciones de muestreo**

Fueron seleccionadas cuatro estaciones de muestreo en la región central del lago (Figura 25 c) que representan las características de la várzea en su totalidad en relación a la presencia de los tipos de aguas. La estación 1 (LF03), que se encuentra en la región central oeste, la estación 2 (LF07) localizada en el centro próximo al canal o igarapé mayor. Estas dos estaciones se caracterizan por la presencia de aguas claras. La estación 3 (LF08) en la región central este, y la estación 4 (LF10) en la región central norte son influenciadas por aguas blancas que provienen del río Solimões.

### **3.1.7 Lago Grande de Manacapuru**

El lago Grande de Manacapuru está situado sobre el margen izquierdo del río Solimões entre los  $03^{\circ} 20' 06,73''S$  y  $60^{\circ} 50' 04,32''O$  en el municipio de Manacapuru, Amazonas (Campos & Freitas 2010). Está caracterizado por la presencia mayormente de aguas negras casi en la totalidad del lago pero recibe aguas del río Solimões al inicio de la época de lluvias (Enero a Marzo) por una conexión ancha y permanente que se encuentra al sudeste del lago principal. En cuanto a su posición en la planicie el lago Grande de Manacapuru limita al norte con el río Manacapuru, al este con la población de Manacapuru, al sur con el río Solimões y el lago Padre y al oeste con el lago Campina (Figura 25 a y b).

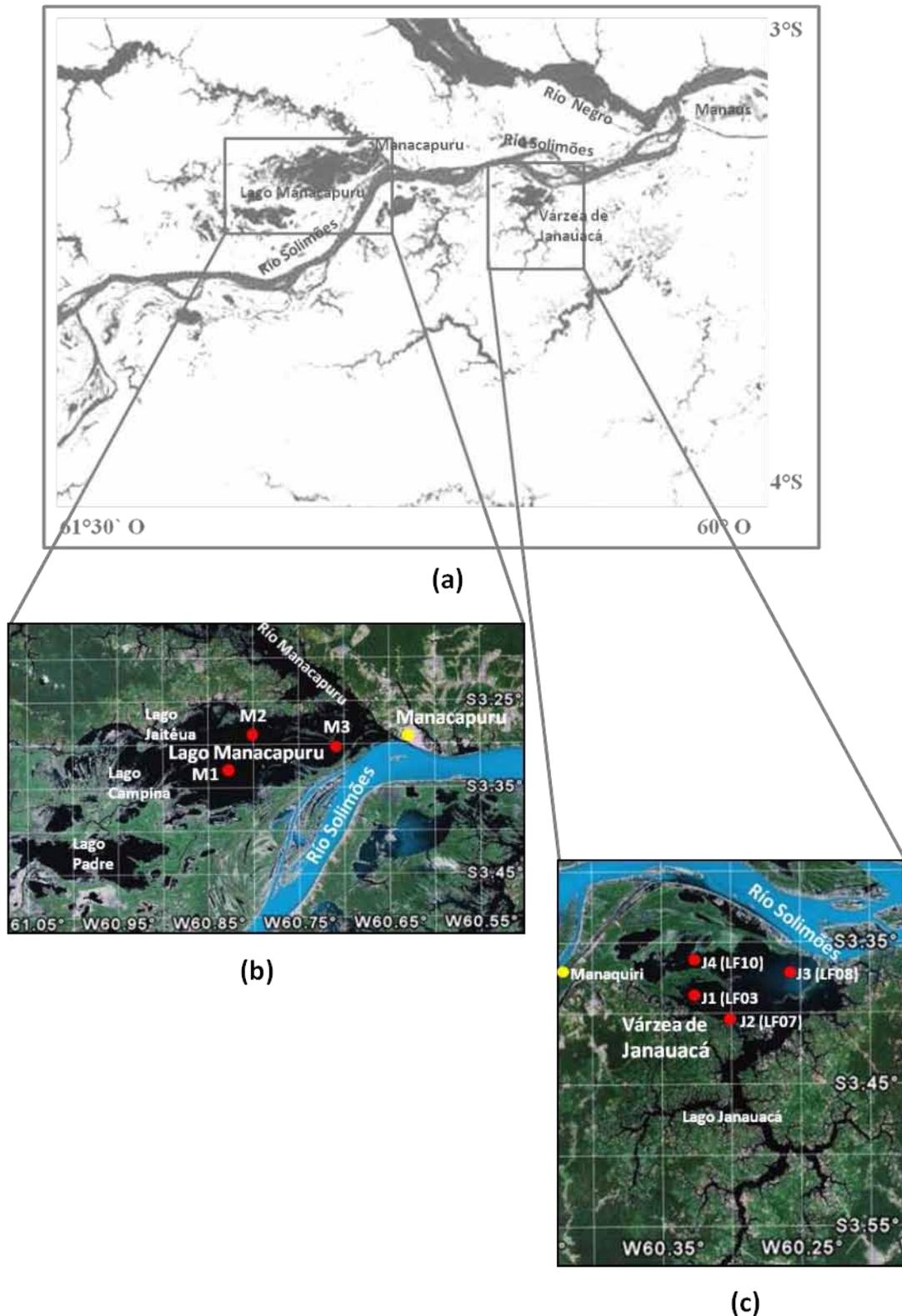
### **3.1.7.1 Dinámica hidrológica**

Esta región está formada por una red de ambientes acuáticos que se conectan durante las fases del ciclo hidrológico por canales, lagos, igarapés, paranás o restingas, formando una gran área de várzea por lo que este sistema es llamado Lago Grande de Manacapuru. Este lago está conectado en su parte sur al río Solimões durante todo el año. Trátese de una región de várzea con predominio de áreas bajas, periódicamente inundables durante los periodos de crecida de las aguas. Esta región también está compuesta por áreas de tierras altas o tierra firme. Sus características son modificadas con la variación del ciclo hidrológico (Garcez Costa Souza et al. 2008).

Es también considerado un lago de confluencia, denominado también “Ría-lago”, al mismo tiempo es un lago de tierra firme, el cual se caracteriza por ser alargado y dendrítico, formado principalmente a partir de ríos de aguas blancas, capaces de transportar grandes cantidades de aluviones (Irion 1984).

### **3.1.7.2 Estaciones de muestreo**

En este lago fueron seleccionadas tres estaciones de muestreo localizadas en la región central del lago, en la zona limnética. La estación M1 que está localizada en el sector centro-oeste del lago, está más influenciada por aguas negras, la estación M2 está localizada en el sector centro-norte, también influenciada por aguas negras y la estación M3 en el sector centro-este próximo al canal que conecta este lago con el río Solimões, presentando de esta manera, mayor influencia de aguas blancas (Figura 25 b).



**Figura 25.** (a) Localización del Lago Manacapuru y de la Várzea de Janauacá en la región central de la Amazonía brasilera (Modificado de Brasil Visto do Espaço 2004) <http://www.cdbrasil.cnpn.embrapa.br/> (b) Ubicación de las estaciones de muestreo en el Lago Manacapuru (c) Ubicación de las estaciones de muestreo en la várzea de Janauacá (Fuente: Google Earth 2010).

## **3.2 PARÁMETROS LIMNOLÓGICOS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO**

### **3.2.1 Datos disponibles de campañas anteriores (2000-2005)**

Dentro del proyecto anterior en convenio CNPq-IRD, las Universidades de Brasilia (UNB), Río de Janeiro (UFF) e IRD realizaron 11 campañas en la várzea de Curuaí en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2005, con una frecuencia de 2 a 3 veces por año en diferentes épocas del ciclo hidrológico. Se colectaron muestras de agua para analizar clorofila-a y materia en suspensión. De todas las campañas solo dos incluyeron muestreos de fitoplancton (Junio-2002 y Marzo-2004). Estos datos se encuentran disponibles en informes de campo del proyecto HYBAM (Hidrología y Geoquímica de la Cuenca Amazónica).

#### **3.2.1.1 Clorofila-a y Materia en suspensión (MES)**

Los datos presentados en las tablas 4 y 5, corresponden a las campañas de mediciones realizadas en la várzea de Curuaí, en periodos hidrológicos de aguas altas y bajas entre los años 2000 y 2005. Los muestreos tanto para analizar clorofila-a como para materia en suspensión fueron realizados en superficie. La extracción de clorofila-a se realizó utilizando acetona al 90% (Golterman et al. 1978) mediante espectrofotometría (Strickland & Parsons 1972) y la concentración fue calculada según Jeffrey & Humphrey (1975). La materia en suspensión fue analizada mediante el método gravimétrico (APHA 1992). Ambos análisis fueron desarrollados en el Laboratorio de Geoquímica de Aguas de la Universidad Federal Fluminense (Pérez 2008).

En la tabla 5 se destacan los valores mínimos de clorofila-a que se presentan en el periodo de crecida de las aguas (Marzo), mientras que los valores máximos corresponden a los periodos de aguas altas (Junio) y de descenso de las aguas (Octubre). Del mismo modo, la tabla 6 destaca los valores máximos de materia en suspensión registrados durante los periodos de crecida de aguas (Marzo) descenso de las aguas (Octubre) y aguas bajas (Noviembre). Los valores mínimos fueron registrados en los periodos de aguas altas (Junio) y de descenso de las aguas (Agosto).

**Tabla 5. Datos generales de clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ ) de 11 campañas desarrolladas en la várzea de Curuai (2000-2005) (Proyecto HYBAM).**

Campañas (Fechas)	Nº	Lugar	Estaciones de muestreo	Valor Promedio ( $\mu\text{g/L}$ )	Valores máx. y mín. ( $\mu\text{g/L}$ )
12-15/10/2000	1	Várzea de Curuai	6	53,4	131-3,8
5-6/03/2001	1	Várzea de Curuai	6	27,3	111,5-2,6
13-19/03/2002	1	Várzea de Curuai	6	10,1	24-1,6
23-28/06/2002	1	Várzea de Curuai	9	11,02	31-2,6
25/03-1/04/2003	1	Várzea de Curuaí	7	4,1	9,2-1,8
13-17/12/2003	1	Várzea de Curuaí	7	20	90,4-0,2
15-19/03/2004	1	Várzea de Curuai	6	5,03	8,1-2,7
11-16/08/2004	1	Várzea de Curuai	7	33,1	68,3-4,6
23-30/03/2005	1	Várzea de Curuai	8	3,3	11-0,7
10-15/06/2005	1	Várzea de Curuai	10	4,2	12-0,9
22-24/11/2005	1	Várzea de Curuai	6	64,3	133-16

(\*) Nótese que los valores de la campaña Junio-2003 no se presentan en la tabla 4, debido a que los resultados de los análisis realizados presentaron errores y los valores fueron sobreestimados.

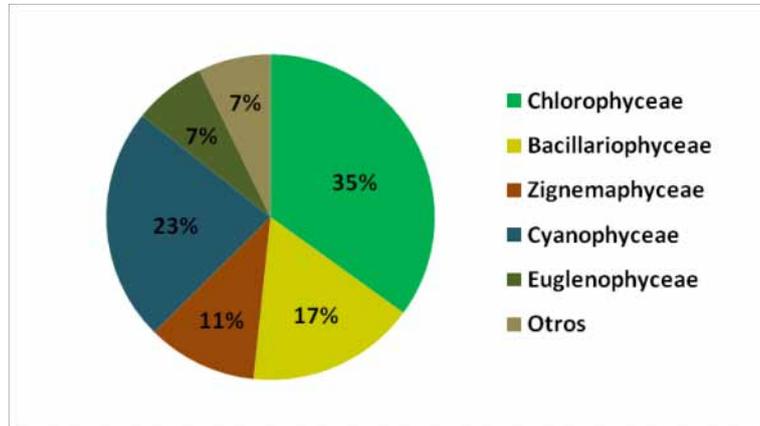
**Tabla 6. Datos generales de materia en suspensión ( $\text{mg/L}$ ) de 11 campañas desarrolladas en la várzea de Curuaí (2000-2005) (Proyecto HYBAM).**

Campañas (Fechas)	Nº	Lugar	Estaciones de Muestreo	Valor Promedio ( $\text{mg/L}$ )	Valores máx. y mín. ( $\text{mg/L}$ )
12-15/10/2000	1	Várzea de Curuaí	5	83,8	98 - 64
21/03-1/04/2001	1	Várzea de Curuaí	7	66,2	24,1 - 97,3
13-19/03/2002	1	Várzea de Curuaí	5	31,5	41,5 - 22
23-28/06/2002	1	Várzea de Curuaí	8	10,3	18,3 - 4,6
25/03-1/04/2003	1	Várzea de Curuaí	7	66,2	97,3 - 24,1
13-17/12/2003	1	Várzea de Curuaí	5	575,4	923 - 301,4
15-19/03/2004	1	Várzea de Curuaí	6	100	220 - 39,3
11-16/08/2004	1	Várzea de Curuaí	6	37,1	65,2 - 16,3
23-30/03/2005	1	Várzea de Curuaí	7	57,31	146,15 - 12
10-15/06/2005	1	Várzea de Curuaí	7	11,4	19,05 - 9
22-24/11/2005	1	Várzea de Curuaí	4	951,8	2289 - 137,4

### 3.2.1.2 Fitoplancton

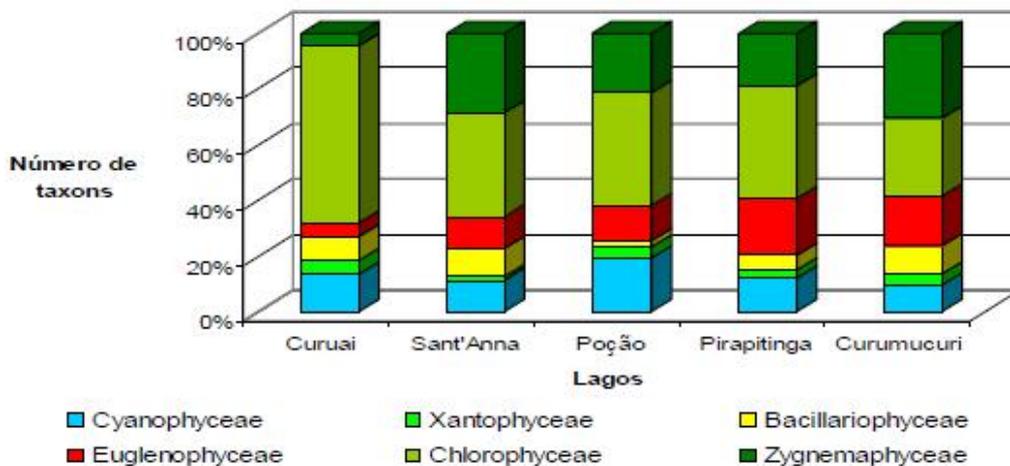
Las campañas realizadas en junio de 2002 (aguas altas) y marzo de 2004 (crecida de las aguas) en la várzea de Curuai, incluyeron colectas de fitoplancton en superficie en varios lagos (Lago Grande de Curuai, Lago Pirapitinga, Lago Sant`Anna, Lago Curumucurí y Lago Poção) y fueron fijadas con solución de Transeau. En laboratorio las muestras fueron examinadas bajo microscópio óptico Zeiss Axioscop 40. Los resultados de ambas campañas presentaron inventarios de riqueza específica y frecuencias relativas de las

clases taxonómicas del fitoplancton. En la campaña 2002 fueron identificados 138 taxones, distribuidos en 8 clases taxonómicas. La clases Chlorophyceae y Cyanophyceae fueron predominantes (Figura 26), la primera presentó mayor representatividad siendo los géneros *Monoraphidium* y *Scenedesmus* los cuales presentaron mayor número de especies catalogadas (Ibañez et al. 2003).



**Figura 26.** Ocurrencias relativas de las clases taxonómicas del fitoplancton de superficie en el lago Grande de Curuai ( Junio-2002). Fuente: Ibañez et al. (2003).

En la campaña 2004 fueron identificados 230 taxones en el área de estudio, siendo las clases Chlorophyceae (73 taxones) y Zygnemaphyceae (71 taxones) las más representativas (Figura 27) como se observó en el lago Curuai, mayormente dominado por la clase Chlorophyceae. El Lago Curumucuri presentó la mayor riqueza específica (156 taxones), y en este lago la clase Zygnemaphyceae presentó el 33% de los taxones inventariados. Además, la clase Cyanophyceae y Euglenophyceae también presentaron porcentajes importantes en los lagos Poçoão, Pirapitinga y Curumucuri. (Arantes Gama & Nogueira 2008).



**Figura 27.** Riqueza específica de las clases (nº de taxones) en cada lago (Curuai, Sant`Anna, Poçoão, Pirapitinga y Curumucuri) (Marzo-2004). Fuente: Arantes Gama & Nogueira (2008).

### 3.2.1.3 Otros datos

Los datos hidrométricos de los niveles de agua registrados en la estación de Óbidos, del periodo comprendido entre los años 2000 a 2010, fueron obtenidos de la red de mediciones de la Agencia Nacional de Aguas (ANA 2010) en Brasil. La estación de Óbidos presenta datos hidrológicos continuos desde 1968.

### 3.2.2 Campañas nuevas (2008-2010)

Fueron realizadas 6 campañas en la várzeas de Curuaí, Janauacá y en los lagos Manacapurú, Parú, Mirituba y Camaçari, en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2010 (Tabla 7). Estas campañas se llevaron a cabo en diferentes épocas del ciclo hidrológico. Se colectaron muestras de agua para analizar clorofila-s y materia en suspensión. Todas las campañas desde 2008 incluyeron mediciones radiométricas para calibración de las imágenes satelitales. Estos datos se encuentran disponibles en informes de campo de los proyectos PROCARBAMA y CARBAMA (Ciclo del Carbono en el río Amazonas).

**Tabla 7. Datos de las campañas nuevas realizadas en los años 2008 a 2010.**

<b>Campañas (Fechas)</b>	<b>N</b>	<b>Lugar</b>	<b>Puntos de muestreo</b>
<b>6-10/02/2008</b>	1	Várzea de Janauacá	13
<b>27-31/03/2008</b>	1	Várzea de Janauacá	12
<b>10-29/05/2008</b>	1	Várzea de Curuaí	7
		Várzea de Janauacá	4
		Lago Manacapurú	3
		Lago Camaçari	1
		Lago Mirituba	1
		Lago Parú	2
<b>4-15/10/2008</b>	1	Várzea de Curuaí	3
		Várzea de Janauacá	3
<b>Junio/2009</b>	1	Lago Camaçari	3
		Lago Mirituba	1
		Várzea de Curuaí	3
		Várzea de Janauacá	4
<b>Julio-Agosto /2010</b>	1	Várzea de Curuaí	2
		Lago Mirituba	1

### 3.2.2.1 Clorofila-a y Materia en suspensión (MES)

Se colectaron muestras de agua con una botella Van Dorn de 2 L. en la zona pelágica de cada punto de muestreo (Figura 28 a). Las colectas fueron realizadas generalmente en la superficie (~0,5m). Sin embargo, algunas colectas de clorofila-atambién fueron realizadas en profundidad (1 y 2 m). Los recipientes de plástico fueron transportados y conservados en frío y en oscuridad para reducir al máximo la fotoxidación (Herve & Heinonen 1984). Ambos parámetros fueron procesados *in situ* en un sistema de filtración al vacío (Figura 28 b). En el caso de la clorofila-a se usaron filtros de fibra de vidrio GF/F (47 mm diámetro, 0,6-0,7  $\mu\text{m}$  tamaño de poro) que fueron protegidos de la luz, rotulados debidamente y conservados a -20 °C. En tanto que, para la materia en suspensión los filtros de celulosa fueron previamente procesados en una mufla y posteriormente pesados. La extracción de clorofila-a en laboratorio se realizó con etanol caliente al 96 % y su cuantificación mediante el método fluorimétrico (Holm Hansen et al. 1965). Estos parámetros fueron analizados en el laboratorio de Geoquímica (LAGEQ) de la Universidad de Brasilia.



(a)



(b)

**Figura 28.** Equipo de muestreo para colecta de aguas y análisis *in situ* (a) Botella Van Dorn de 2 litros. (b) Equipo de filtración al vacío, Bomba de vacío y vasos de filtración.

### 3.2.2.2 Fitoplancton

El año 2008 se desarrollaron dos campañas en diferentes periodos hidrológicos que comprendieron colectas de fitoplancton. Se colectaron muestras de agua superficial (~0,5 m)

en la zona pelagial de cada lago, utilizando una botella Van Dorn de 2 litros (Figura 28 a). Se consideraron las mismas estaciones de muestreo de la clorofila *a*. Las muestras fueron depositadas en frascos de polietileno debidamente rotulados, preservadas con solución de Lugol como agente fijador. En laboratorio, las muestras fueron analizadas para determinación de la frecuencia relativa (%) a nivel de divisiones del fitoplancton, con un microscopio óptico Leika (dispositivo para fotografía) (400x) contándose 20 campos elegidos al azar de cinco láminas (Seeligmann et al. 2008). Las algas unicelulares, coloniales y filamentosas fueron consideradas como unidad “individuo”.

Para la determinación taxonómica se utilizó bibliografía especializada para cada grupo algal (Lee 2008; Anagnostidis & Komárek 1988; Komárek & Anagnostidis 1999, 2005; Bourrelly 1972, 1985) y literatura especial con énfasis en flora amazónica (Ibañez et al. 2003, Arantes Gama & Nogueira 2008).

### **3.3 RADIOMETRÍA**

#### **3.3.1 Espectrorradiómetro de campo**

El espectrorradiómetro de campo está compuesto por un sistema de 3 sensores TRIOS *optical* ([www.trios.de](http://www.trios.de)) que opera en un rango de 350 a 900 nm, con una resolución de 2nm.

Estos sensores fueron instalados en la embarcación sobre un soporte, en dos posiciones: uno en la parte superior en posición vertical y dos en la parte inferior en posición oblicua con un ángulo de 35° (Figura 29 a). Los mismos permitieron realizar medidas de radiancia (Lu) e irradiancia (Ed) en superficie y en la columna de agua, a diferentes profundidades para calcular la reflectancia (Rrs) (Figura 30).

#### **3.3.2 Mediciones radiométricas**

Las mediciones radiométricas fueron realizadas en superficie y en profundidad a través del software MSDA\_XE (Multi Sensor Data Acquisition System\_Extended Edition) que es controlado simultáneamente por los sensores del espectrorradiómetro y que permite de igual forma la extracción de los datos.

### 3.3.2.1 Mediciones de reflectancia en superficie

Las mediciones radiométricas para calcular la reflectancia se realizaron *in situ* en superficie juntamente con la trayectoria de la embarcación, en los mismos puntos de colecta de agua. Se efectuaron mediciones de irradiancia y radiancia utilizando un espectrorradiómetro de campo (Figura 29 a).

La irradiancia ( $E_d$ ) fue medida por el sensor que se encuentra en posición vertical (Watt/m<sup>2</sup>), dirigido hacia arriba mediante el cual se calcula el flujo radiante incidente que es la sumatoria de la luz solar directa más la luz difusa que proviene del hemisferio superior y que penetra en la columna de agua (Figura 29 b). Los dos sensores ubicados en posiciones oblicuas midieron la radiancia ( $L_t$ ) (Watt/m<sup>2</sup>/esterradiano) que corresponde a la energía retro-dispersada por el agua.

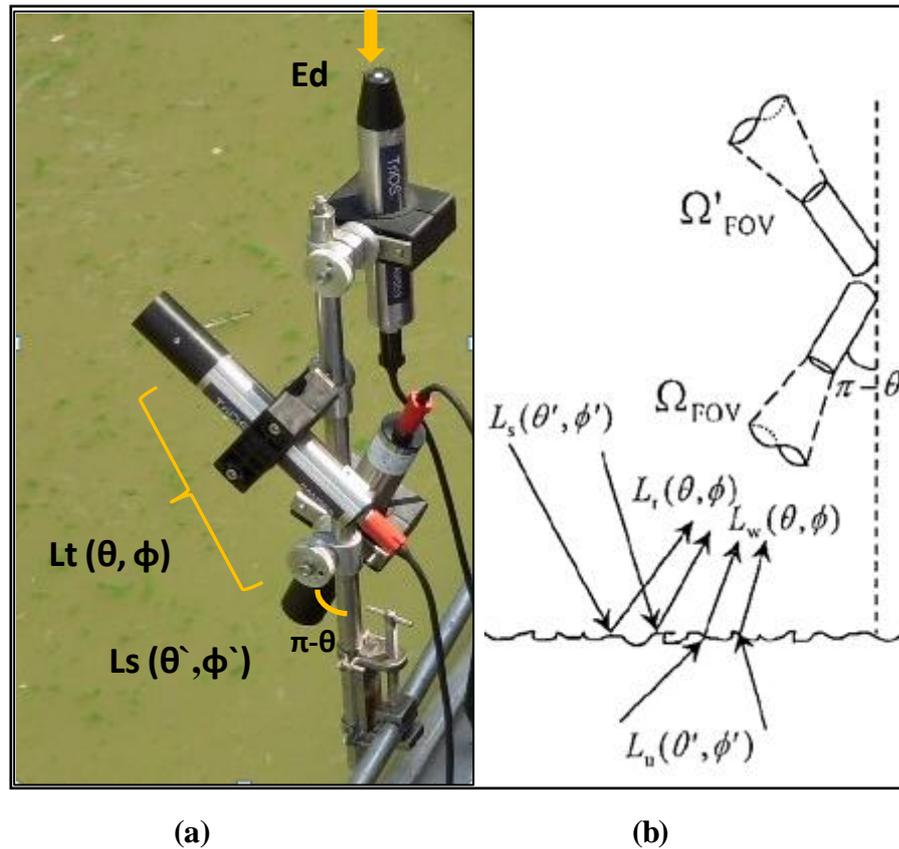
El sensor que se encuentra en la parte inferior (ángulo de 35°) mide  $L_w$  que es la suma de la radiancia que proviene del agua ( $L_u$ ) más la radiancia difusa reflejada por la superficie del agua ( $L_r$ ) (Figura 29 b y ecuación 1)

$$L_t(\Theta, \phi) = L_r(\Theta, \phi) + L_w(\Theta, \phi) \quad \text{ecuación 1}$$

Como ambas radiancias  $L_r$  y  $L_w$  no son dissociables, se estima  $L_s$  a través de  $L_t$ , que es la radiancia difusa original emitida antes de la reflexión en la superficie (Figura 29 b) por el cielo en la dirección complementaria ( $90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$ ). Para este fin, se utiliza una estimación *a priori* del coeficiente de reflexión  $\rho$  de la interfase aire-agua, el mismo que es próximo al coeficiente de Fresnel.

El parámetro  $\rho$  es igual a 0.028 (2,8% de reflexión) para valores de viento por debajo de 5 m/s lo que corresponde a las condiciones meteorológicas encontradas durante las mediciones (ver ecuación 2)

$$L_r(\Theta, \phi \in \Omega_{FOV}) = \rho L_s(\Theta', \phi' \in \Omega'_{FOV}) \quad \text{ecuación 2}$$



**Figura 29.** Mediciones de reflectancia en superficie (a) Espectrorradiómetro TRIOS optical compuesto por 3 sensores (b) Detalle de las mediciones de irradiancia e radiancia según Froidefond & Doxaran (2004).

La radiancia relevante es  $L_u$ , que es la verdadera radiancia que sube de la columna de agua. Así, la reflectancia (Figura 30) medida en el campo fue calculada a través de la siguiente ecuación:

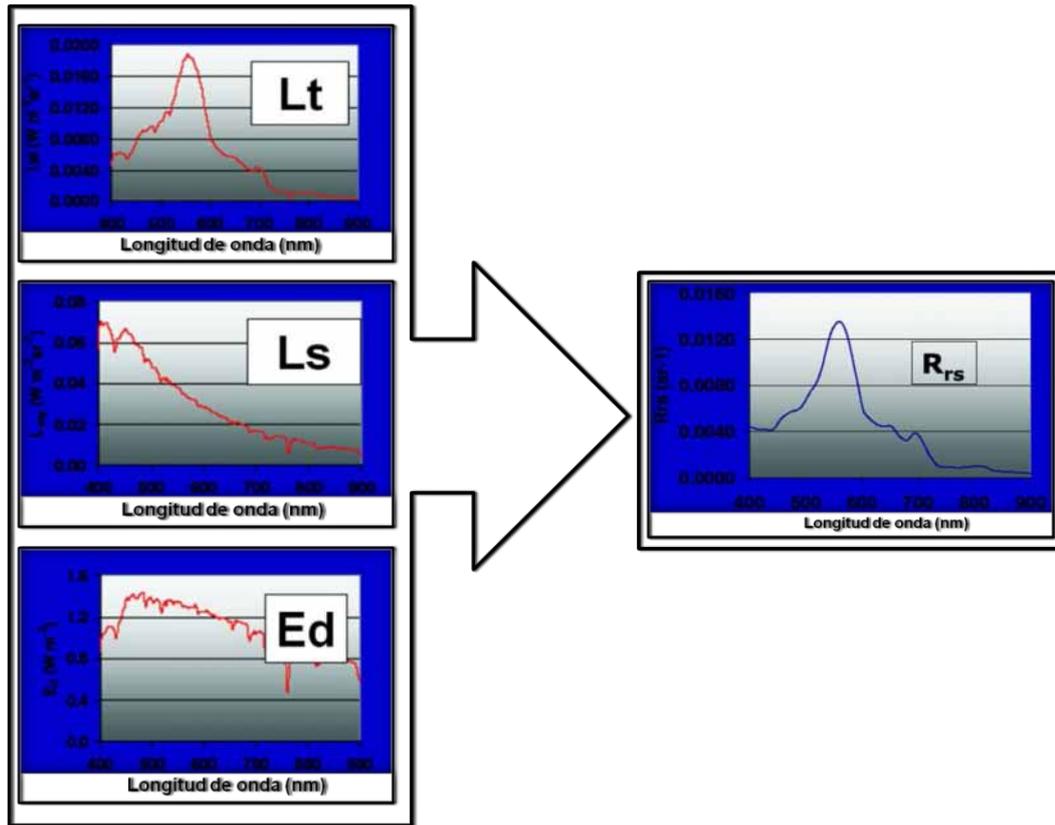
$$R = (L_t - \rho L_s) / E_d(1/\text{esteradiano})$$

Donde:  $L_t$  = radiancia difusa reflejada por el agua

$\rho$  = coeficiente de reflexión

$L_s$  = radiancia original antes de la reflexión

$E_d$  = irradiancia



**Figura30.** Gráficos de las mediciones de radiancia, irradiancia y reflectancia. Modificado de Peña-Martínez et al. 2004).

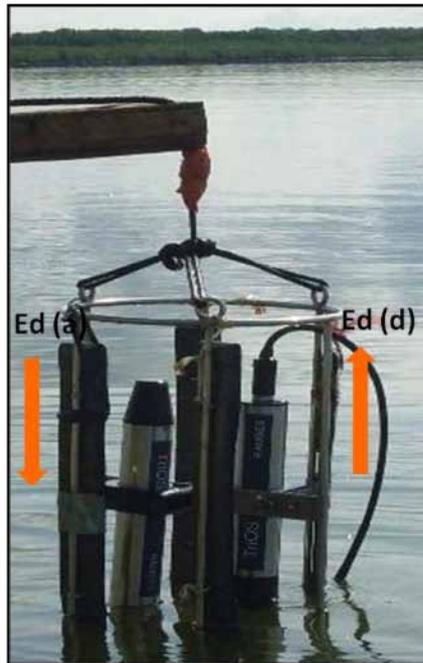
### 3.3.2.2 Mediciones de reflectancia en profundidad

Las mediciones en la columna de agua, fueron realizadas utilizando el espectrorradiómetro de campo, equipado con dos de los tres sensores, protegidos en un soporte sumergible, controlado desde la embarcación. La disposición de los sensores fue vertical (Figura 31). El sensor de irradiancia fue colocado dirigido hacia arriba para medir el coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) de la señal en varias profundidades, desde la superficie (~0,5 m), a 1 m y 2 m de profundidad, esta última considerada como el final de la zona eufótica (definida como la profundidad donde la irradiancia original es absorbida en un 99%).

El coeficiente de atenuación fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$K_d = \frac{1}{z_2 - z_1} \ln \frac{E_d(z_1)}{E_d(z_2)}$$

Donde:  $z_1$  y  $z_2$  = diferentes profundidades,  $E_d$  = Irradiancia



**Figura 31.** Mediciones radiométricas en profundidad para cálculo del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ).  $E_d$  (a): Irradiancia ascendente  $E_d$  (d): Irradiancia descendente

Es importante considerar que la medición debe presentar una disminución exponencial de la irradiancia, cuyo argumento usado para modelar ésta es el coeficiente de atenuación o  $K_d$ . Al mismo tiempo un sensor de presión en el sensor de irradiancia nos da la profundidad de cada medición.

### 3.3.3 Calibración y simulación de los datos satelitales

La reflectancia medida con el espectrorradiómetro puede ser comparada directamente con la reflectancia calculada por satélite desde que una imagen presenta correcciones de los efectos atmosféricos. Se consideraron dos tipos de técnicas en este estudio (Froidefond & Doxaran 2004) para cuantificar las concentraciones de partículas por teledetección:

- Técnica de calibración directa o Match-up que consiste en comparar directamente las concentraciones en partículas medidas en el campo con los espectros de reflectancia satelitales. La validez de este tipo de calibración solo es puntual.

- Técnica de calibración indirecta que consiste en comparar las concentraciones en partículas medidas en el campo (clorofila-a y materia en suspensión) con los espectros de reflectancia medidos con un espectrorradiómetro.

En base a la técnica de calibración indirecta (Froidefond & Doxaran 2004) se realizó una simulación de datos radiométricos con las bandas MODIS y MERIS (secciones 4.3.1 y 4.3.2). Para ambas simulaciones se usaron valores medios de las mediciones en las bandas respectivas (bandas 2 y 3 para MODIS y bandas 6, 7 y 9 para MERIS). Los valores obtenidos fueron reemplazados en las relaciones de bandas (cociente). Se relacionaron las concentraciones de clorofila-a medidas en el campo con el cociente de bandas obtenido a través de ecuaciones de regresión. Para el caso de la materia en suspensión fueron relacionados los espectros de reflectancia de las bandas 4 (Infrarrojo próximo) de MODIS y banda 13 de MERIS con los valores de concentración. Por otro lado, utilizando la técnica de calibración directa o Match-up fueron relacionadas directamente las concentraciones de clorofila-a medidas en campo (Campañas realizadas entre los años 2000 a 2010) con los datos de reflectancia de las imágenes de satélite (sección 4.3.5).

## 3.4 DATOS DE SATELITE

### 3.4.1 Sensor MODIS

MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua del sistema EOS (*Earth Observation System*) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Cada satélite pasa dos veces por día sobre una región, uno pasa por la mañana y otra por la tarde. En el caso del satélite Terra, el recorrido diurno es “descendente” (promedio 10:30 a.m.), mientras que para el satélite Aqua el recorrido es “ascendente” al inicio de la tarde (promedio 13:30 p.m.) La órbita de Terra tiene una trayectoria de norte a sur, cruzando el ecuador en horas de la mañana mientras que el satélite Aqua pasa por la misma ruta con sentido contrario, de sur a norte en horas de la tarde. Ambos satélites cubren la visión total de la superficie terrestre cada 1 a 2 días, registrando datos en 36 bandas espectrales diferentes. Estos datos ayudan a comprender mejor la dinámica global y los procesos que ocurren en la tierra, en los océanos así como en la baja atmósfera (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)

### 3.4.2 Especificaciones generales

El sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) fue diseñado y desarrollado con el modelo de ingeniería (EM) completado a mediados de 1995. Incorporado a las especificaciones de la NASA (Tabla 7) representa lo mejor de la ingeniería de hardware creado para sensores remotos. El diseño del sensor MODIS se caracteriza por una alta sensibilidad radiométrica (12 Bits) en 36 bandas espectrales con longitudes de onda comprendidas desde 0.4  $\mu\text{m}$  hasta 14.4  $\mu\text{m}$ . Las bandas se caracterizan por presentar diferente resolución espacial con valores de 250 a 1000 m dispuestos en: 2 bandas de 250 m, 5 bandas de 500 m y las 29 bandas restantes de 1 km. Con un ángulo de visión de  $\pm 55$  grados, el sistema EOS (*Earth Observation System*) observa su objetivo a 705 km de distancia alcanzando una franja de 2330 km. Posee un intervalo casi diario de 1 a 2 días para repetir el recorrido de un área lo que le confiere una gran capacidad para estudios de dinámicas ecológicas tanto terrestres como oceánicas. Simultáneamente la frecuencia del mismo aumenta la probabilidad de adquisición de datos sin cobertura de nubes. Otras especificaciones se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8. Especificaciones técnicas generales del Sensor MODIS**  
<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

<b>Orbita:</b>	705 km, 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) o 1:30 p.m. nodo ascendente (Aqua), sincronización con el sol, circular cercana a la polar.
<b>Tasa escaner:</b>	20.3 rpm
<b>Dimensiones de franja:</b>	2330 km por 10 km
<b>Telescopio:</b>	17.78 cm diam. Fuera de eje, afocal (colimados), con campo intermedio
<b>Medidas:</b>	1.0 x 1.6 x 1.0 m
<b>Peso:</b>	228.7 kg
<b>Potencia:</b>	162.5 W (promedio orbital)
<b>Velocidad de datos</b>	10.6 Mbps (pico diario); 6.1 Mbps (promedio orbital)
<b>Cuantificación:</b>	12 bits
<b>Resolución Espacial:</b>	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
<b>Periodo de diseño:</b>	6 años

### 3.4.3 Productos

Existen 44 productos de datos estándar de MODIS (Tabla 9) utilizados para el estudio de los cambios globales en una gran variedad de disciplinas, entre las que se encuentran la oceanografía, la biología y las ciencias atmosféricas.

**Tabla 9. Descripción general de los Productos MODIS disponibles en el sitio:**  
[https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table)

**VARIABLES DE RADIACIÓN PROPUESTAS**

**Reflejtancia de la superficie terrestre**

Nombre corto	Plataforma	MODIS Producto	Raster Tipo	Res. (m)	Granularidad Temporal
MOD09GA	Terra	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	Tile	500/1000m	Diaria
MYD09GA	Aqua	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	Tile	500/1000m	Diaria
MOD09GQ	Terra	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-2	Tile	250m	Diaria
MYD09GQ	Aqua	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-2	Tile	250m	Diaria
MOD09CMG	Terra	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	CMG	5600m	Diaria
MYD09CMG	Aqua	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	CMG	5600m	Diaria
MOD09A1	Terra	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	Tile	500m	8 Días
MYD09A1	Aqua	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-7	Tile	500m	8 Días
MOD09Q1	Terra	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-2	Tile	250m	8 Días
MYD09Q1	Aqua	Reflejtancia de la superficie Bandas 1-2	Tile	250m	8 Días

**Temperatura y Emisividad de la superficie terrestre**

MOD11_L2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Swath	1000m	5 Min
MYD11_L2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Swath	1000m	5 Min
MOD11A1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	Diaria
MYD11A1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	Diaria
MOD11A2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	8 Días
MYD11A2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	8 Días
MOD11B1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	6000m	Diaria
MYD11B1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	6000m	Diaria
MOD11C1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Diaria
MYD11C1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Diaria
MOD11C2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	8 Días
MYD11C2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	8 Días
MOD11C3	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Mensual
MYD11C3	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Mensual

**BRDF y Albedo**

MCD43A3	Combinado	Albedo	Tile	500m	16 Días
MCD43B3	Combinado	Albedo	Tile	1000m	16 Días
MCD43C3	Combinado	Albedo	CMG	5600m	16 Días
MCD43A1	Combinado	BRDF-Albedo Parámetro del Modelo	Tile	500m	16 Días
MCD43B1	Combinado	BRDF-Albedo Parámetro del Modelo	Tile	1000m	16 Días
MCD43C1	Combinado	BRDF-Albedo Parámetro del Modelo	CMG	5600m	16 Días
MCD43A2	Combinado	BRDF-Albedo Calidad	Tile	500m	16 Días
MCD43B2	Combinado	BRDF-Albedo Calidad	Tile	1000m	16 Días
MCD43C2	Combinado	BRDF-Albedo Calidad de nieve disponible	Tile	5600m	16 Días
MCD43A4	Combinado	Nadir BRDF-Reflejtancia ajustada	Tile	500m	16 Días
MCD43B4	Combinado	Nadir BRDF-Reflejtancia ajustada	Tile	1000m	16 Días
MCD43C4	Combinado	Nadir BRDF-Reflejtancia ajustada	CMG	5600m	16 Días

**VARIABLES AMBIENTALES**

**Indices de Vegetación**

MOD13A1	Terra	Indices de Vegetación	Tile	500m	16 Días
MYD13A1	Aqua	Indices de Vegetación	Tile	500m	16 Días
MOD13A2	Terra	Indices de Vegetación	Tile	1000m	16 Días
MYD13A2	Aqua	Indices de Vegetación	Tile	1000m	16 Días
MOD13Q1	Terra	Indices de Vegetación	Tile	250m	16 Días
MYD13Q1	Aqua	Indices de Vegetación	Tile	250m	16 Días
MOD13A3	Terra	Indices de Vegetación	Tile	1000m	Mensual
MYD13A3	Aqua	Indices de Vegetación	Tile	1000m	Mensual
MOD13C1	Terra	Indices de Vegetación	CMG	5600m	16 Días
MYD13C1	Aqua	Indices de Vegetación	Tile	5600m	16 Días
MOD13C2	Terra	Indices de Vegetación	CMG	5600m	Mensual
MYD13C2	Aqua	Indices de Vegetación	CMG	5600m	Mensual

(Continuación) **Tabla 9. Descripción general de los Productos MODIS disponibles en el sitio: [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table)**

<b>LAI/FPAR</b>					
<b>MCD15A2</b>	Combinado	Indice del área de la hoja - FPAR	Tile	1000m	8 Días
<b>MOD15A2</b>	Terra	Indice del área de la hoja - FPAR	Tile	1000m	8 Días
<b>MYD15A2</b>	Aqua	Indice del área de la hoja - FPAR	Tile	1000m	8 Días
<b>Productividad primaria neta</b>					
<b>MOD17A2</b>	Terra	Productividad Primaria Bruta	Tile	1000m	8 Días
<b>MYD17A2</b>	Aqua	Productividad Primaria Bruta	Tile	1000m	8 Días
<b>Características de la Cubierta Terrestre</b>					
<b>Anomalías térmicas y contra incendio</b>					
<b>MOD14</b>	Terra	Anomalías térmicas e incendios	Swath	1000m	5 Min
<b>MYD14</b>	Aqua	Anomalías térmicas e incendios	Swath	1000m	5 Min
<b>MOD14A1</b>	Terra	Anomalías térmicas e incendios	Tile	1000m	Diaria
<b>MYD14A1</b>	Aqua	Anomalías térmicas e incendios	Tile	1000m	Diaria
<b>MOD14A2</b>	Terra	Anomalías térmicas e incendios	Tile	1000m	8 Días
<b>MYD14A2</b>	Aqua	Anomalías térmicas e incendios	Tile	1000m	8 Días
<b>Cubierta terrestre</b>					
<b>MOD12Q1</b>	Terra	Tipo de Cubierta Terrestre	Tile	1000m	Anual
<b>MCD12Q1</b>	Combinado	Tipo de Cubierta Terrestre	Tile	500m	Anual
<b>MOD12Q2</b>	Terra	Dinámica de la cubierta terrestre	Tile	1000 m	Anual
<b>MCD12Q2</b>	Combinado	Dinámica de la cubierta terrestre	Tile	500 m	Anual
<b>MOD12C1</b>	Terra	Tipo de Cubierta Terrestre	CMG	5600m	Anual
<b>MCD12C1</b>	Combinado	Tipo de Cubierta Terrestre	CMG	5600m	Anual
<b>VCC/VCF</b>					
<b>MOD44B</b>	Terra	Campos continuos de vegetación	Tile	500m	Anual

### 3.4.4 Otras Imágenes (MERIS)

El sensor MERIS (*M*edium *R*esolution *I*maging *S*pectrometer) es uno de los instrumentos de la Agencia Espacial Europea (ESA) a bordo del satélite ENVISAT. Con un espectrómetro de imagen tipo *pushbroom*, que presenta miles de elementos detectores y analiza la superficie terrestre a partir de una exploración lineal (unidimensional) perpendicular a la trayectoria (Schowengerdt 2007). Posee una alta resolución espectral. Está conformado por 15 bandas espectrales cuya amplitud es de 390 a 1040 nm, con un centro de bandas comprendidas desde 412.5 a 900 nm programables en posición y ancho de acuerdo con las prioridades de investigación (Tabla 10). Su resolución espacial es de 300 m para regiones limitadas y 1.2 km en base global. Su ángulo de visión es de 68,5 °. Es un sensor que adquiere la totalidad del globo terráqueo en menos de tres días por lo que sus imágenes ofrecen gran información para aquellos estudios que abarcan una gran superficie.

(ESA 1996. <http://envisat.esa.int/instruments/meris>).

Los objetivos de MERIS son:

- Entender el papel de los océanos y la productividad de los mismos.

- Permitir observar el color de los océanos y suministrar características biofísicas y la composición química del agua en regiones costeras, gestión pesquera.
- Monitorear cambios en los océanos (fitoplancton, sustancia amarilla, materia suspendida).

**Tabla 10. Características y aplicaciones de las bandas del sensor MERIS**

Bandas	Tamaño	Centro de Banda (nm)	Ancho de Banda (nm)	Aplicaciones Potenciales
1	2 bytes	412.5	10	Sustancia Amarilla, Turbidez
2	2 bytes	442.5	10	Máxima absorción de la Clorofila
3	2 bytes	490	10	Clorofila, otros pigmentos
4	2 bytes	510	10	Turbidez, sedimentos suspendidos, mareas rojas
5	2 bytes	560	10	Referencia Clorofila, sedimentos suspendidos
6	2 bytes	620	10	Sedimentos suspendidos
7	2 bytes	665	10	Absorción de la clorofila
8	2 bytes	681.25	7.5	Fluorescencia de la clorofila
9	2 bytes	705	10	Corrección atmosférica
10	2 bytes	753.75	7.5	Referencia absorción de Oxígeno
11	2 bytes	760	2.5	Absorción de Oxígeno R-branch
12	2 bytes	775	15	Aerosoles, vegetación
13	2 bytes	865	20	Corrección aerosoles para el océano
14	2 bytes	890	10	Referencia Absorción Vapor de agua
15	2 bytes	900	10	Absorción vapor de agua, vegetación

### 3.5 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE

#### 3.5.1 Adquisición de las imágenes de satélite

Fueron empleadas imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) productos MOD09 y MYD09, compuestas cada 8 días. La frecuencia fue diaria con 2 imágenes por día, procedentes de dos satélites: El satélite TERRA cuyas imágenes son disponibles desde el 26/02/2000 (Figura 32 a) y el satélite AQUA a partir del 26/07/2002, con una resolución espacial de 500 m (Figura 32 b). Las imágenes que cubren el área de estudio (planicies de inundación y otros lagos), fueron obtenidas de la base de datos específicos denominada GETMODIS (<http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels.php>) del proyecto HYBAM, correspondientes al periodo 2000 a 2010. En este trabajo fue utilizado el producto MOD09 que es un producto MODIS de reflectancia superficial, colección 5 con correcciones atmosféricas, para los satélites Terra (MOD09A1) y Aqua (MYD09A1).



(a)



(b)

**Figura 32.** Imágenes (MODIS) de la várzea de Curauí (a) Imagen del satélite TERRA (b) Imagen del satélite AQUA. Resolución espacial de 500 m. (Fecha: 2/6/2010)

Un total de 862 imágenes correspondientes a un periodo de 10 años (2000-2010) fueron adquiridas o trasferidas por separado en los formatos hdf y tiff para diferentes fines. La base de datos permitió seleccionar la estación de interés que tiene un código específico, el producto correspondiente, el formato y delimitar las fechas (Figura 33).

Chargement d'images à partir d'une base ORE

Fichier

Choix d'une station: 17050001      Choix d'une date début: 25-01-2009 00:00:00      Choix d'une date fin: 27-12-2009 00:00:00

Choix d'un produit: MOD09A1      Choix d'un format d'image: GeoHdf     

43 images      taille totale (compactée, en Mo): 18,861     

Station	Date	Produit	Satellite	Version	Taille(Mo)	Format
17050001	25-01-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,473	hdf
17050001	02-02-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,417	hdf
17050001	10-02-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,464	hdf
17050001	18-02-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,452	hdf
17050001	26-02-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,443	hdf
17050001	06-03-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,455	hdf
17050001	14-03-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,501	hdf
17050001	22-03-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,455	hdf
17050001	30-03-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,449	hdf
17050001	07-04-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,467	hdf
17050001	15-04-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,466	hdf
17050001	23-04-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,457	hdf
17050001	01-05-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,446	hdf
17050001	09-05-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,458	hdf
17050001	17-05-2009 00:00:00	MOD09A1	101	005	0,423	hdf

**Figura 33.** Planilla de información requerida para descargar las imágenes MODIS de la base de datos específicos GETMODIS del Proyecto HYBAM.

### 3.5.2. Pos-tratamiento de las imágenes

La reflectancia de las imágenes fue obtenida mediante el software MOD3R (MODIS *River Reflectance Retrieval*) desarrollado por el IRD (Institut de Recherche pour le Developement). Este software permite la extracción rápida de la reflectancia de las series temporales de imágenes MODIS. Como resultado fueron reportados los valores de reflectancia de las cinco bandas, su desviación estándar, el tamaño del cluster, la variación del ángulo zenit, el valor del efecto “sunglint”, el porcentaje de pixel válido y el control de la calidad. Un ejemplo de los parámetros considerados en el procesamiento se presenta en la tabla 11.

**Tabla 11. Sumario de parámetros considerados en el procesamiento del software MOD3R**

<b>Productos</b>	MYD09A1
<b>Imágenes</b>	17050001
<b>Latitud</b>	-55.467
<b>Longitud</b>	-2.117
<b>Tamaño del Buffer</b>	1
<b>Nº de imágenes tratadas</b>	377
<b>Fecha de la primera imagen</b>	04/07/2002
<b>Fecha de la última imagen</b>	22/09/2010
<b>Fecha de cálculo</b>	Tue Oct 12 20:01:38 BRT2010

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE DATOS

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL FITOPLANCTON

La caracterización del fitoplancton fue estudiada mediante los análisis de la composición y frecuencia relativa. Es importante recalcar que estos resultados permiten mostrar de manera general, la gran variabilidad de la composición espacial y temporal del fitoplancton en las várzeas y lagos de la Amazonía, pero no representan una visión completa puesto que un estudio más detallado está fuera del objetivo de esta tesis. Los resultados corresponden a dos periodos, un periodo de aguas altas (Mayo-2008) y un periodo de descenso de las aguas (Octubre-2008) ambos en la época seca. En la primera campaña se consideraron un total de 13 estaciones de muestreo, de las cuales cinco correspondieron a lagos de la várzea de Curuai, cuatro a la várzea de Janauacá, dos al lago Parú, una al lago Mirituba, y una al lago Manacapuru (Tabla 12). La segunda campaña presentó mucha dificultad para ingresar a las várzeas debido a la baja profundidad. Por lo tanto, solo fue posible realizar muestreos en el sector este del lago Grande de Curuai considerando cuatro estaciones de muestreo y solo dos estaciones en la várzea de Janauacá (Tabla 12).

**Tabla 12. Datos de campañas y estaciones de muestreo para el análisis de la composición y frecuencia relativa del fitoplancton**

<b>Campañas (Fechas)</b>	<b>N°</b>	<b>Lugar</b>	<b>Estaciones de muestreo</b>
<b>10-29/05/2008</b>	1	Várzea de Curuai	5
		Várzea de Janauacá	4
		Lago Manacapuru	1
		Lago Mirituba	1
		Lago Parú	2
<b>4-15/10/2008</b>	1	Várzea de Curuai	3
		Várzea de Janauacá	3

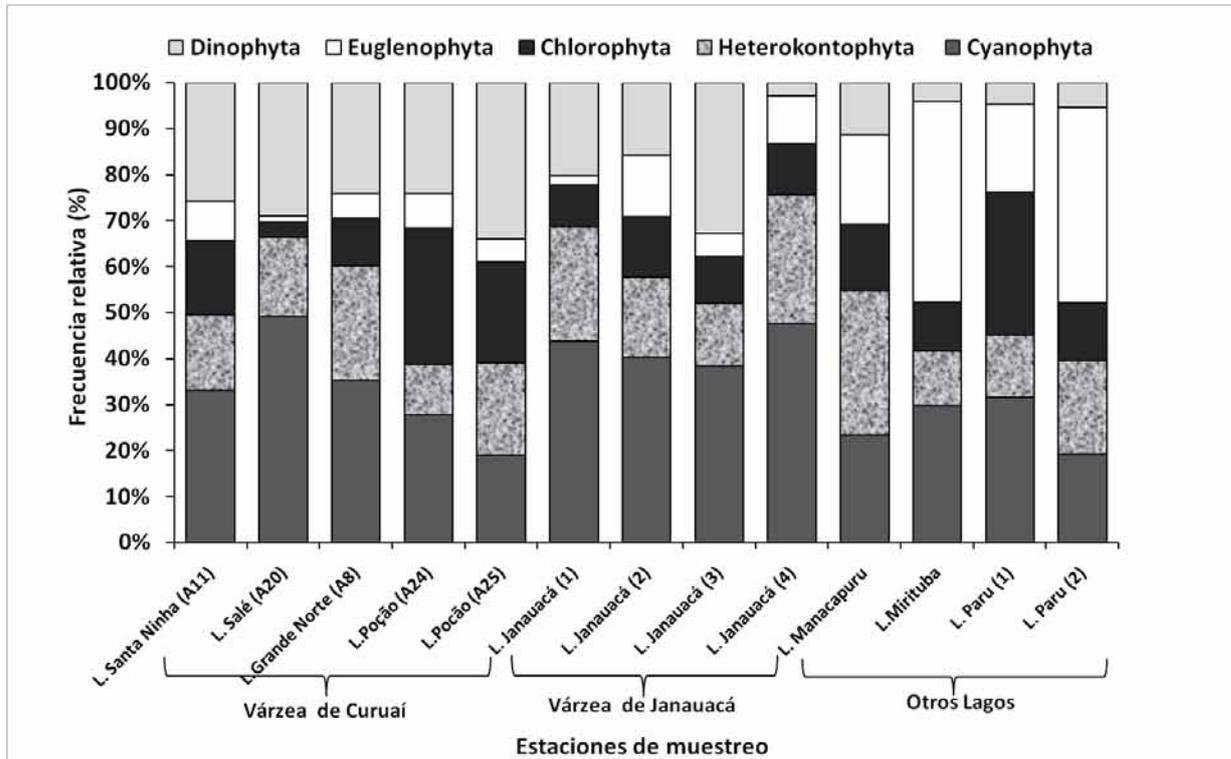
### 4.1.2 Composición y frecuencia relativa del fitoplancton en las várzeas y otros lagos

La comunidad fitoplanctónica que caracteriza a las várzeas y a otros lagos de la Amazonía central, fue compuesta por las divisiones algales: Cyanophyta, Chlorophyta, Heterokontophyta, Dinophyta y Euglenophyta, representada en porcentajes de frecuencia relativa. Estos datos corresponden a las campañas de Mayo y Octubre realizadas en 2008 (Figuras 34 y 35). En ambas campañas, las várzeas de Curuai y Janauacá se caracterizaron por la dominancia de la división Cyanophyta, también conocidas como Cianobacterias que estuvieron presentes en todas las estaciones de muestreo. En la campaña de Mayo-2008, que corresponde al periodo de aguas altas, la dominancia de este grupo en la várzea de Janauacá fue del 39 al 49% en relación a los demás grupos y se presentó en todas las estaciones de muestreo. En la várzea de Curuai la dominancia fue variable del 35 al 50% predominando en los sectores norte (A08 y A11) y oeste (A20) (Figura 34). Contrariamente en los otros lagos su presencia (20 al 30%) fue menos relevante respecto a los otros grupos (Figura 34).

La división Chlorophyta también estuvo presente en ambas campañas, así como en todas las estaciones de muestreo de las várzeas y otros lagos, si bien su dominancia fue de media a baja, presentó la mayor diversidad de géneros y especies a diferencia de las demás divisiones. La contribución de este grupo fue variable en todos los ambientes, relativamente homogénea con valores del 8 al 12% en la várzea de Janauacá, de menos del 5% en el lago Salé hasta el 30% en el lago Poção (A24) de la Várzea de Curuai y en el Lago Paru (1) (Figura 34). La división Heterokontophyta, representada por las diatomeas fue dominante en los lagos con características de aguas negras, como el extremo norte en la várzea de Janauacá estación 4 (LF10) con un 25% y en el Lago Manacapuru con un 30%. En la várzea de Curuai los porcentajes observados fueron de 11 a 25%.

A diferencia de las anteriores, las Euglenophyta tuvieron una contribución importante en los lagos más que en la várzeas. Valores de más del 40% fueron observados en los lagos Mirituba y Paru (1). En las várzeas se registraron contribuciones menores al 9 % en los lagos Santa Nina y Poção (A24) y del 5% en los lagos Grande do Poção (A08) y Poção norte (A25) pero la más baja contribución fue registrada en el lago Salé (1%) de la várzea de Curuai y en las estaciones 1 (LF03) y 3 (LF08) de la várzea de Janauacá (Figura 34). En relación a las Dinophyta, su aporte fue importante, principalmente en las várzeas, siendo considerado el

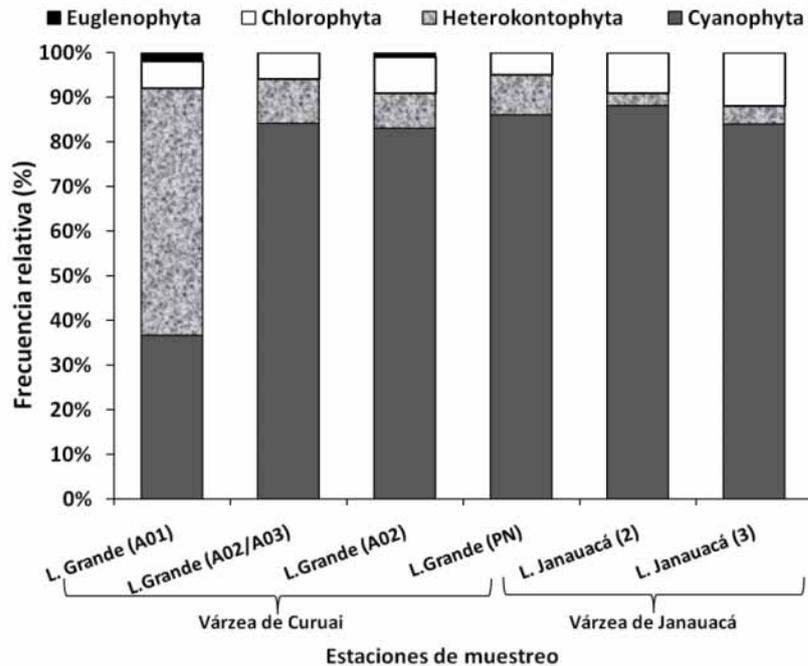
mayor aporte después de las Cyanophyta. Cabe destacar, que solamente la estación 4 (LF10) en la várzea de Janauacá, fue la excepción, ya que registró el menor porcentaje. En el resto de los lagos, la contribución no fue mayor del 10%, valor máximo registrado en el lago Manacapuru (Figura 34).



**Figura 34.** Frecuencia relativa de las divisiones algales presentes en los lagos de las várzeas de Curuai, Janauacá y de los lagos Parú, Mirituba y Manacapuru de la Amazonia Central en la (Periodo de aguas altas). Campaña Mayo-2008.

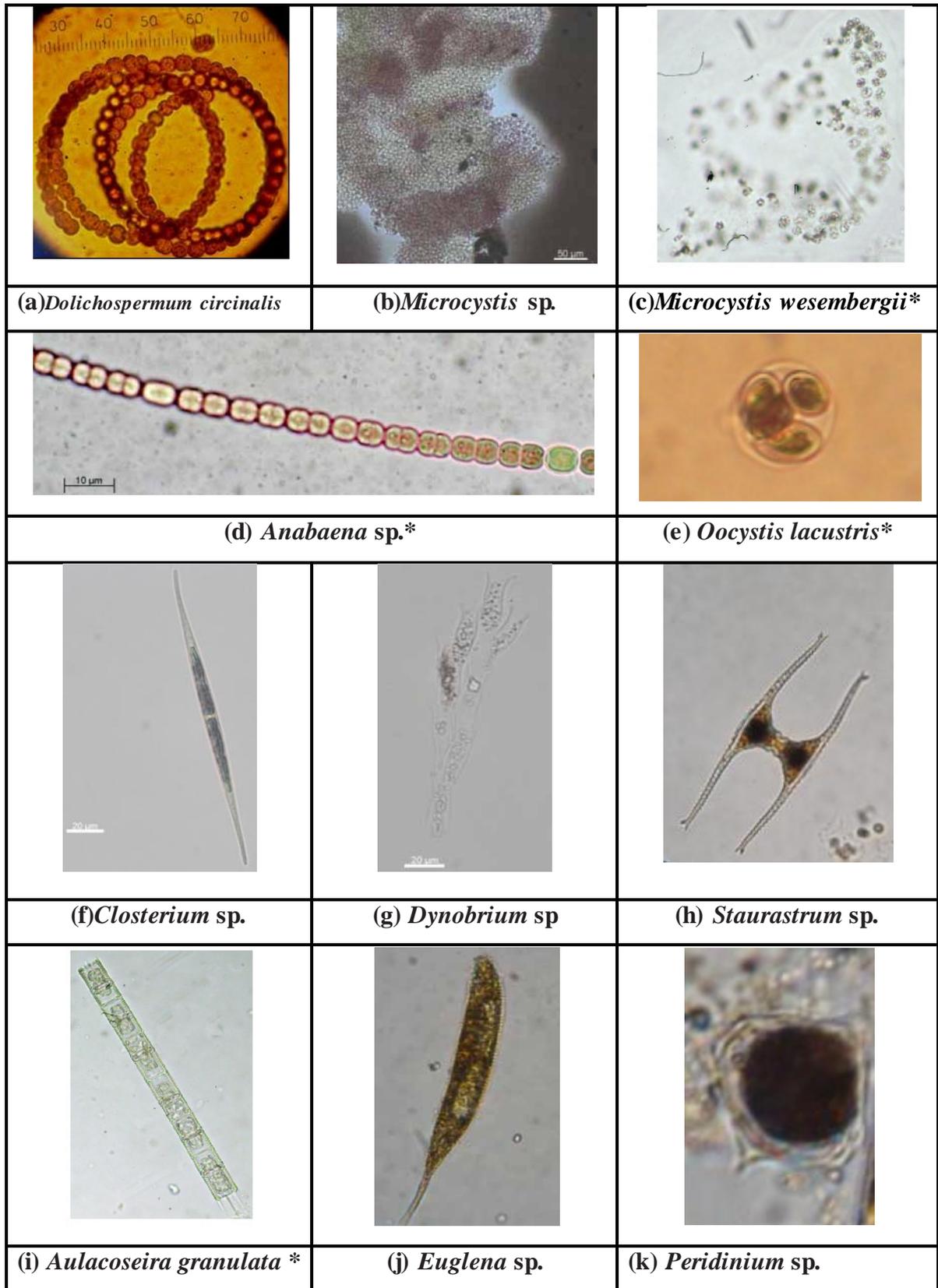
En la campaña de Octubre-2008 que corresponde al periodo de descenso de las aguas, la dominancia de Cianobacterias, caracterizó las dos várzeas con más del 80% de frecuencia relativa. Exceptuando la estación (A01) en el sector este de la várzea de Curuai que presentó un porcentaje menor (38%) en relación a las demás estaciones (Figura 35). Los dos ambientes presentaron floraciones que dieron una coloración verde-azul intensa al agua pese a la elevada concentración de materia en suspensión. Por otro lado, las diatomáceas representadas por la división Heterokontophyta fueron importantes en segundo lugar, con un porcentaje superior al 50% observado en la estación (A01) del lago Grande de Curuai y porcentajes menores al 10% que fueron observados en las demás estaciones, registrándose los más bajos en las estaciones 2 (LF07) y 3 (LF08) de la várzea de Janauacá. Las algas verdes estuvieron presentes en porcentajes inferiores al 12% en las seis estaciones de muestreo (Figura 35). Los euglenoideos (Euglenophyta) fueron reportados en proporciones reducidas solamente en las estaciones

(A01) y (A02) del lago Grande de Curuai en porcentajes menores al 2% (Figura 35). Las Dinophyta estuvieron ausentes tanto en las várzeas como en los demás lagos durante este periodo.



**Figura 35.** Frecuencia relativa de las divisiones algales presentes en los lagos de las várzeas de Curuai y Janauacá. (Periodo de descenso de las aguas). Las estaciones (A02/A03) y PN corresponden a estaciones nuevas en la várzea de Curuai. Campaña Octubre-2008

Dentro de la división Cyanophyta fueron identificadas las siguientes especies representativas dominantes: *Dolichospermum circinalis* (Figura 36 a), *Dolichospermum spiroides*, *Microcystis wesenbergii* (Figura 36 b), *Planktolyngbya limnetica*, *Microcystis* sp. (Figura 36 c), *Anabaena* sp. (Figura 36 d). En las algas verdes (Chlorophyta) se destacaron como representativas las siguientes: *Oocystis lacustris* (Figura 36 e), *Closterium* sp. (Figura 36 f) *Dynobrium* sp. (Figura 36 g), *Staurastrum* sp. (Figura 36 h). La división Euglenophyta estuvo bien representada por los géneros *Euglena* (Figura 36 j) y *Phacus*. En tanto que dentro de la división Heterokontophyta, *Aulacoseira granulata* (Figura 36 i) fue la más representativa en ambas campañas realizadas y estuvo presente en todas las estaciones de muestreo. Varias especies pertenecientes a los géneros *Peridinium* (Figura 36 k) y *Glenodinium* de la división Dinophyta, no fueron identificadas pero estuvieron presentes en las várzeas, y en menor proporción en los demás lagos durante la campaña de mayo 2008, a diferencia de la campaña de octubre del mismo año donde estuvieron ausentes.



**Figura 36.** Principales Géneros y especies de algas de las várzeas y lagos de la Amazonía Central (a)(b)(c) y (d) Cyanophyta (e) (f) (g) y (h) Chlorophyta (i) Heterokontophyta (j) Euglenophyta. (k) Dinophyta. Fotos: C.Mendoza y (\*) Arantes Gama & Nogueira (2008).

Se encontró similitud entre los resultados de las campañas de Mayo-2008 (Figura 34) y Junio-2002 (Figura 26 Capítulo 3) que corresponden al periodo de aguas altas. En ambas campañas las divisiones Chlorophyta, Cyanophyta, Heterokontophyta y Euglenophyta estuvieron presentes y los grupos dominantes fueron Chlorophyta y Cyanophyta.

La comparación de los valores de frecuencia relativa dió valores aproximados en las dos campañas. Por ejemplo, la división Chlorophyta presentó una frecuencia relativa de 35% en Junio de 2002 mientras que en Mayo de 2008 reportó un valor de 30%. Para la división Cyanophyta, la frecuencia relativa fue de 23,19% en la campaña de Junio-2002 y en la campaña de Mayo 2008, los valores reportados fueron de 28% en el Lago Poção y de 35% en el Lago Grande do Poção. La frecuencia relativa de la división Heterokontophyta fue de 16,66% (Junio-2002) y en Mayo de 2008 los valores reportados fueron menores al 25%. Para la división Euglenophyta se reportó una frecuencia relativa de 7,14% en Junio-2002 y frecuencias relativas menores a 9% fueron reportadas en Mayo-2008.

Los resultados de la campaña de Mayo-2008 (periodo de aguas altas) comparados con los correspondientes a la campaña de Marzo-2004 (periodo de crecida de las aguas) (Arantes Gama & Nogueira, 2008) (Figura 27 Capítulo 3), presentaron similitudes en cuanto a la presencia de las divisiones Chlorophyta, Cyanophyta y Euglenophyta en la várzea de Curuaí. En este caso, la división Chlorophyta fue la más representativa en el Lago Grande de Curuaí y las divisiones Cyanophyta y Euglenophyta fueron representativas en el lago Poção.

Por el contrario, las campañas anteriores desarrolladas en los periodos de descenso de las aguas y aguas bajas no presentaron información referente al fitoplancton, por lo tanto no fue posible hacer comparaciones de los resultados para esta época.

Sin embargo, en base a los datos obtenidos de las campañas anteriores (2000-2005) y de las últimas campañas (2008-2010), se puede concluir que durante los periodos de crecida de las aguas y de aguas altas la diversidad de algas fitoplanctónicas se incrementa en las várzeas y lagos aledaños, mientras que durante el periodo de descenso de las aguas, la diversidad tiende a disminuir fuertemente, existiendo además una predominancia de un solo grupo como el de las cianobacterias (Cyanophyta) que se presentan formando *blooms* o floraciones algales.

### 4.1.3 Biomasa fitoplanctónica

Los resultados corresponden a cuatro campañas de muestreo realizadas entre los años 2008 a 2010, destacándose un periodo de aguas altas (Mayo-2008), (Junio-Julio 2009 y Julio-2010) y un periodo de descenso de las aguas (Octubre-2008) en época seca. Fueron consideradas de tres a siete estaciones de muestreo en la várzea de Curuaí, tres a cinco en la várzea de Janauacá, ocho en los demás lagos y una estación en el río Amazonas (Tabla 13). La biomasa fitoplanctónica representada en términos de concentración de clorofila-a fue variable estacionalmente. Las mayores concentraciones de 40 a más de 140  $\mu\text{g/L}$  fueron registradas en la época de descenso de las aguas en las dos várzeas (Tabla 13). Durante la campaña de Octubre-2008, el acceso a las várzeas fue muy complicado debido a la baja profundidad, por lo que solamente fueron consideradas seis estaciones de muestreo de las cuales tres correspondieron a la várzea de Curuaí y tres a la várzea de Janauacá.

Las demás campañas efectuadas en la época de aguas altas, presentaron variaciones interanuales. El año 2008 los valores promedio de concentraciones de clorofila-a variaron de 3,2  $\mu\text{g/L}$  en el río Amazonas a 25,4  $\mu\text{g/L}$  en la várzea de Janauacá. El año 2009, caracterizado por un evento de máxima inundación en la zona presentó los valores promedio de concentraciones de clorofila-a bajos tanto en las várzeas como en los lagos, mientras que el mismo periodo el siguiente año los valores promedio en la várzea de Curuaí se incrementaron (Tabla 13).

La comparación de los datos de las campañas (2008-2010) (Tabla 13) con los de las campañas anteriores (2000-2005) (Tabla 5 Capítulo 3) para los mismos periodos en la várzea de Curuaí, presentó similitudes en cuanto a la presencia de concentraciones medias a altas de clorofila-a en el periodo de aguas altas y elevadas concentraciones de clorofila-a (> a 100  $\mu\text{g/L}$ ) en los periodos de descenso de las aguas. A su vez los datos de las campañas (2000-2005) permitieron confirmar y completar los valores respecto a elevadas concentraciones de clorofila-a y los datos de las últimas campañas, que además incluyen otros lagos, permitieron completar los datos referidos a concentraciones de clorofila-a en diferentes tipos de agua (Várzea de Janauacá, Lago Camaçari, Lago Manacapuru). Por otro lado, los datos promedio de las concentraciones de materia en suspensión (MES) (Tabla 13), mostraron variaciones entre campañas, concentraciones bajas en el periodo de aguas altas y elevadas

concentraciones en el periodo de descenso de las aguas. Estos datos serán utilizados para interpretar su relación con la concentración de clorofila-a.

**Tabla 13. Datos de campañas y estaciones de muestreo para el análisis de la biomasa fitoplanctónica y valores promedio de materia en suspensión Campañas 2008 a 2010.**

Campañas (Fechas)	N°	Lugar	Estaciones de muestreo	Valor Prom. [Chl a](µg/L)	Valores máx. y mín. [Chl a](µg/L)	Valor Prom. [MES] (mg/L)
23-26/5/2008	1	Várzea de Curuaí	7	6,9	13,2 - 2,11	10,2
		Várzea de Janauacá	4	25,4	39,1 - 18,2	5,8
		Lago Manacapuru	3	35,1	35,3 - 5	25,1
20-23/5/2008		Lago Mirituba	1	6,4	s/d	13,1
		Río Amazonas	1	3,2	1,32-0	s/d
10-15/10/2008	1	Várzea de Curuaí	3	113,4	142 - 97	181
		Várzea de Janauacá	3	67	94,5 - 45	36,3
23-25/6/2009	1	Várzea de Janauacá	5	6	20 - 1,3	7,8
29-30/6/2009		Lago Mirituba	1	2,47	s/d	34
29-30/6/2009		Lago Camaçari	3	4,25	6 - 2,05	8,2
4-6/7/2009		Várzea de Curuaí	3	5,45	8 - 3,3	11,1
4-6/7/2010	1	Várzea de Curuaí	5	14,3	27 - 7,2	23
8-9/9/2010	1	Várzea de Curuaí	2	38,15	52 - 24,3	23
9-9/9/2010	1	Lago Mirituba	1	26,3	s/d	s/d

\*s/d sin datos

## 4.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DEL FITOPLANCTON

### 4.2.1 Comportamiento general de la reflectancia

La reflectancia representa el cociente entre la luz solar incidente y la luz reflejada por la columna de agua. Así, mientras el agua absorbe más la luz, la reflectancia disminuye. Las propiedades de absorción y dispersión de la luz varían en función de las concentraciones de los componentes y de la longitud de onda. En la Figura 37 se presentan dos espectros de reflectancia radiométrica. La curva de picos menos pronunciados corresponde al río Amazonas, mientras que la curva de picos más acentuados correspondería a la várzea. Las dos curvas presentan espectros de reflectancia típicos de las aguas amazónicas, caracterizadas por altas concentraciones de partículas y material orgánico. En el dominio ultra violeta y azul (350 – 450 nm) se observan valores de reflectancia bajos, seguidos por un aumento fuerte de la reflectancia entre 450 y 550 nm. Entre las longitudes de onda 550 nm y 700 nm, se pueden notar diferencias entre los dos espectros. La curva del río presenta una variación limitada en cuanto a la curva de la várzea, que muestra fuertes disminuciones en dos longitudes de onda:

620 nm y 680 nm. En el infrarrojo, entre 700 y 950 nm, la reflectancia disminuye mucho, presentando solamente un pico secundario a los 800 nm.

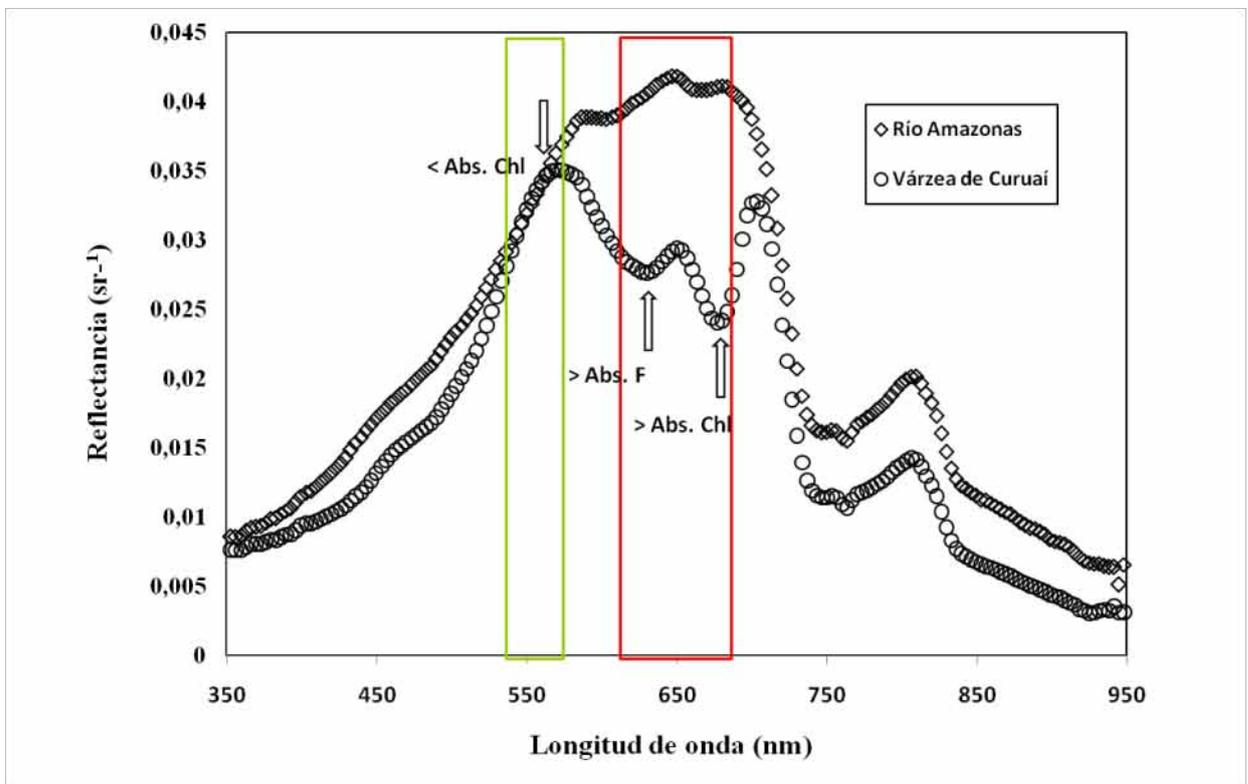
Estos patrones son típicos de las propiedades ópticas de los componentes activos en la columna de agua y del agua propiamente dicha. La materia orgánica disuelta (MOD) muestra fuertes propiedades de absorción de la luz pero es conocida por no reflejarla. La absorción fue descrita como una función exponencial negativa que va decreciendo desde el ultra-violeta (UV) hasta el visible. La parte ópticamente activa de la materia orgánica disuelta (MOD) es denominada materia orgánica disuelta coloreada (CDOM en inglés). Este material está presente en altas concentraciones en las aguas amazónicas debido a la contribución de los suelos con cobertura vegetal de la región. El material particulado inorgánico presenta propiedades ópticas más complejas, pudiendo absorber la luz y reflejarla al mismo tiempo. Las propiedades de absorción son muy parecidas a las de la materia orgánica disuelta, con un exponencial negativo que va decreciendo desde el ultra-violeta hasta el visible. Se considera que la absorción del material particulado es poco perceptible en el infrarrojo próximo.

Los pigmentos fotosintéticos presentan propiedades de absorción, complejas y más contrastadas que la MOD y la materia en suspensión. La clorofila-a presenta valores máximos de absorción en las longitudes de onda 440 nm y 680 nm y un valor mínimo de absorción en 560 nm, lo que explica la presencia del color verde de la mayoría de las algas. Los otros pigmentos registran diversos patrones de absorción en el visible. Los feopigmentos en particular tienen una banda de absorción muy distinta en 620 nm que es propia de esta clase de pigmentos. La combinación de las propiedades ópticas de la MOD, de la materia en suspensión y de los pigmentos permite interpretar la Figura 37.

Las bandas ultra-violeta y azul del espectro están dominadas por los procesos de absorción de la luz por la MOD y la materia en suspensión, lo que imposibilita la detección de los patrones de absorción de luz por los pigmentos. Entre las longitudes de onda de las bandas verde y roja (550-700 nm), las aguas del río que presentan bajas concentraciones de algas muestran valores de reflectancia altos, debido a la reflexión de la luz por las partículas y cuyo nivel está correlacionado con la concentración de materia en suspensión. Las aguas de la várzea muestran un comportamiento marcado por los patrones de absorción de los pigmentos: el valor mínimo de absorción de la clorofila-a en 560 nm explica la fuerte reflectancia en esta longitud de onda y el valor máximo de absorción en 680 nm se nota en la fuerte disminución local de la reflectancia. La disminución de la reflectancia en 620 nm se explica por la absorción de los feopigmentos (Figura 37). En la banda del infrarrojo, las propiedades ópticas son

dominadas por la fuerte capacidad de las moléculas de agua de absorber la luz. Esta absorción aumenta desde la banda del rojo hasta el infrarrojo medio, donde la luz está totalmente absorbida por las moléculas de agua. Este aumento sufre unas ligeras variaciones, lo cual explica el aumento de la reflectancia a los 800 nm (Figura 37), debido a una disminución local de la absorción del agua (Kirk, 2004).

En base a las diferencias observadas entre 550 y 700 nm, se seleccionaron las bandas verde y roja de MODIS (que corresponden a las bandas 2 y 3) para determinar y cuantificar la presencia de condiciones eutróficas o de floraciones de algas. Se efectuó la división de la banda verde entre la banda roja (cociente), obteniéndose como resultado una relación que debería ser proporcional a la concentración de pigmentos (ver sección 4.3).



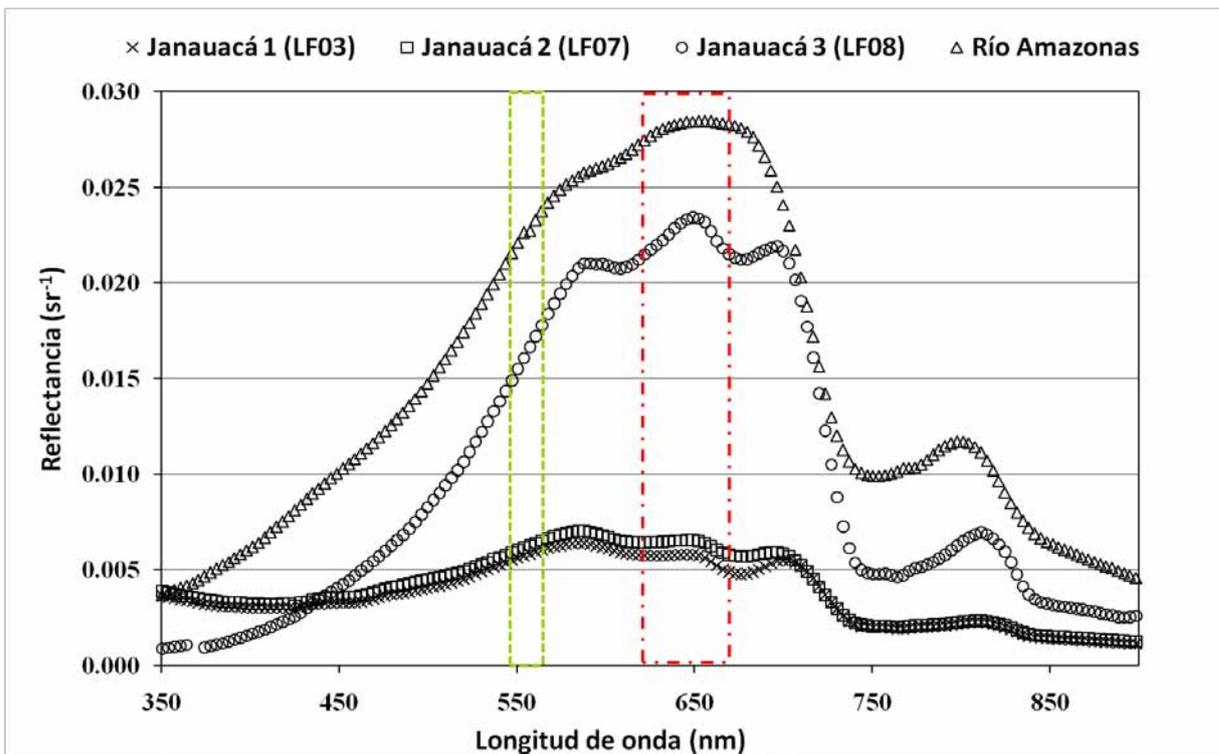
**Figura 37.** Espectros de reflectancia radiométrica que muestran los valores máximos y mínimos de absorción de los pigmentos fotosintéticos en las bandas 2 (verde) y 3 (roja) de MODIS, en la várzea de Curuai y en el río Amazonas.

#### 4.2.2 Variación estacional de la reflectancia

De las campañas realizadas en 2008, los espectros de reflectancia presentados en las Figuras 38 y 39 corresponden a las estaciones de muestreo en la várzea de Janauacá y las

Figuras 40 y 41 corresponden a los espectros de reflectancia en la várzea de Curuaí, en dos periodos. En la várzea de Janauacá se consideraron tres estaciones y una en el río Amazonas en el periodo de aguas altas (Mayo) (Figura 38), mientras que en el periodo de aguas bajas el acceso fue limitado, abarcando solamente dos estaciones y el río (Figura 39).

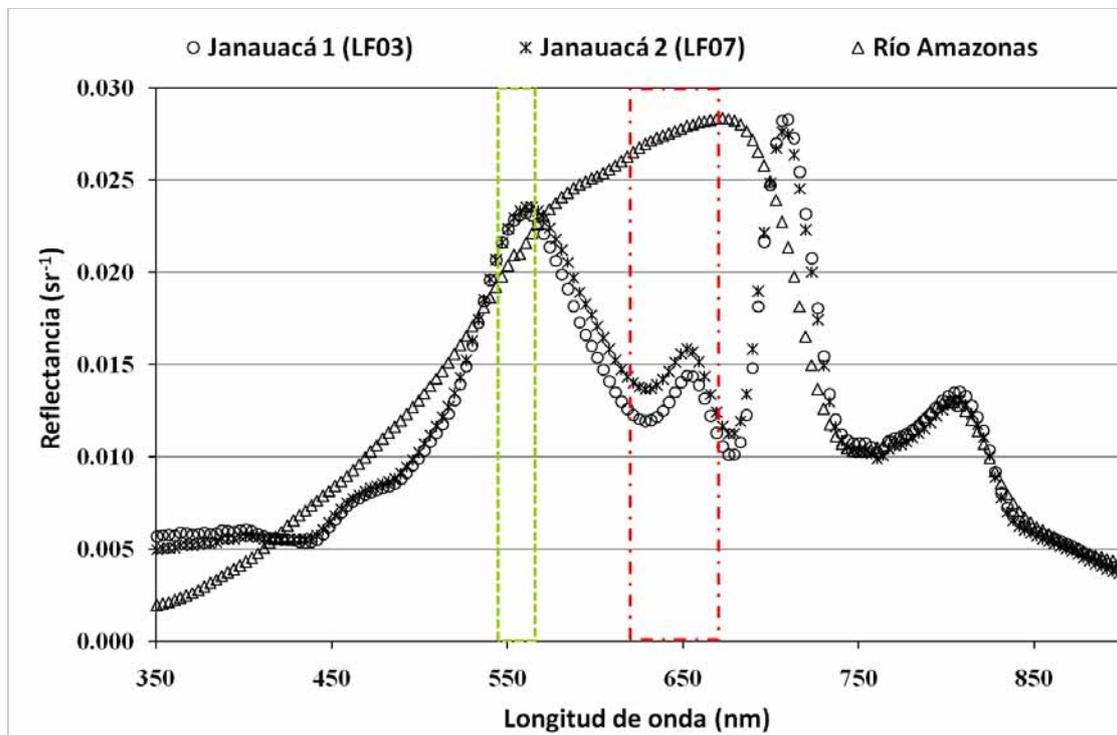
Entre los dos periodos hidrológicos la reflectancia del río fue mayor que en los lagos con un patrón constante, sin picos de absorción notables entre 550 y 700 nm. Durante el mes de mayo (Figura 38) las curvas de reflectancia de la várzea se distinguen de las curvas del río a medida que se apartan del curso del mismo. En la estación Janauacá 3 (LF08) cercana a un canal de ingreso de las aguas del río Amazonas, en el periodo de aguas altas, las aguas demuestran un patrón próximo al del río, pero con picos de absorción (620 nm y 680 nm) de los pigmentos fotosintéticos característicos (ver sección anterior). En las estaciones de muestreo Janauacá 1 (LF03), Janauacá 2 (LF07) localizadas en la región central del lago, los picos de absorción se mantienen poco pronunciados y los valores de reflectancia son menores (Figura 38).



**Figura 38.** Espectros de reflectancia radiométrica estimados en la várzea de Janauacá y en el río Amazonas en el periodo de aguas altas (Campaña Mayo-2008).

Para el caso del periodo de descenso de las aguas correspondiente al mes de octubre (Figura 39), las curvas de reflectancia de dos estaciones de muestreo Janauacá 1 (LF03) y Janauacá 2 (LF07) siguieron un mismo patrón presentando una curva característica de la

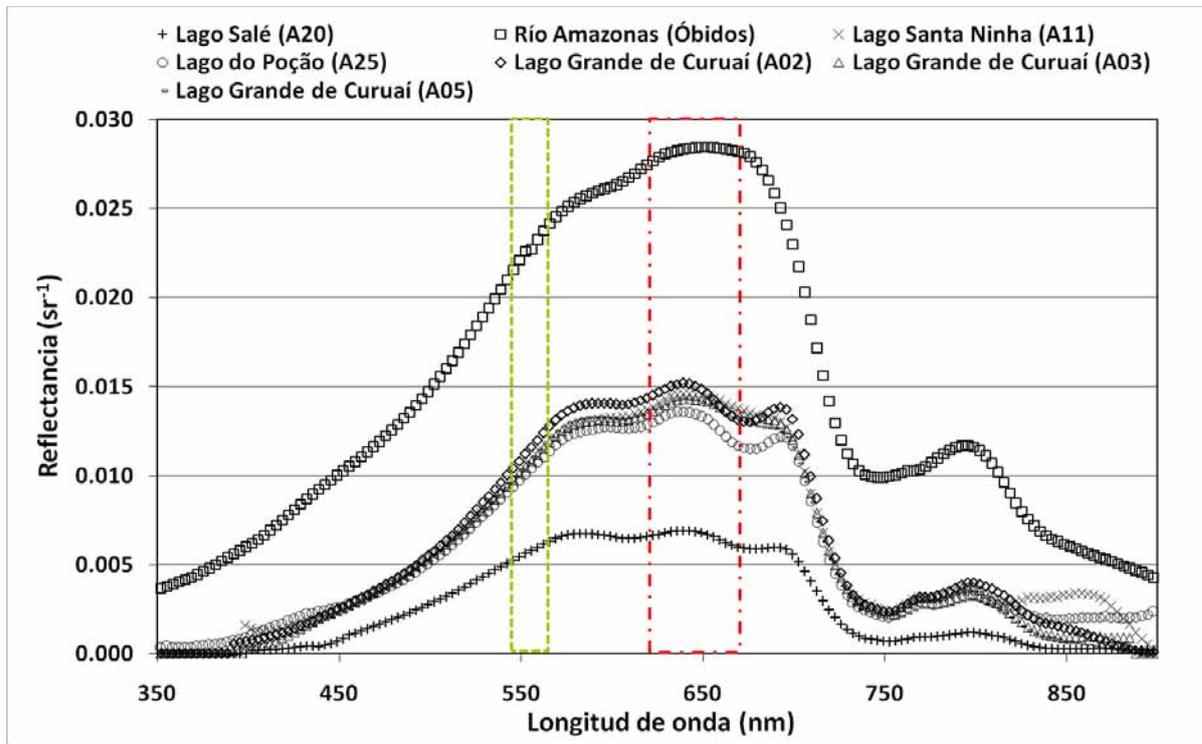
reflectancia del grupo de las cianobacterias, determinado por Peña-Martínez & Domínguez-Gómez (2006) para embalses de regiones templadas. Las curvas presentaron valores máximos de absorción de los feopigmentos y de la clorofila-a en la banda roja (3) con menor reflectancia y valores mínimos de absorción de la clorofila-a con mayor reflectancia en la banda verde (2). Se puede notar un aumento fuerte de la reflectancia en 700-705 nm que corresponde a otro valor mínimo de absorción de la clorofila-a pero que no está localizado en el alcance de las bandas MODIS. La curva de reflectancia del río fue mayor en relación a las demás estaciones de muestreo y no presentó picos de absorción en las respectivas bandas, siendo esta curva característica de la presencia de materia en suspensión en las aguas del río (Figura 39).



**Figura 39.** Espectros de reflectancia radiométrica estimados en la várzea de Janauacá y en el río Amazonas, en el periodo de descenso de las aguas (Campaña Octubre-2008).

En la várzea de Curuai, las curvas de reflectancia durante el mes de Mayo fueron similares (Figura 40), con valores máximos y mínimos de absorción de los pigmentos fotosintéticos en las bandas 2 (verde) y 3 (roja). En general, los picos fueron poco pronunciados y los valores de reflectancia fueron menores en los lagos Santa Ninha (A11), Poção (A25) y el lago Grande de Curuai con las estaciones (A02), (A03) y (A05). La menor reflectancia fue observada en el lago Salé (A20). Contrariamente la curva de reflectancia del

río fue mayor en relación a las curvas de reflectancia de la várzea y no se presentaron picos de absorción (Figura 40).

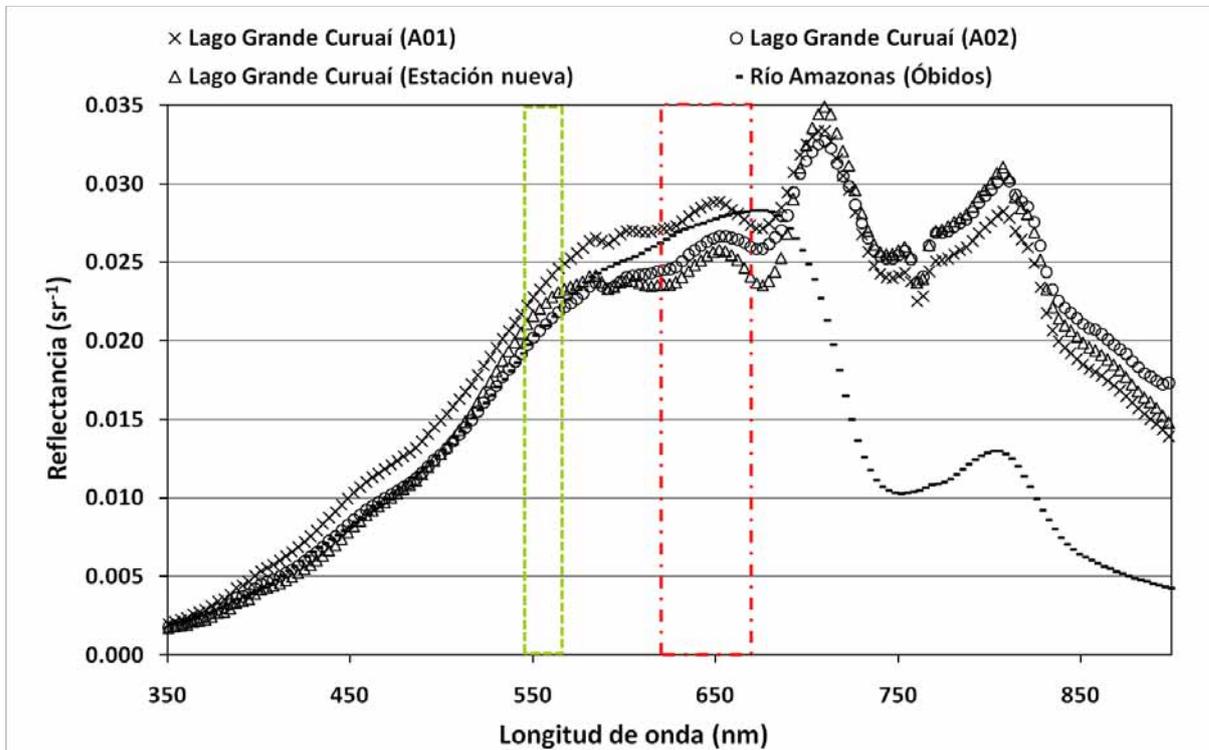


**Figura 40.** Espectros de reflectancia radiométrica estimados en la várzea de Curuai y en el río Amazonas (Óbidos), en el periodo de aguas altas. Campaña Mayo-2008.

En el periodo de descenso de las aguas (Octubre), el ingreso a la várzea fue restringido debido a la baja profundidad de las aguas. Las curvas de reflectancia de tres estaciones (A01, A02 y una estación nueva) correspondientes al lago Grande de Curuai fueron diferentes a las del río desde 550 nm hasta el Infrarrojo (Figura 41). En el lago las curvas no presentaron patrones de absorción de la clorofila-a ni de los feopigmentos entre 560 y 620 nm. Así los picos característicos de los pigmentos fueron poco pronunciados en la banda verde. En 670-680 nm se nota que la reflectancia disminuye en las aguas de la várzea, lo cual corresponde a un máximo de absorción de la clorofila-a (ver sección anterior).

En la várzea de Curuai, para el mismo periodo se observó un fuerte aumento de la reflectancia en 700-705 nm debido a un mínimo local de absorción de la clorofila-a (Figura 41). Este máximo de reflectancia parece ser el mejor indicador de la presencia del fitoplancton para este tipo de aguas. Las curvas de reflectancia en el infrarrojo de las aguas de la várzea presentaron valores muy altos que señalan concentraciones elevadas de materia en suspensión.

A pesar de las elevadas concentraciones de clorofila-a (Tabla 12) se puede notar en este caso, que las bandas verde y roja no presentan una diferencia significativa. Lo cual se interpreta como la consecuencia de altas concentraciones de materia en suspensión (> 250 mg/L) que dominan las propiedades ópticas y “encubren” las variaciones espectrales debido a los pigmentos.

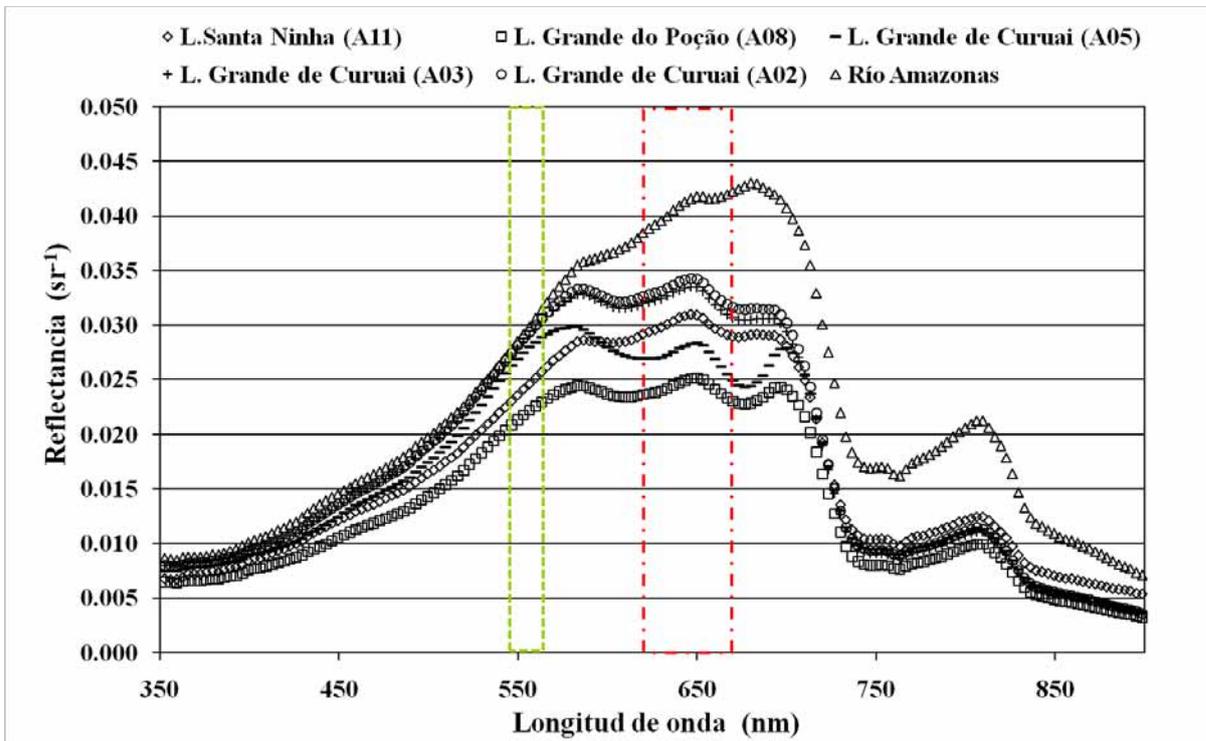


**Figura 41.** Espectros de reflectancia radiométrica estimados en la várzea de Curuai, en el sector este o Lago Grande de Curuai y en el río Amazonas (Óbidos), en el periodo de descenso de las aguas. Campaña de Octubre-2008.

De esta manera, se puede afirmar que para altas concentraciones de materia en suspensión, la detección de la presencia de clorofila-a debe ser monitoreada usando longitudes de onda mayores en la región del máximo de absorción de clorofila en la banda roja (680 nm) y del mínimo de absorción a 700 nm, que siguen persistiendo incluso para altas concentraciones de materia en suspensión. Estas longitudes de onda no están cubiertas por los sensores MODIS pero lo están por el sensor MERIS (Bandas 8 y 9 respectivamente).

Los espectros de reflectancia presentados en la Figura 42 corresponden a los lagos o estaciones de muestreo que conforman la várzea de Curuai y el río Amazonas. Los lagos pertenecen a regiones diferentes de la várzea. El lago Santa Nina (A11) localizado al norte, es característico de la región de lagos que mantienen contacto directo con el río Amazonas, la estación (A08) que forma parte del lago Grande do Poço y se encuentra en la zona central de

la várzea y el lago Grande de Curuaí (sector este) que comprende las estaciones de muestreo A02, A03 y A05.



**Figura 42.** Espectros de reflectancia radiométrica estimados en lagos de la várzea de Curuaí y en el río Amazonas (Óbidos), periodo de aguas altas. Campaña de Julio-2010.

Durante este periodo las curvas de reflectancia siguen una misma tendencia presentando los valores máximos y mínimos de absorción de los pigmentos fotosintéticos en las bandas 2 y 3 (verde y roja). Se presentaron picos poco pronunciados y valores de reflectancia mayores en el lago Grande de Curuaí, en las estaciones A02, A03 que se encuentran cercanas a los canales Foz norte y Foz sur que mantienen contacto con el río Amazonas.

Un comportamiento similar fue observado en el lago Santa Nina (A11). La estación A05 del lago Grande de Curuaí, así como la estación A08 en lago Grande do Poção presentaron picos de absorción de clorofila-a más acentuados en la banda roja (3) con disminución de la reflectancia en relación a las otras estaciones de muestreo. Por el contrario, el valor de reflectancia más alto en la banda roja (3) correspondió al río Amazonas y la curva se caracterizó por la ausencia de picos de absorción en las respectivas bandas.

## 4.2.3 Coeficiente de atenuación

### 4.2.3.1 La atenuación de la luz en la columna de agua

Analizando la disminución de la luz incidente en función de la profundidad en la columna de agua registrada por el sensor de irradiancia ( $W/m^2/sr$ ), se puede entender como la luz penetra el medio acuático. Estos datos pueden ser utilizados para definir: 1) la profundidad de la zona eufótica y 2) la homogeneidad de la columna de agua o la presencia de capas diferenciadas. La disminución de la luz incidente se evalúa utilizando el coeficiente de atenuación definido por la siguiente ecuación:

$$K_d = 1/(z_2 - z_1) \ln [E_d(z_1)/E_d(z_2)] \text{ 1/m}$$

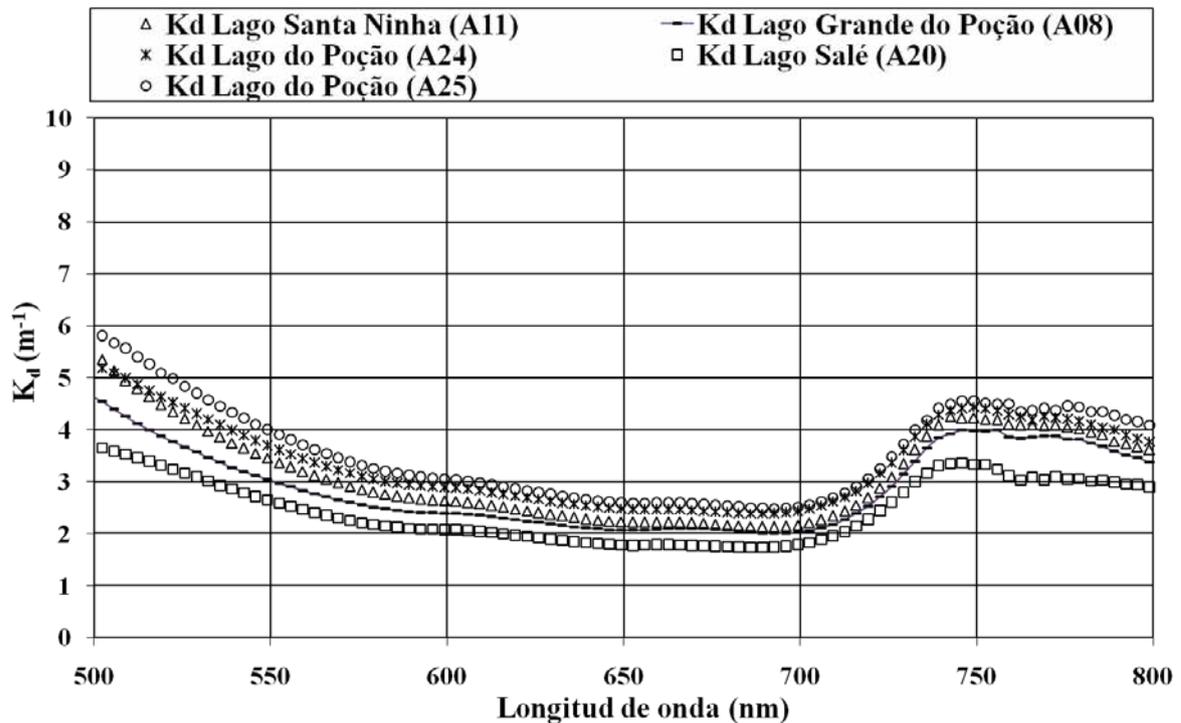
Donde:  $z_1$  y  $z_2 = 2$  profundidades;  $E_d$  = irradiancia descendente

El  $K_d$  aumenta con los procesos de absorción y dispersión y varía de 0 al infinito (de totalmente claro a totalmente opaco). Se utilizan las siguientes “reglas” para relacionar el  $K_d$  con el disco de Secchi (ZSd) y con la zona eufótica (zona donde el 99% de la luz incidente sobre la superficie está atenuada). Así se estima que el  $K_d = 1.44/ZSd$  y  $Z_{eufótica} = 4.6/K_d$  (Kirk, 1994).

La Figura 43 muestra los valores promedio para cinco lagos de la campaña realizada en Mayo de 2008, de los cuales dos lagos, el lago Santa Ninha y el lago Salé (estaciones A11 y A20) se caracterizan por su conexión directa con el río Amazonas, mientras que los tres lagos restantes se encuentran distanciados del río principal. Las curvas presentaron un comportamiento espectral del coeficiente de atenuación o  $K_d$  similar entre todos los lagos, que corresponde al comportamiento observado en aguas de tipo II (Morel & Prieur 1977; Morel 1980) sedimentos + materia orgánica disuelta coloreada (CDOM).

Se observó que la atenuación fue menor en el rango comprendido entre 650 y 700 nm y se incrementó en el ultravioleta y azul, debido a la atenuación de la luz por el CDOM y en el infrarrojo por la atenuación del agua. Si comparamos varios lagos dentro de esta observación, los valores del coeficiente de atenuación estuvieron entre  $1,7 \text{ m}^{-1}$  en el lago Salé (A20),  $2,04 \text{ m}^{-1}$  en el lago Grande do Poço (A08),  $2,14 \text{ m}^{-1}$  en el lago Santa Ninha (A11),  $2,4 \text{ m}^{-1}$  en el

lago do Poção (A24) y  $2,5 \text{ m}^{-1}$  en el lago do Poção (A25). Es decir que los lagos cercanos o conectados al río principal a través de canales presentaron un coeficiente de atenuación bajo y una amplia zona eufótica, a diferencia de los lagos distantes donde el coeficiente de atenuación aumentó. En todos los casos (Figura 43) se notó que la zona “ópticamente activa” varía de 2,7 m a 1,84 m lo que asegura que el fondo de los lagos (mayor a 7 m en promedio) no tiene influencia óptica sobre la respuesta espectral medida por satélite.

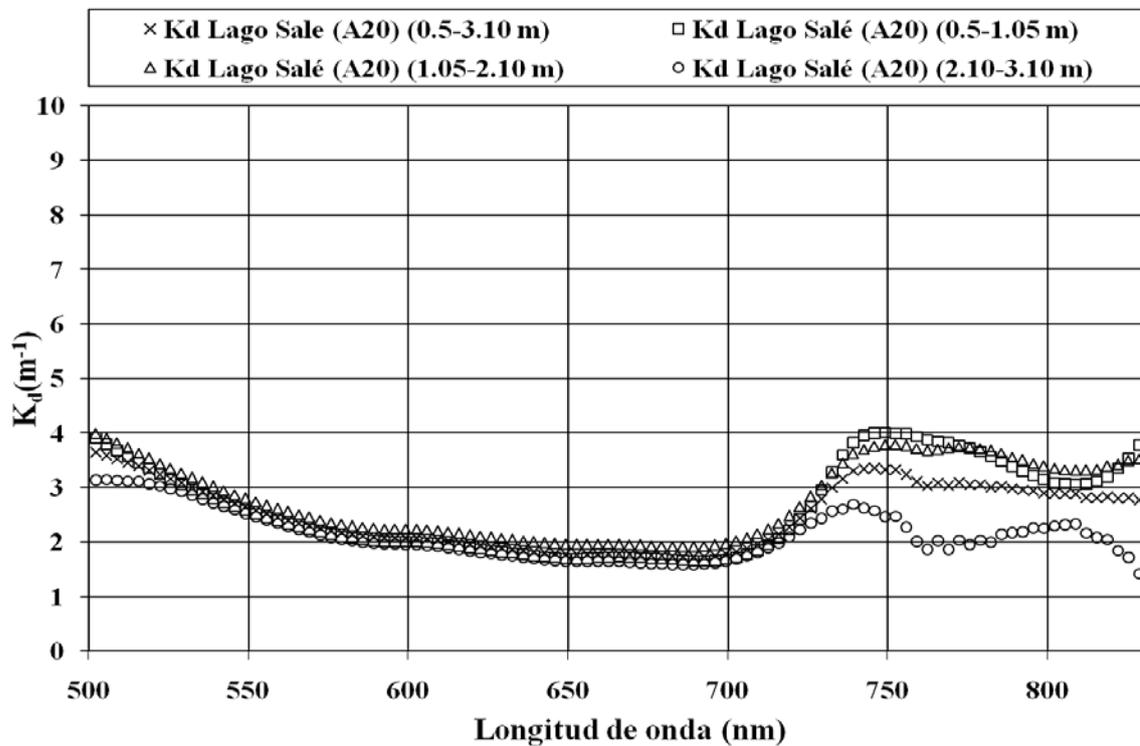


**Figura 43.** Valores promedio del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) en lagos de diferentes regiones de la várzea de Curuaí. Campaña de Mayo-2008.

#### 4.2.3.2 Variación vertical del coeficiente de atenuación en la zona eufótica

Después de analizar la variación espacial del coeficiente de atenuación entre los lagos, analizamos la homogeneidad de la zona eufótica calculando el  $K_d$  para varias capas intermedias desde la superficie. La Figura 44 presenta los valores del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) tomando como ejemplo el lago Salé (A20) de la várzea de Curuaí. El coeficiente de atenuación fue determinado en la columna de agua en cada nivel de profundidad correspondiente a 1 m abarcando un total de 3 m.

El coeficiente de atenuación no presentó variaciones significativas (<10%) en la mayor parte del espectro (500-750 nm) lo cual indicaría que la zona eufótica es bastante homogénea en relación a las propiedades de absorción y difusión de la luz. Diferencias más fuertes se notaron en los extremos de los espectros (350-500 nm y 750-900 nm) donde el coeficiente de atenuación parece aumentar en función de la profundidad. Sin embargo este incremento es un artificio creado por la fuerte atenuación de la luz en estas longitudes de onda que hace que la medición del sensor de irradiancia se encuentre en el nivel de ruido debajo del primer metro de profundidad.



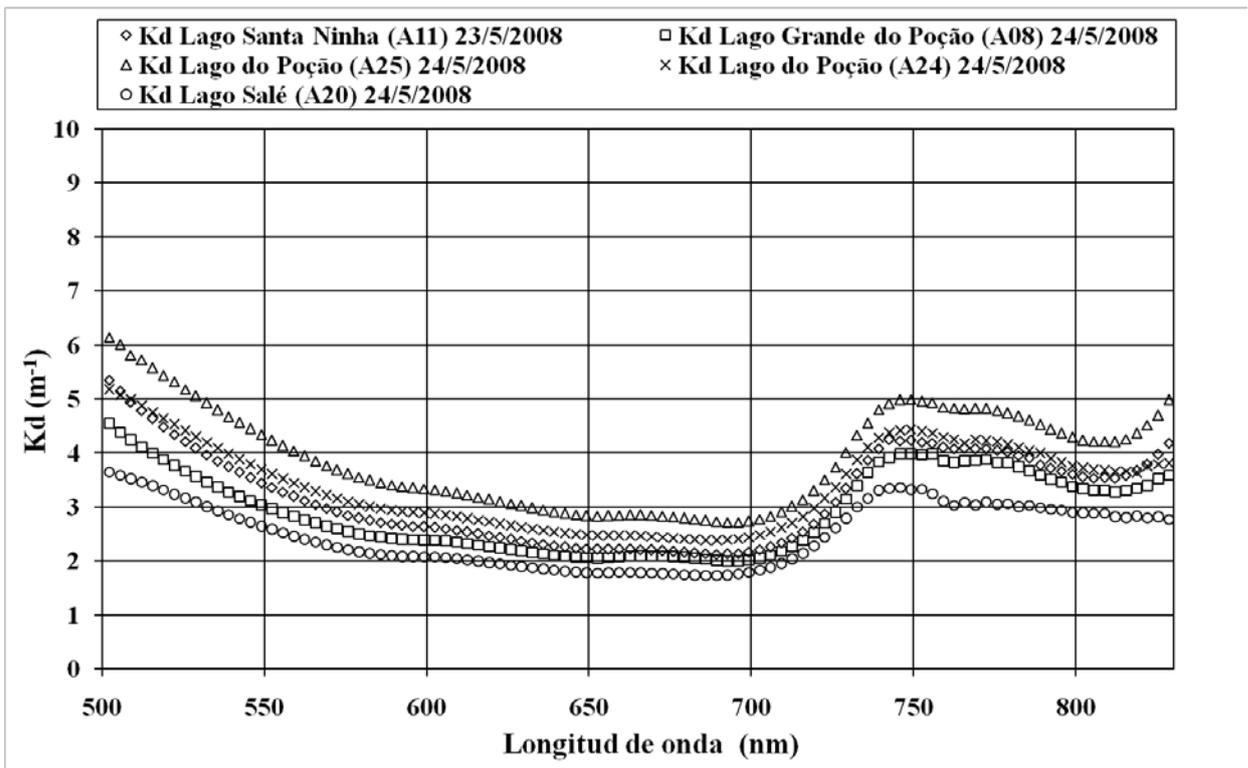
**Figura 44.** Valores del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) en diferentes profundidades y valor promedio en el lago Salé (A20) de la várzea de Curuaí. Campaña de Mayo-2008.

Se puede notar que las longitudes de onda del verde y rojo penetran más en la columna de agua y están más disponibles para la fotosíntesis. Las radiaciones ultravioleta y azul desaparecen luego del primer metro de la columna de agua debido a los intensos procesos de absorción de la luz por la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM en inglés) y las moléculas de agua. A causa de la profundidad delimitada de la zona eufótica (1 a 3 metros) podemos notar una homogeneidad de las propiedades ópticas, confirmando que las mediciones realizadas por satélite de la superficie del agua representan bien las propiedades generales de los cuerpos acuáticos en la zona eufótica.

### 4.2.3.3 Comparación del coeficiente de atenuación en várzeas y otros lagos

Comparando los valores del coeficiente de atenuación entre lagos de las várzeas de Curuaí, Janauacá y los lagos Cabaliana y Manacapuru, cercanos a la várzea de Janauacá, observamos que para el periodo de aguas altas, las curvas del coeficiente de atenuación siguen una tendencia similar (Figuras 45 y 46) característica de las aguas de tipo caso II (sedimentos en suspensión + materia orgánica disuelta coloreada o CDOM).

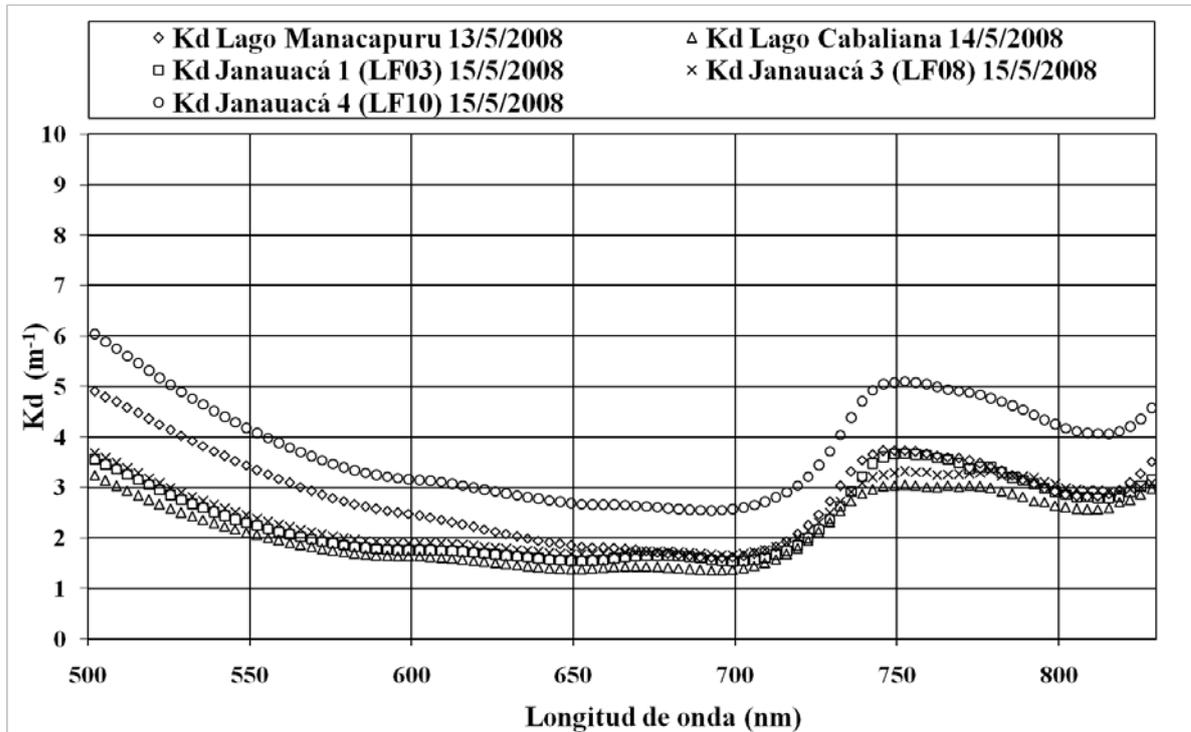
La atenuación fue menor en el rango comprendido entre 650 y 700 nm. En la várzea de Curuaí se observó que la atenuación registró valores menores en los lagos Salé (A20) y Grande do Poção (A08), donde la zona eufótica no pasó de 1,7 m para las longitudes de onda del verde hasta el rojo (Figura 45).



**Figura 45.** Valores promedio del coeficiente de atenuación (Kd) en lagos de la várzea de Curuaí. Campaña de Mayo-2008.

En la várzea de Janauacá y otros lagos (Figura 46) se observó que la atenuación fue menor en el lago Cabaliana, seguido de las estaciones Janauacá 1 (LF03) y Janauacá 3 (LF08) localizadas en el área central de la várzea, donde la zona eufótica parece llegar a los 3 m de

profundidad. Por otra parte, la atenuación en Janauacá 4 (LF10) fue mayor en el infrarrojo pero resultó insignificante debido al nivel muy bajo de luz en la hora de la medición (15h40) (Figura 46).



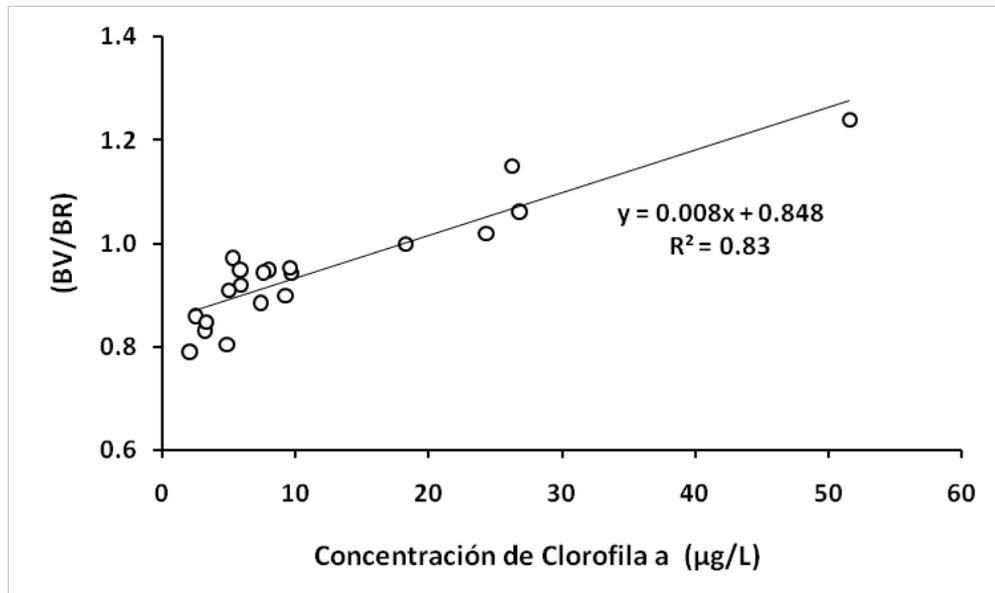
**Figura 46.** Valores promedio del coeficiente de atenuación ( $K_d$ ) en lagos de la várzea de Janauacá y otros lagos (Manacapuru y Cabaliana). Campaña de Mayo-2008.

### 4.3 SIMULACIÓN DE LOS DATOS SATELITALES

#### 4.3.1 Clorofila-a

Dada la correlación aparente entre el cociente (banda 2/banda 3) de las bandas MODIS (Figuras 38 a 42) y la concentración de clorofila-a, los datos de las campañas realizadas en los años 2008 (mayo), 2009 (junio) y 2010 (julio) en la várzea de Curuaí y lagos próximos como Mirituba y Camaçari fueron combinados para encontrar el algoritmo que relaciona los dos tipos de datos. Así fueron utilizados los datos radiométricos de campo adquiridos con una resolución espectral de 2 nm para simular las bandas de los sensores MODIS y MERIS, teniendo en cuenta la posición del centro de las bandas satelitales y sus anchos de banda respectivos.

La Figura 47 muestra que existe una relación lineal altamente significativa entre el cociente de las bandas MODIS (verde/roja) y la concentración de clorofila-a para un rango grande de valores de clorofila. Los valores del cociente aumentan a medida que incrementan los valores de concentración de clorofila-a. Según el criterio del cociente de bandas aplicado, los valores de la razón  $\geq 1$  que indican la condición eutrófica o la presencia de floraciones o *blooms* de algas corresponden a las concentraciones de clorofila-a  $\geq 18 \mu\text{g/L}$ . Por lo tanto, a partir de este valor puede determinarse la presencia de floraciones de algas en los diferentes lagos. Cabe recalcar que el año 2008 fue considerada solamente la campaña efectuada en mayo (aguas altas), debido a que la campaña de octubre (aguas bajas) presentó datos de elevadas concentraciones de materia en suspensión, lo cual imposibilitó las estimaciones de la concentración de clorofila-a, mediante la razón de bandas verde (545-565 nm) y roja (620-670 nm) de MODIS (ver sección 4.2.2 Figura 41).

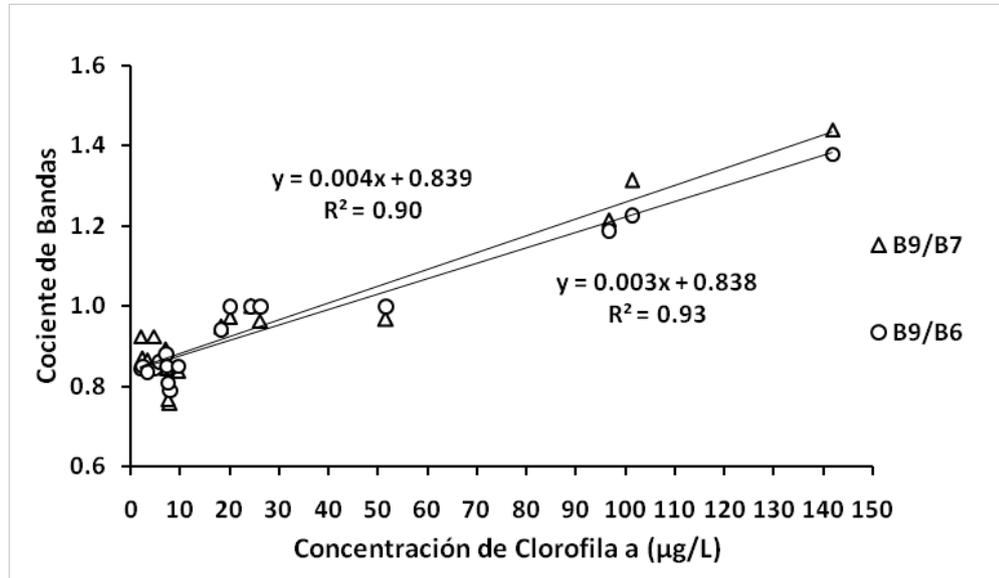


**Figura 47.** Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de clorofila-a en la várzea de Curuaí y en los lagos Mirituba y Camaçari. Campañas de Mayo-2008, Junio-2009 y Julio-2010.

Para el caso de la simulación de bandas MERIS y su relación con la concentración de clorofila-a en la várzea de Curuaí (Figura 48), los datos analizados corresponden a las campañas Octubre-2008, Junio-2009 y Julio-2010. De igual forma, la presencia de floraciones de algas fue determinada por el valor de la razón  $\geq 1$  correspondiendo dicho valor a una concentración de clorofila-a de  $\geq 20 \mu\text{g/L}$ .

Se estimaron dos relaciones referidas a la combinación de tres bandas de 10 nm de ancho cada una B9/B7 y B9/B6 (B9: centro de banda 705 nm, B7: centro de banda 665 nm y

B6: centro de banda 620 nm). Dichas relaciones son altamente significativas. A diferencia del caso anterior de MODIS esta simulación permitió detectar elevadas concentraciones de clorofila-a también en ambientes con elevadas concentraciones de materia en suspensión, como el caso de la campaña realizada en Octubre-2008 (descenso de las aguas) debido a la alta resolución espectral de MERIS en el rojo e infrarrojo.

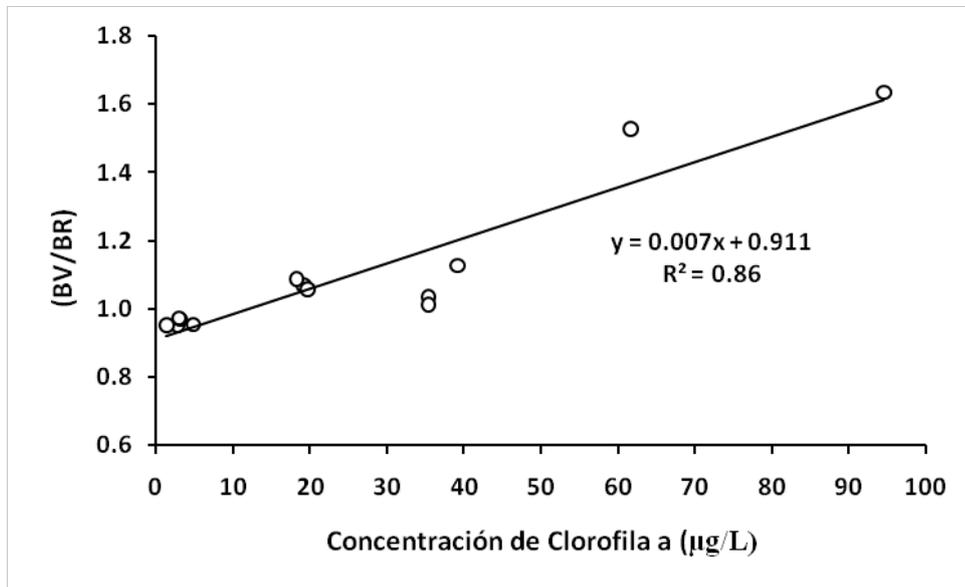


**Figura 48.** Simulación de Bandas MERIS vs. Concentración de clorofila-a en laVárzea de Curuai y en los lagos Mirituba y Camaçari. Campañas de Octubre-2008, Junio-2009 y Julio-2010.

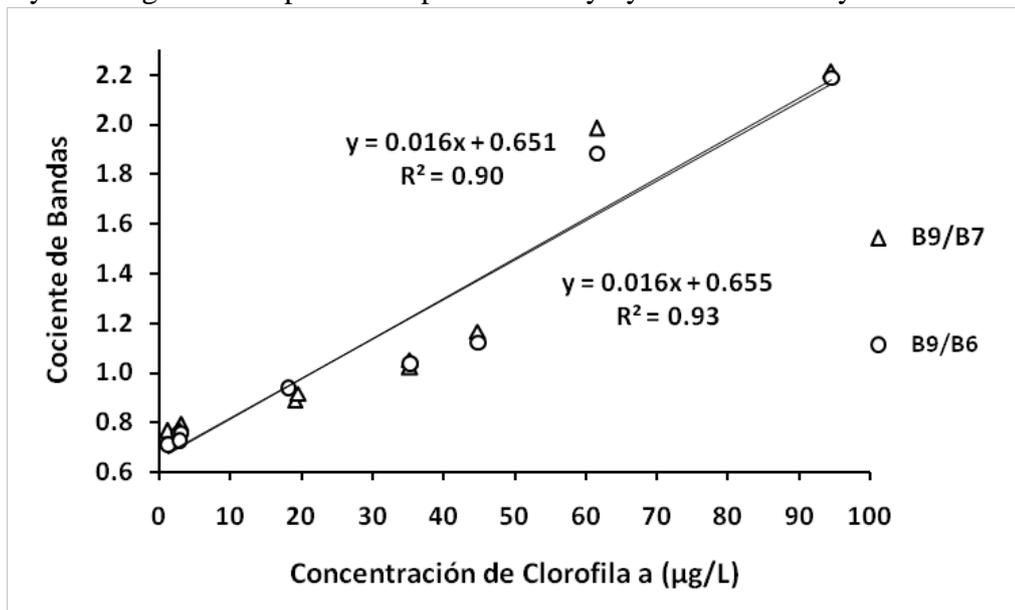
Para el caso de la várzea de Janauacá y el lago Manacapuru, la simulación de bandas MODIS y su relación con la concentración de clorofila-a fue realizada con datos de las campañas Mayo, Octubre-2008 y Junio-2009. La presencia de floraciones de algas determinada por el valor de la relación entre bandas  $\geq 1$  correspondió al valor de concentración de clorofila-a de  $\geq 18 \mu\text{g/L}$ . La correlación de datos fue significativa (Figura 49) lo que indica que la simulación con bandas MODIS puede ser una buena opción para estudiar estos lagos aún tratándose de ambientes con predominancia de aguas negras (Lago Manacapuru) o de una várzea de dimensiones menores (várzea de Janauacá) comparada con la várzea de Curuai. Por otro lado, la relación para las aguas negras difiere un poco de la relación para las aguas blancas, lo cual puede ser causado por la mayor presencia de material orgánico disuelto en las primeras.

La Figura 50 presenta la simulación de bandas MERIS y su relación con la concentración de clorofila-a de las campañas Mayo y Octubre-2008 y Junio-2009, en la várzea de Janauacá y el lago Manacapuru. Esta simulación fue analizada a través de dos

relaciones de bandas (B9/B7 y B9/B6) y fueron altamente significativas. La presencia de floraciones de algas determinada por el valor de la relación  $\geq 1$  correspondió al valor de concentración de clorofila-a de  $\geq 35\mu\text{g/L}$ .



**Figura 49.** Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de clorofila-a en la Várzea de Janauacá y en el lago Manacapurú. Campañas de Mayo y Octubre-2008 y Junio-2009.

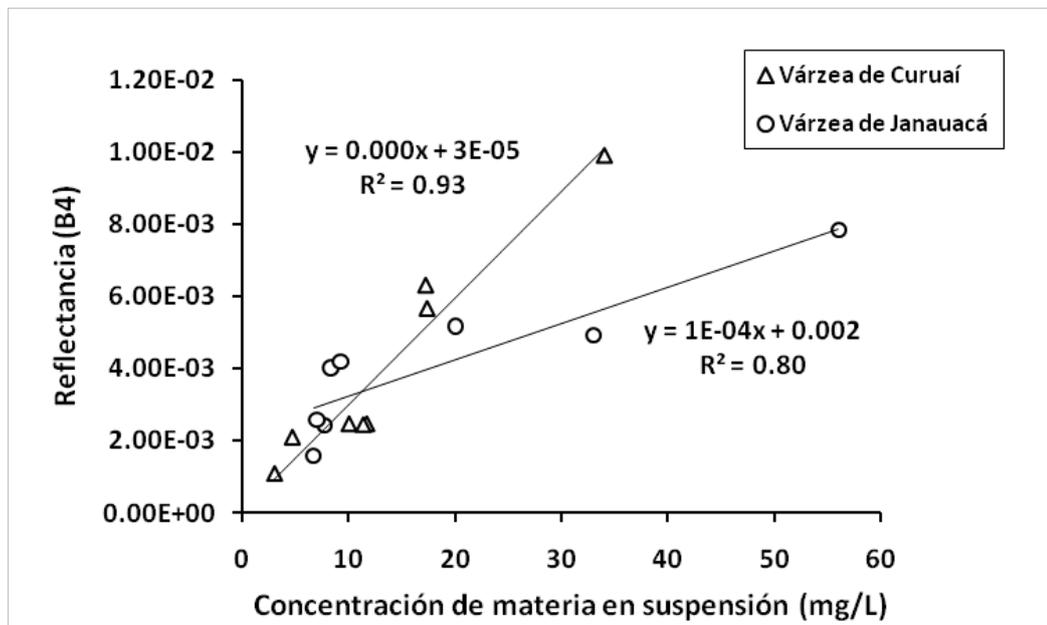


**Figura 50.** Simulación de bandas MERIS vs. Concentración de clorofila-a en la Várzea de Janauacá y el lago Manacapurú. Campañas de Mayo y Octubre-2008 y Junio-2009.

Cabe mencionar que la simulación de bandas MERIS es adecuada para el estudio de lagos con diferentes tipos de aguas, debido a su alta resolución espectral, ya que fue posible detectar elevadas concentraciones de clorofila-a en el lago Manacapurú (aguas negras) en el periodo de aguas altas (Mayo) y en la várzea de Janauacá (aguas claras y blancas) en el periodo de descenso de las aguas (Octubre).

### 4.3.2. Materia en suspensión (MES)

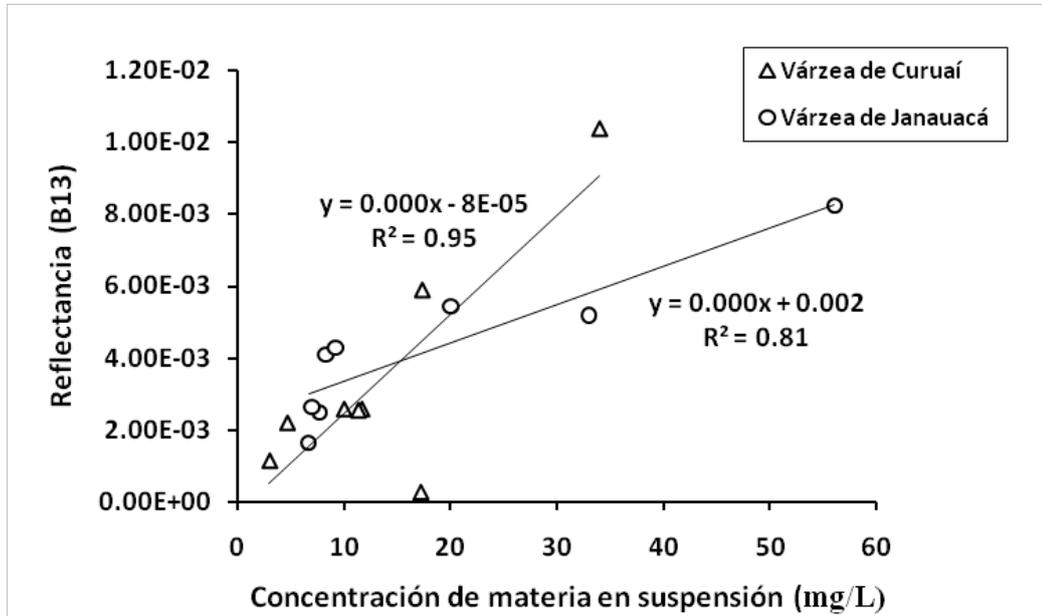
Para el caso de la materia en suspensión las simulaciones de bandas MODIS (Banda 4: 841-876 nm; 35 nm de ancho de banda) y bandas MERIS (Banda 13: 865 nm centro de la banda; 20 nm ancho de banda) en la várzea de Curuai y lagos próximos, corresponden a datos analizados procedentes de la campaña Junio-2009. Para la várzea de Janauacá las simulaciones MODIS (Banda 4) y MERIS (Banda 13) corresponden a las campañas Octubre-2008 y Junio-2009. Pese a que, en el periodo de aguas altas (Junio) las concentraciones de materia en suspensión registraron valores de <40 mg/L, es decir concentraciones bajas, ambas simulaciones fueron adecuadas para la detección de materia en suspensión. En ambas várzeas las relaciones fueron altamente significativas (Figuras 51 y 52).



**Figura 51.** Simulación de bandas MODIS vs. Concentración de materia en suspensión en las Várzeas de Curuai (Campaña de Junio-2009) y de Janauacá (Campañas de Octubre-2008 y Junio-2009).

Cabe destacar, que en la várzea de Janauacá las concentraciones de materia en suspensión fueron menores a 60 mg/L encontrándose valores entre 20 a 56 mg/L este último valor fue reportado para el canal de conexión con el río, en el periodo de descenso de la aguas (Octubre). Por otro lado, valores de 7 a 9,2 mg/L fueron obtenidos para el periodo de aguas altas (Junio). Por lo tanto ambas simulaciones fueron apropiadas para la detección de materia en suspensión. La diferencia entre las regresiones de aguas blancas y negras, debe ser

interpretada como la consecuencia de la presencia de altas concentraciones de materia orgánica en las aguas negras (encima de los 30 mg/L). En este caso, la materia en suspensión en la várzea de Janauacá podría tener como origen mayormente el propio fitoplancton, lo que no sucedería en la várzea de Curuaí donde el material mineral predomina en la fracción en suspensión.



**Figura 52.** Simulación de bandas MERIS vs. Concentración de materia en suspensión en las Várzeas de Curuaí (Campaña de Junio y Julio-2009) y de Janauacá (Campañas de Octubre-2008 y Junio-2009).

### 4.3.3 Estado Trófico

A partir de la determinación de concentraciones de clorofila-a mediante la simulación de datos satelitales, fue posible obtener indicadores del estado trófico para los lagos de la várzea de Curuaí y lagos próximos (Lago Parú, Lago Mirituba y Lago Camaçari) utilizando un índice de estado trófico adaptado para ambientes tropicales.

#### 4.3.3.1 Cálculo del Índice de Estado Trófico

Fue utilizado el índice de estado trófico de Carlson (1977) modificado por Toledo (1990) IET(m) para lagos tropicales (Tabla 14). Los valores del índice fueron estimados a

partir de los valores de concentración de clorofila-a como única variable de diagnóstico (Lamparelli, 2004) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{IET}(\text{Cl}) = 10\{6 - [(2,04 - 0,695 \ln \text{Cl}) / \ln 2]\}$$

Donde: Cl= concentración de la clorofila-a en µg/L, ln = logaritmo natural

Para la clasificación de este índice fueron adoptados los criterios o rangos fijos y las condiciones de estado tróficopropuestos para el IET(m) conforme a la Tabla 14. Las condiciones de estado trófico fueron determinadas relacionando los valores calculados por el IET(m) comparadas con los datos de satélite.

**Tabla 14. Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (IETm)**

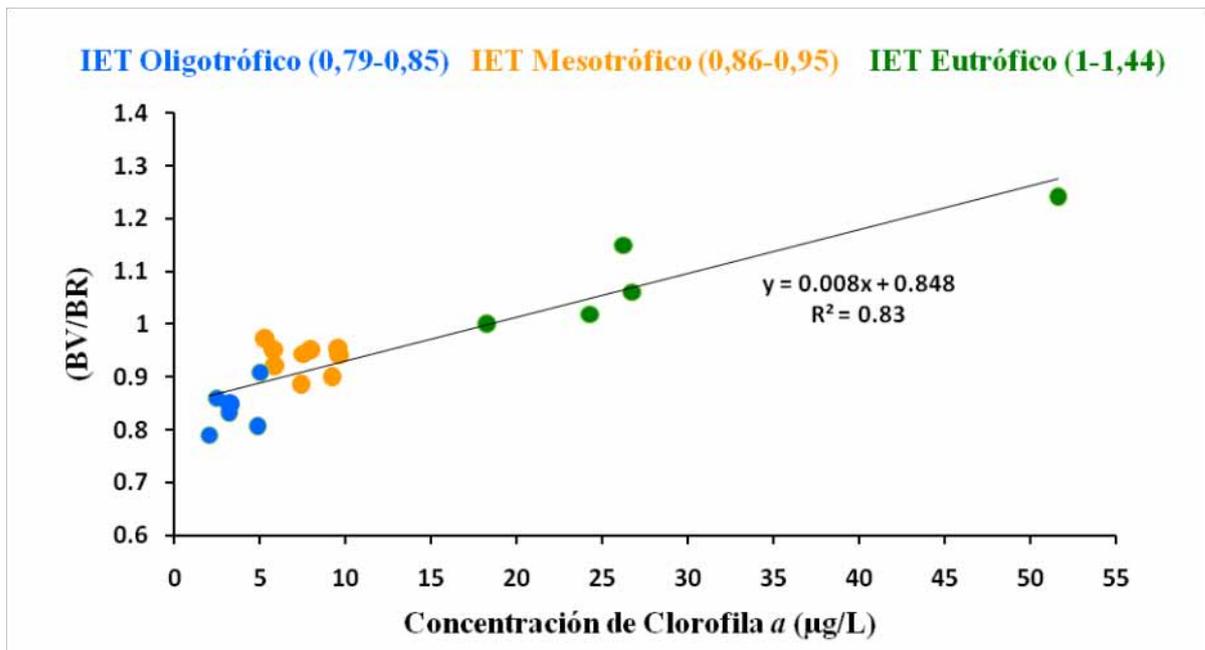
Criterio	Estado Trófico	Clorofila a [µg/L]
<44	Oligotrófico	<3,81
> 44 - ≤ 54	Mesotrófico	3,82 - 10,34
> 54 - ≤ 74	Eutrófico	10,35 - 76,06
>74	Hipereutrófico	>76,06

#### 4.3.4 Determinación del estado trófico mediante la técnica de Simulación de Bandas

La simulación de bandas MODIS basada en datos de las campañas Mayo-2008, Junio-2009 y Julio-2010 permitió determinar 3 clases de estado (Figura 53). La distribución de los valores de concentración de la clorofila-a en las muestras no es homogénea siendo imposible definir con mucha precisión los límites de cada clase como los que se indican en la Tabla 15. Así los valores de estado trófico estimados por satélite responden a una pequeña modificación de la concentración de clorofila-a (Tabla 15).

La clase oligotrófica comprendió valores de clorofila-a menores a 5µg/L correspondientes a valores de la relación de bandas que varían desde 0,79 hasta 0,85. De esta forma la clase mesotrófica estaría comprendida entre 5 y 10,34 µg/L valores que corresponden a los criterios del Índice de Estado Trófico Modificado y que según la relación

de bandas estarían entre los valores 0,86 a 0,95 (Tabla 15). La clase eutrófica comprendida entre los valores 10,35 a 76,06 µg/L establecidos en el índice (Tabla 14) fue representada en la Figura 53, por los valores de concentración de clorofila-a de 18,5 a 51,6 µg/L que se encuentran dentro del rango de esta clase y cuyos valores de la relación de bandas varían entre 1 a 1,44. La clase hipereutrófica que no se presenta en la Figura 53 fue deducida a partir de la ecuación de la recta resultante con un valor de relación de bandas > 1,44.



**Figura 53.** Determinación del estado trófico de los lagos de la Várzea de Curuaí y de los lagos Mirituba y Camaçari, mediante la técnica de Simulación de bandas MODIS y la concentración de Clorofila-a. Campañas de Mayo-2008, Junio-2009 y Julio-2010.

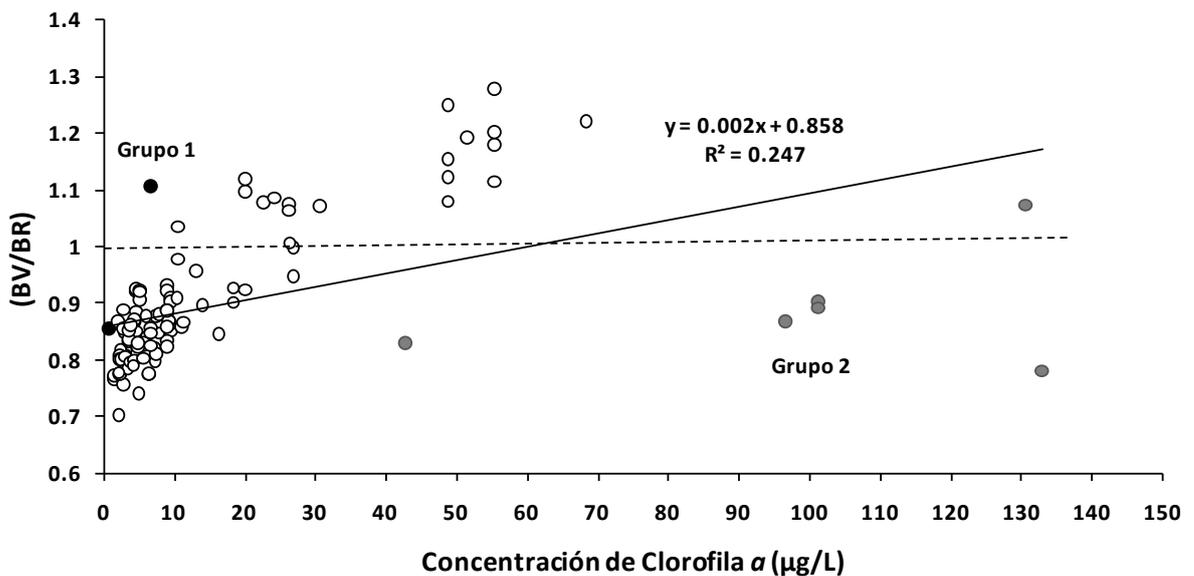
Se puede notar que basado en el criterio del cociente de bandas aplicado, los valores del ratio  $\geq 1$  que indican la presencia de floraciones o *blooms* de algas, correspondieron a los estados eutrófico e hipereutrófico mientras que los estados oligotrófico y mesotrófico fueron definidos por valores del ratio <1 (Tabla 15).

**Tabla 15.** Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) y nuevos valores estimados mediante la técnica de Simulación de bandas

Criterio	Estado Trófico	Clorofila a [µg/L]	Ratio de bandas (BV/BR)	Clorofila a [µg/L]
<44	Oligotrófico	<3,81	0,79 - 0,85	<5,0
> 44 - ≤ 54	Mesotrófico	3,82 - 10,34	0,86 - 0,95	5,0 - 10,34
> 54 - ≤ 74	Eutrófico	10,35 - 76,06	1,0 - 1,44	10,35 - 76,06
>74	Hipereutrófico	>76,06	>1,44	>76,06

### 4.3.5 Técnica de Match-up entre las imágenes satelitales y datos de campo. Campañas (2000-2010)

Los datos de radiometría adquiridos *in situ* desde 2008 fueron previamente usados para calibrar las relaciones reflectancia – concentración de clorofila-a (sección 4.3.1) y reflectancia – estado trófico (sección anterior). En esta parte se valida la relación determinada por los datos satelitales MODIS con los valores de concentración de clorofila-a provenientes de las campañas 2000 a 2010. La Figura 54 presenta una relación no significativa de los datos de reflectancia de los satélites Terra y Aqua, con los valores de concentración de clorofila-a puesto que se observan dos grupos de datos, el Grupo 1 con dos datos (negro) que corresponden a valores de reflectancia altos a bajas concentraciones de clorofila-a y el Grupo 2 (gris) presenta elevadas concentraciones de clorofila-a, que se encuentran por debajo del valor igual a 1 que representa la presencia de eutrofización o floraciones de algas. Por lo tanto, estos valores que se encuentran fuera de la tendencia fueron excluidos.



**Figura 54.** Técnica de Match-up entre los datos de reflectancia (Terra y Aqua) de MODIS vs. Concentración de clorofila-a. Campañas 2000 a 2010, excepto datos de la campaña de Junio-2003. La línea punteada corresponde al valor del ratio  $\geq 1$ . Los Grupos 1 (negro) y 2 (gris) corresponden a datos que se encuentran fuera de la tendencia.

En el caso del Grupo 1 se decidió descartar estos datos debido a que los valores de reflectancias satelitales fueron producidos con una calidad “2” que corresponde a un ángulo

de incidencia muy alto o efecto de sunglint, que es el reflejo especular directo de la radiación solar sobre el agua, el cual produce un efecto brillante (Bouali et al., 2009). Para el caso del Grupo 2 los datos corresponden a la época de estiaje donde las altas concentraciones de clorofila-a fueron encubiertas por las elevadas concentraciones de materia en suspensión, pudiendo ser descartados gracias a la observación de la saturación de las bandas verde y roja.

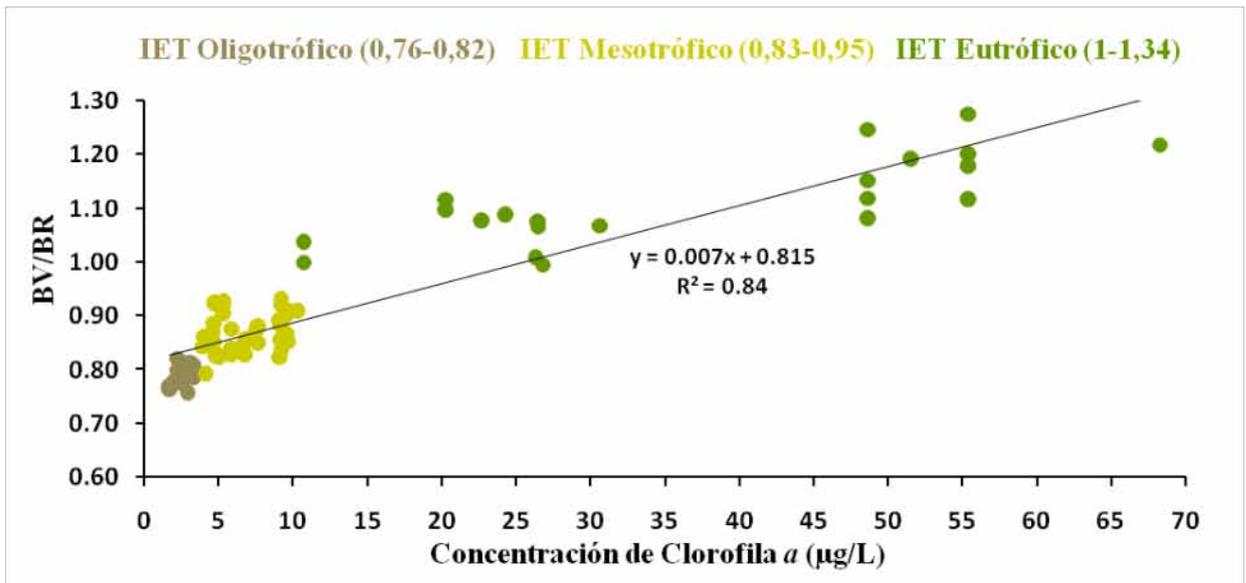
Por otra parte, los datos de la campaña de Junio-2003 no fueron considerados debido a que los análisis de laboratorio reportaron valores inadecuados en algunos casos sobrestimados o repetidos, lo cual pudo estar relacionado a posibles errores de muestreo o a la conservación y permanencia de las muestras antes de su llegada al laboratorio, ya que el mayor problema encontrado, fue el de mantener un sistema de congelación correcto a  $-20^{\circ}\text{C}$  (Golterman, 1978) en el barco, debido a la larga duración de las campañas.

#### 4.3.6. Determinación del estado trófico mediante la técnica Match-up

Fue posible establecer una relación directa y significativa entre los datos de reflectancia de satélite representados en la relación de bandas MODIS (BV/BR) y la concentración de clorofila-a para las campañas 2000-2005 (excepto Junio-2003), Mayo y Octubre de 2008, Junio-2009 y Julio-Agosto de 2010. A partir de esta relación, como se puede ver en la Figura 55 se lograron determinar tres clases de estado trófico de los lagos estudiados, empleando el índice de Carlson modificado (IET)<sub>m</sub> por Toledo (1990) para ambientes tropicales, cuyos valores encontrados corresponden a las concentraciones de clorofila *a* determinados por el índice (Tabla 16). La clase hipereutrófica fue deducida de la ecuación de la recta resultante con un valor de ratio de bandas  $>1,34$ .

**Tabla 16. Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) y nuevos valores estimados por satélite mediante Match-up**

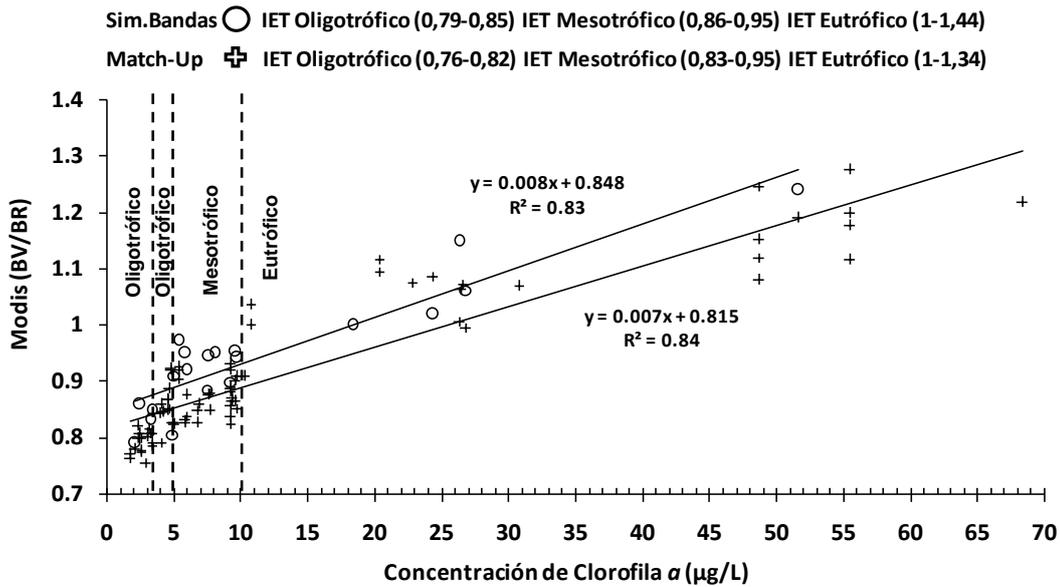
Criterio	Estado Trófico	Clorofila a [ $\mu\text{g/L}$ ]	Ratio de bandas (BV/BR)
$<44$	Oligotrófico	$<3,81$	0,76 - 0,82
$>44 - \leq 54$	Mesotrófico	3,82 - 10,34	0,83 - 0,95
$>54 - \leq 74$	Eutrófico	10,35 - 76,06	1,0 - 1,34
$>74$	Hipereutrófico	$>76,06$	$>1,34$



**Figura 55.** Determinación del estado trófico de los lagos de la Varzea de Curuai mediante la técnica de Match-up. Campañas: 2000 a 2005 (excepto la campaña de Junio-2003) y 2008 a 2010.

#### 4.3.7 Comparación de las técnicas simulación de bandas y Match-up

Comparando las dos técnicas se puede observar que los resultados presentan cierta semejanza (Figura 56). La principal diferencia está en los valores del satélite que representan el estado oligotrófico, donde la técnica de Simulación de bandas difiere de la técnica de Match-up en cuanto a los valores de la relación de bandas, respecto de las concentraciones de clorofila-a (Tabla 15). Por lo tanto, el estado oligotrófico fue determinado por la técnica de Simulación de bandas, a partir de los valores de reflectancia (0,79 - 0,85) y las concentraciones de clorofila-a < 5 µg/L. Mientras que, por la técnica de Match-up el estado oligotrófico fue determinado a partir de los valores (0,76 - 0,82) que coincidieron con los valores de clorofila-a < 3,81 µg/L, propuestos en el índice de estado trófico de Carlson modificado (IET)m. Sobre el estado mesotrófico, debido al anterior resultado, la técnica de Simulación de bandas tiende a disminuir el rango de reflectancia de este estado (0,86 - 0,95), contrastando con los valores de (0,83 - 0,95) determinados por la otra técnica. Por el contrario, la técnica de Simulación de Bandas tiende a incrementar el rango de reflectancia del estado eutrófico de (1-1,44) en relación a la técnica de Match-up cuyo rango es de (1-1,34) (Figura 56).



**Figura 56.** Comparación de las técnicas de Simulación de Bandas y Match-up para determinar el índice de estado trófico (IET) en la várzea de Curuaí. Se puede notar que las dos técnicas difieren en relación al estado oligotrófico, en los valores del ratio de bandas respecto a los valores de concentración de clorofila-a de <5µg/L (Simulación de bandas) y <3,81 µg/L (Match-up) coincidiendo este último valor con el criterio del IET(m). Los otros estados varían poco en cuanto a los rangos de reflectancias determinados por las dos técnicas.

#### 4.4 IMÁGENES DE SATÉLITE

Los análisis de las propiedades ópticas de los lagos permiten entender el ciclo biofísico de los ambientes de várzea. A partir de esta evaluación se analizará la respuesta medida por satélite para confirmar en particular, si por satélite se pueden también monitorear el estado trófico y las floraciones o *blooms* de algas.

Las imágenes MODIS de los satélites Terra y Aqua presentadas en formato tiff fueron procesadas utilizando el software ERDAS Imagine versión 9.1. Las imágenes fueron analizadas en color real (RGB 321) (Figura 57).

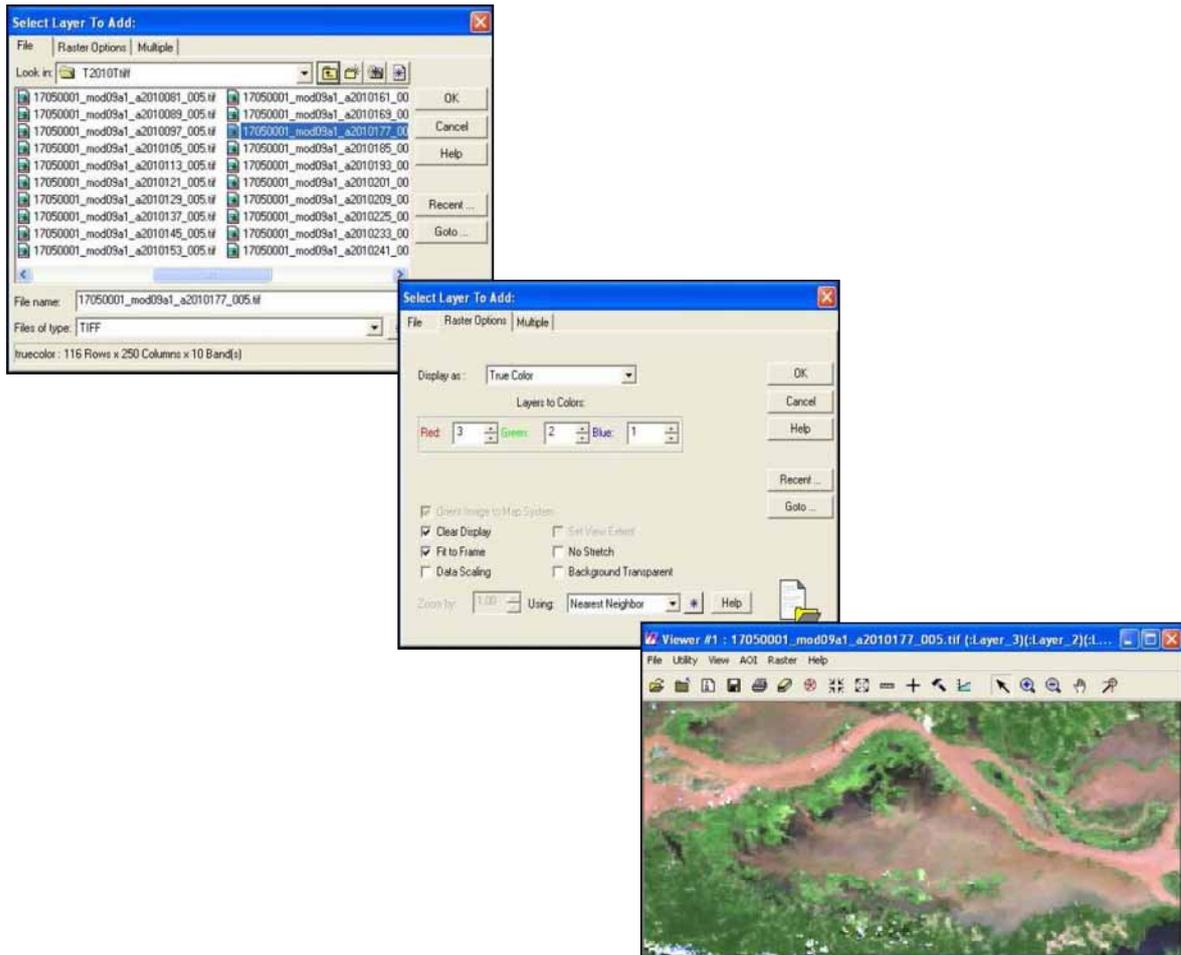


Figura 57. Procesamiento de imágenes MODIS en ERDAS 9.1

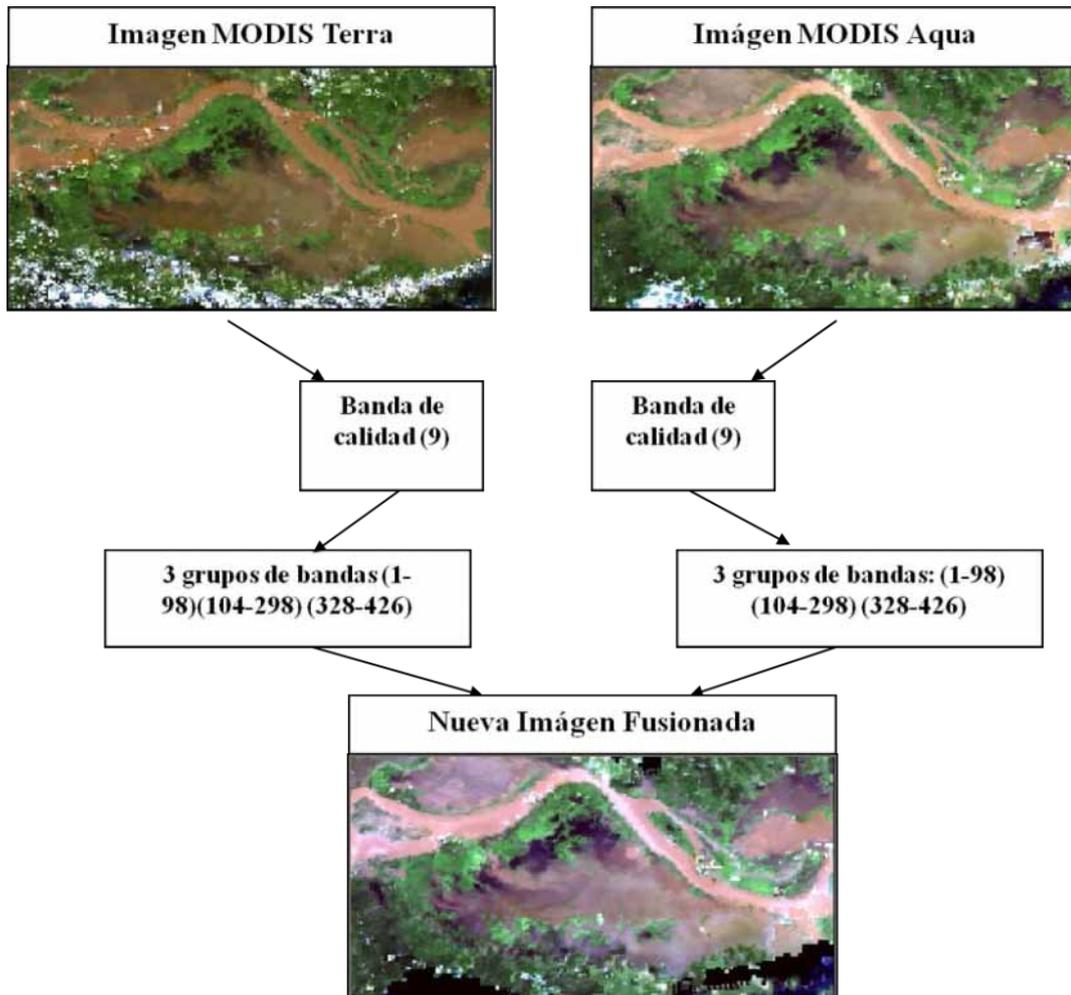
#### 4.4.1 Fusión de Imágenes de los satélites Terra y Aqua

A pesar de la excelente frecuencia temporal de los sensores MODIS, la alta nubosidad típica de la Amazonía, hace que muchas imágenes diarias deban descartarse. Por esta razón decidimos trabajar con imágenes compuestas cada 8 días, que permiten obtener una cobertura de nubes reducida. Para mejorar y facilitar la interpretación de las series temporales escogimos fusionar las series Terra y Aqua, en cada fecha permitiendo reducir el número de imágenes a analizar y mejorar la calidad de las imágenes resultantes.

Las imágenes MODIS de los satélites Terra y Aqua fueron fusionadas utilizando la herramienta Model Maker del software ERDAS Imagine versión 9.1 tomando en cuenta la banda de calidad. Pixel por pixel el programa determina si el área está cubierta por nubes (gracias a las informaciones de calidad) en cada imagen y selecciona el pixel que está claro.

Cuando ambos pixeles están limpios se selecciona el área que fue adquirida con el

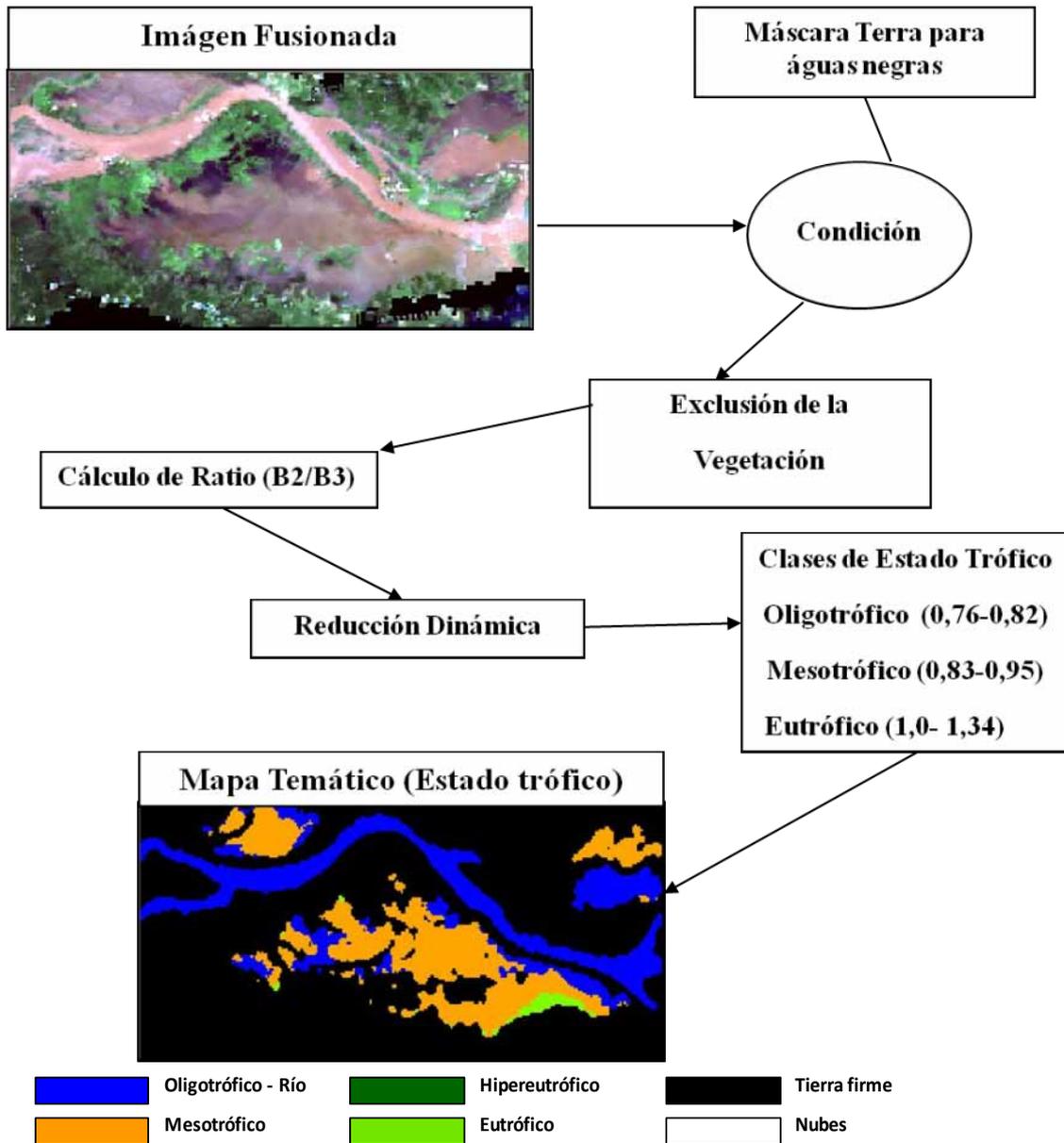
ángulo zenital menor. La Figura 58 muestra un ejemplo del modelo de fusión de ambas imágenes que permitió obtener una imagen totalmente clara y más detallada.



**Figura 58.** Modelo de fusión de imágenes MODIS, satélites Terra y Aqua.

#### 4.4.2 Modelos para la clasificación del estado trófico, detección de floraciones de algas y de materia en suspensión

A partir de las imágenes de satélite fusionadas y de una pre-clasificación para descartar las aguas negras y excluir las áreas de vegetación, se calculó el cociente de bandas (B2/B3) y fue utilizada la ecuación que corresponde a la técnica de Match-up (Figura 55) para la cuantificación de la concentración de clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) y el cálculo de los valores del índice de estado trófico. Así, se obtuvo un modelo cuyo resultado fueron mapas temáticos correspondientes a las clases de estado trófico (Figura 59), cuyos valores fueron previamente determinados en la sección 4.3.6.



**Figura 59.** Modelo de clasificación del estado trófico y detección de floraciones de alga.

Por otra parte, se desarrollo otro modelo parecido al anterior, también utilizando imágenes de satélite fusionadas previamente para la detección de la concentración de sedimentos. Para simplificar la interpretación de los mapas temáticos se estimó un valor de concentración de sedimentos promedio del Río principal, adicionando una máscara que cubre todo el canal del Río a lo largo de la várzea de Curuaí y del lago Parú. Los mapas temáticos resultantes correspondieron a mapas de la concentración de materia en suspensión en mg/L (Figura 60).

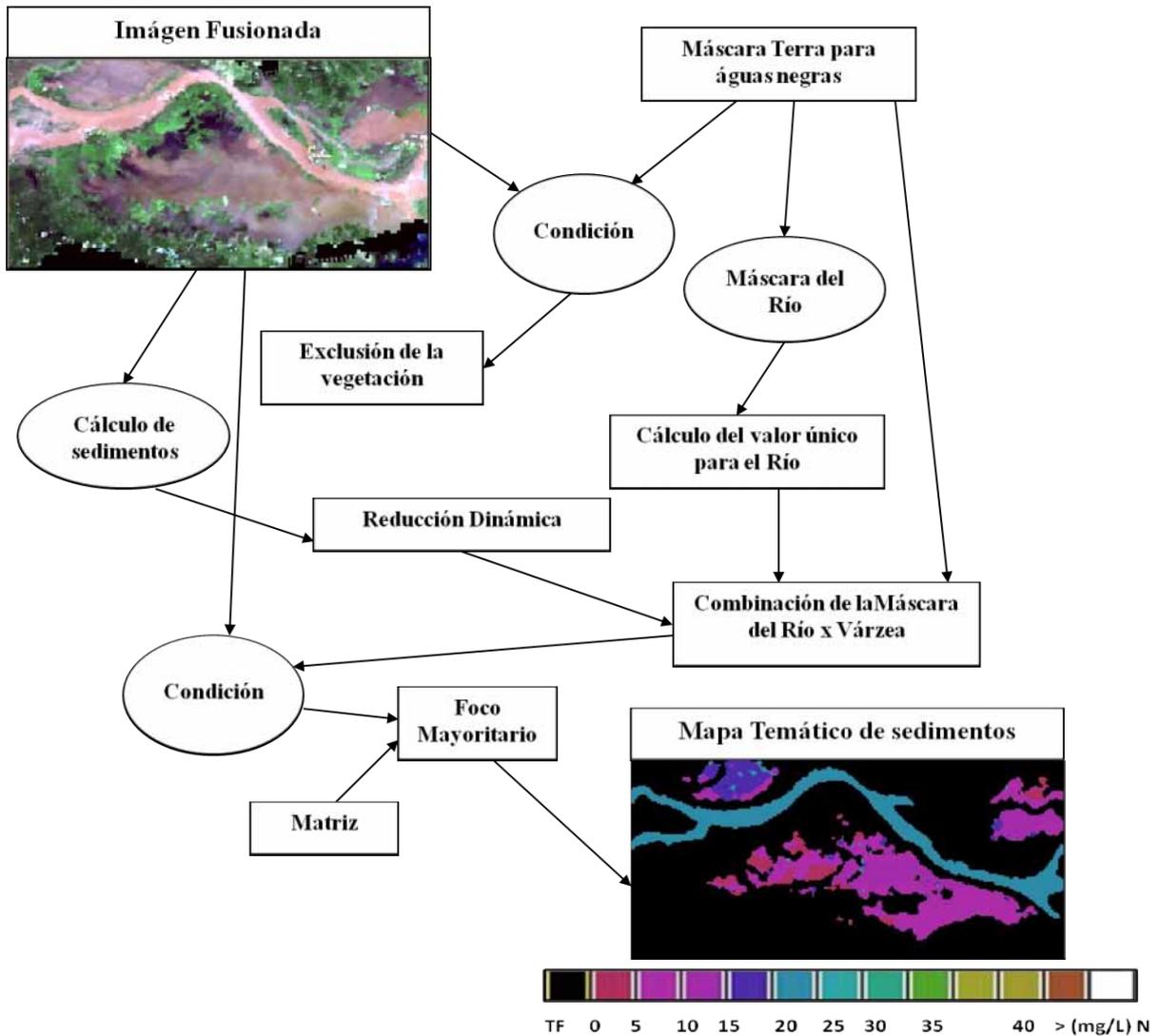


Figura 60. Modelo de detección de la concentración de materia en suspensión (mg/L)

#### 4.4.3 Variación espacial y temporal de la reflectancia en las imágenes

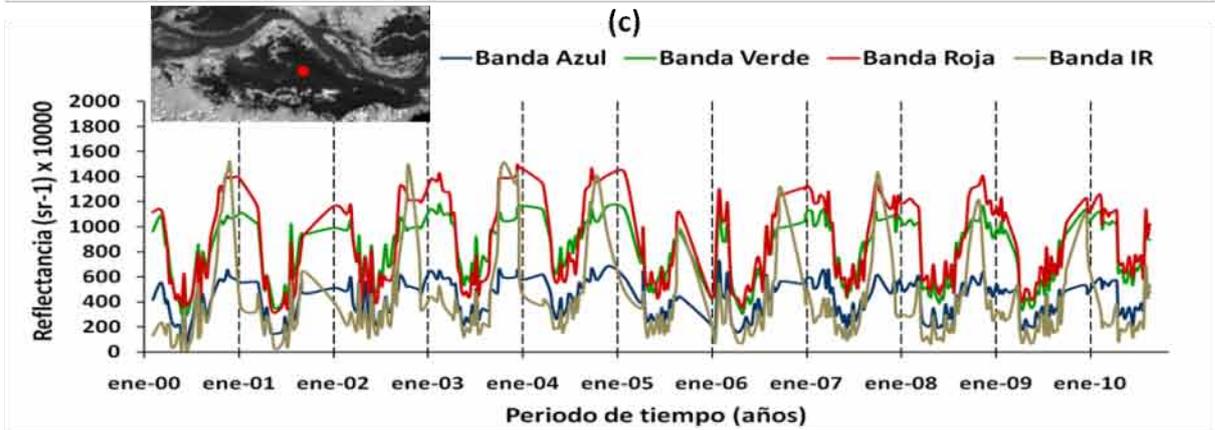
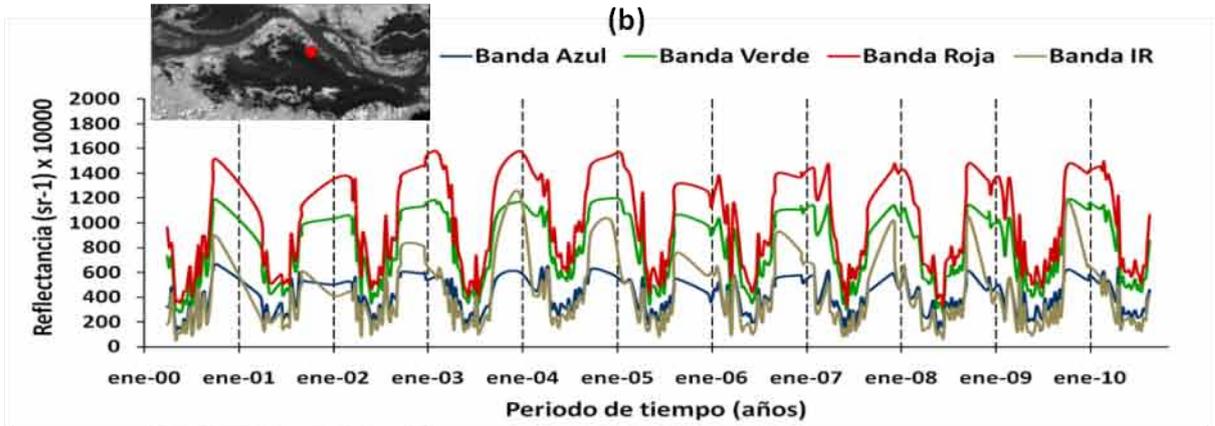
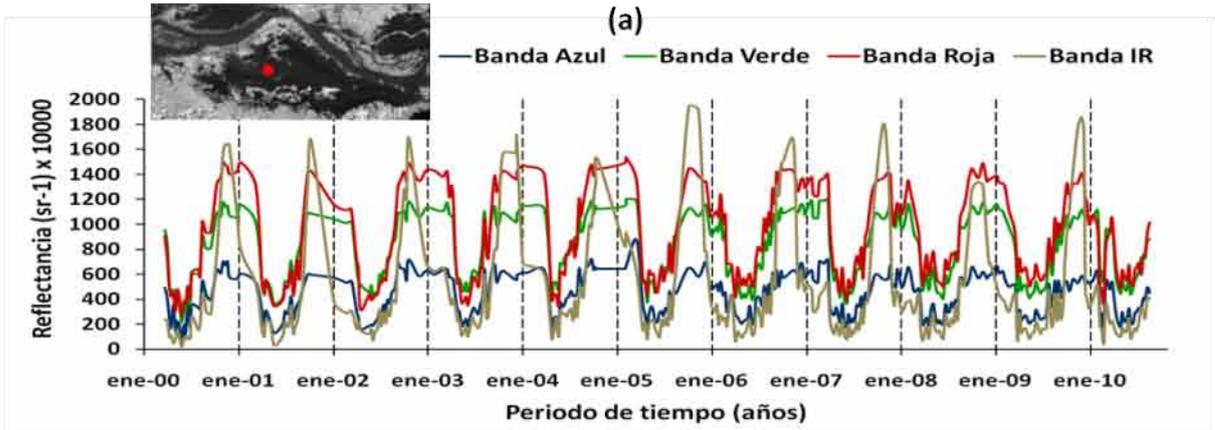
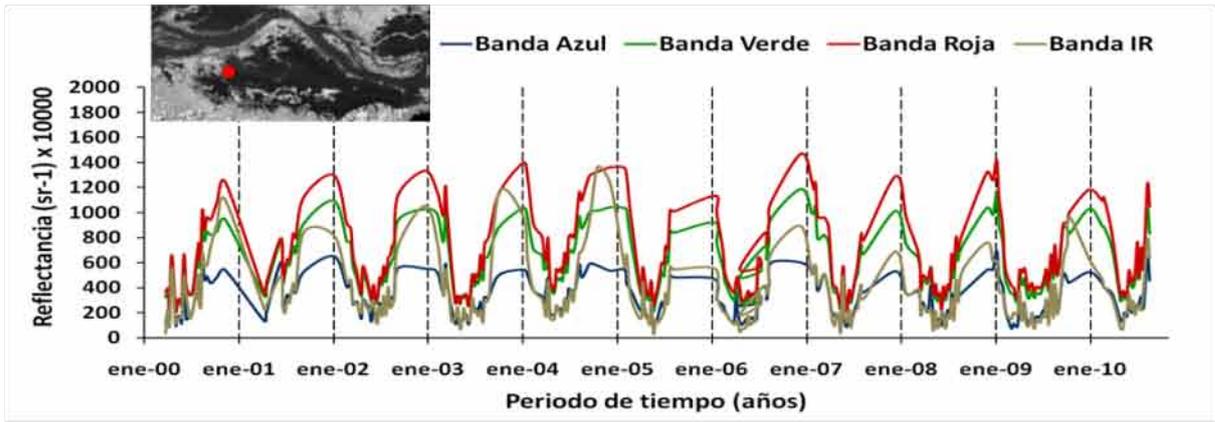
##### MODIS

La variación espacial y temporal de las propiedades ópticas fue analizada en base a la reflectancia de cuatro bandas de MODIS (Azul, Verde, Roja e Infrarroja del producto a 500 m de resolución) en la várzea de Curuaí y los lagos Parú, Mirituba, Camaçari y Manacapuru en un periodo de 10 años. Este periodo fue dividido en ciclos anuales para diferenciar mejor las variaciones inter e intranuales.

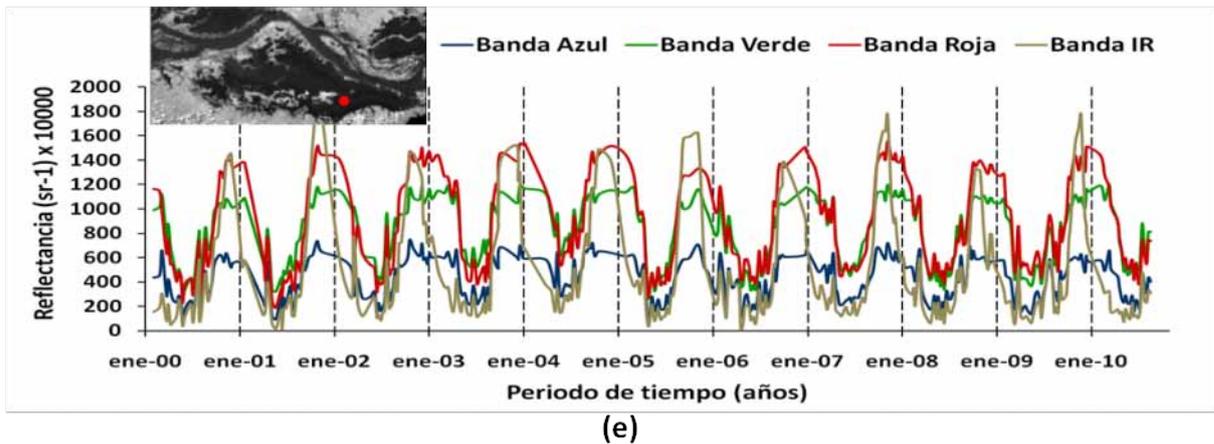
#### 4.4.3.1 Variación espacial y temporal de la reflectancia en la Várzea de Curuaí

La Figura 61 muestra la variación espacial y temporal de la reflectancia de las bandas de MODIS en diferentes regiones de la várzea de Curuaí, representadas por lagos caracterizados por su relación con el río Amazonas. La reflectancia fue calculada cada 8 días, tomando en cuenta la fusión de las imágenes de los satélites Terra y Aqua de MODIS, obteniéndose un total de cuatro imágenes por mes. Dependiendo de la meteorología, la frecuencia temporal puede bajar significativamente a pesar de la alta frecuencia de adquisición del sensor MODIS, lo cual se observó claramente durante el periodo de lluvias (Diciembre a Abril), durante el cual el número de imágenes efectivamente disponibles se redujo hasta una única imagen por mes en vez de cuatro. En general, en todas las regiones de la várzea los valores de reflectancia de las bandas roja y verde fueron altos en relación a las bandas azul e infrarroja. Cada año está marcado por un periodo de reflectancias bajas correspondiente a las aguas altas (Mayo, Junio, Julio) y descenso de las aguas (Agosto) donde todas las bandas radiométricas presentan valores cercanos. Se puede notar para estos periodos hidrológicos que dependiendo de los años y de los lagos, la banda verde sobrepasa a la banda roja. Algunos años presentaron bajas reflectancias también en el mes de abril.

Durante los periodos de descenso de las aguas y de aguas bajas observamos un aumento muy fuerte de la reflectancia en todas las bandas y mucha variabilidad temporal. En estos periodos la banda roja es la que presenta los valores de reflectancia más altos y las bandas azul y verde presentan un comportamiento muy correlacionado al de la banda roja, a pesar de presentar valores de reflectancia más bajos. La banda infrarroja tiene un comportamiento menos correlacionado con largas variaciones de valores, llegando a sobrepasar a las otras bandas en fechas aisladas (Octubre a Diciembre) (Figuras 41 y 61 b, d y e). Las bandas roja e infrarroja están más correlacionadas con la presencia de materia en suspensión, en tanto que la banda verde está influenciada por la presencia de algas (ver Figura 37) y la banda azul está marcada por la absorción de la luz debido a la presencia de materia orgánica e inorgánica, por lo que presenta valores de reflectancia bajos todo el año. Así el aumento de la reflectancia para las longitudes de onda mayores se debe al incremento de la concentración de materia en suspensión, con valores extremos durante el periodo de aguas bajas debido a fuertes procesos homogéneos de re-suspensión por la influencia del viento.



(d)



**Figura 61.** Variación espacial y temporal de la reflectancia en las diferentes regiones de la várzea de Curuaí (a) Región oeste, Lago Salé (A20) (b) Región centro-oeste, Lago Poçãõ (A25) (c) Región norte, Lago Santa Ninha (A11) (d) Región central, Lago Grande do Poçãõ (A08) y (e) Región este, Lago Grande de Curuaí (A05).

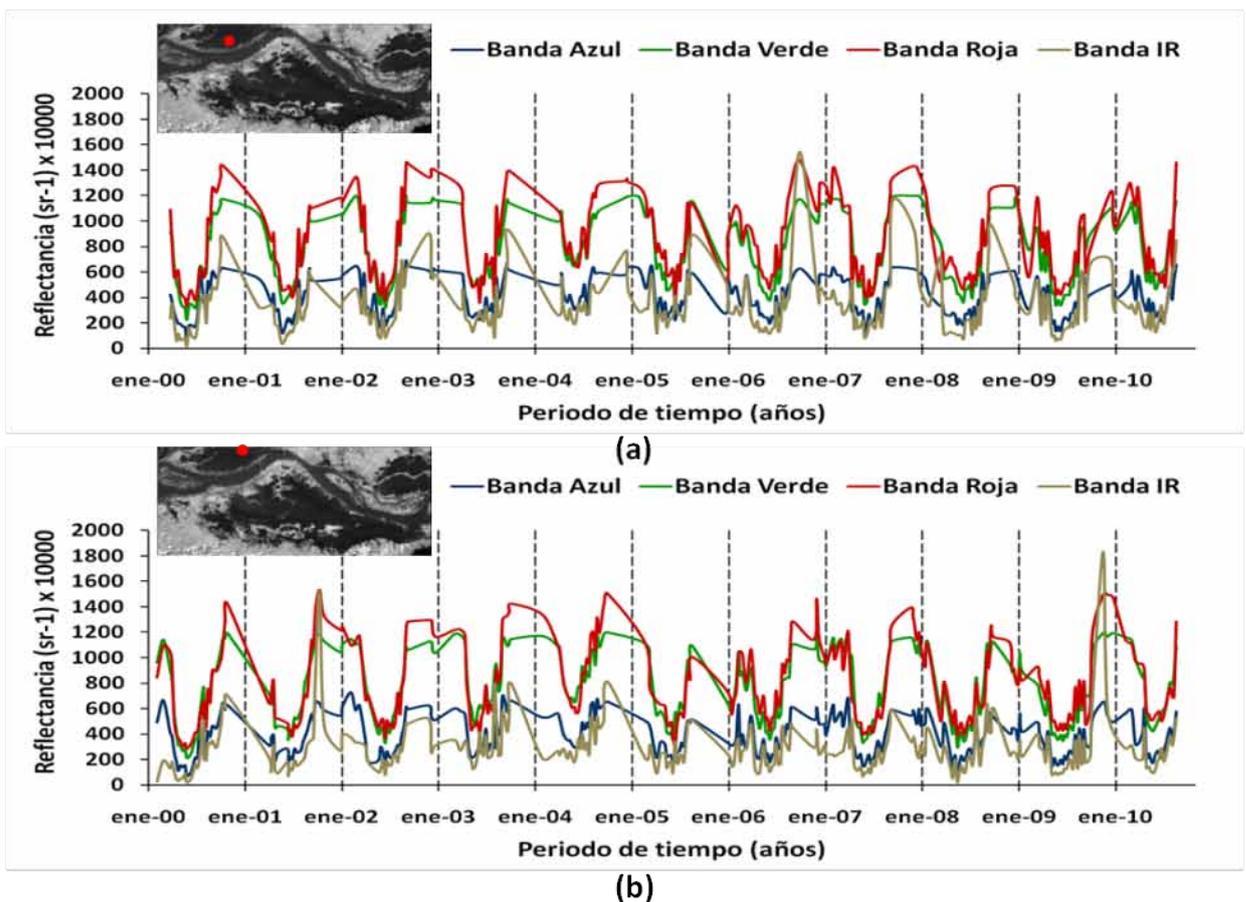
Los valores de reflectancia altos para la banda roja fueron observados constantemente en todos los periodos hidrológicos y durante los diez años de estudio, en los lagos Salé (A20) (Figura 61 a) y Santa Ninha (A11) (Figura 61 c) que mantienen conexión directa con el río Amazonas. El pico de reflectancia de la banda verde, durante el periodo de aguas altas denota la presencia de algas en altas concentraciones, como lo muestran los datos obtenidos en las salidas de campo. Así la Figura 61, muestra que en el periodo de aguas altas (Mayo, Junio y Julio), los valores de reflectancia de la banda verde están por encima de los valores de reflectancia de las demás bandas en las diferentes regiones de la várzea: Región centro-oeste, en el Lago Poçãõ (A25) (Figura 61 b), Región central, en el lago Grande do Poçãõ (A08) (Figura 61 d) y Región este en el Lago Grande de Curuaí (A05) (Figura 61 e) debido a la presencia de floraciones o *blooms* de algas que dan lugar a altas concentraciones de clorofila *a*, presentando patrones de reflectancia similares; excepto en los años considerados de inundaciones extremas (2006 y 2009) y en las estaciones A11 y A20 que mantienen contacto directo con el río Amazonas.

#### 4.4.3.2 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Parú

En el lago Parú (Figura 62 a y b) se presenta la variación espacial y temporal de la reflectancia de las bandas MODIS, con dos estaciones de muestreo, una en la región sur

(P331) y otra en la región central (P332). En ambas estaciones se analizaron las variaciones anuales e interanuales.

En la región sur del lago, estación P331 (Figura 62 a) los valores de reflectancia de las bandas roja y verde en general fueron altos en relación a las otras bandas, en casi todos los periodos hidrológicos anuales. En comparación con la várzea de Curuaí, se pueden notar los valores menores de la banda infrarroja lo cual demuestra la menor importancia de los procesos de re-suspensión en la época de estiaje (aguas bajas), ya que esta estación mantiene contacto permanente y cercanía con el río, asegurando un nivel mínimo de los lagos de esta várzea localizada entre dos brazos del río Amazonas. Por otro lado, también se observó que algunas semanas del periodo de aguas altas (Mayo, Junio y Julio) en los años 2001, 2003, 2004, 2005 y 2010 las curvas de reflectancia de la banda verde estuvieron por encima de las demás bandas, indicando la presencia de floraciones de algas y baja concentración de sedimentos.



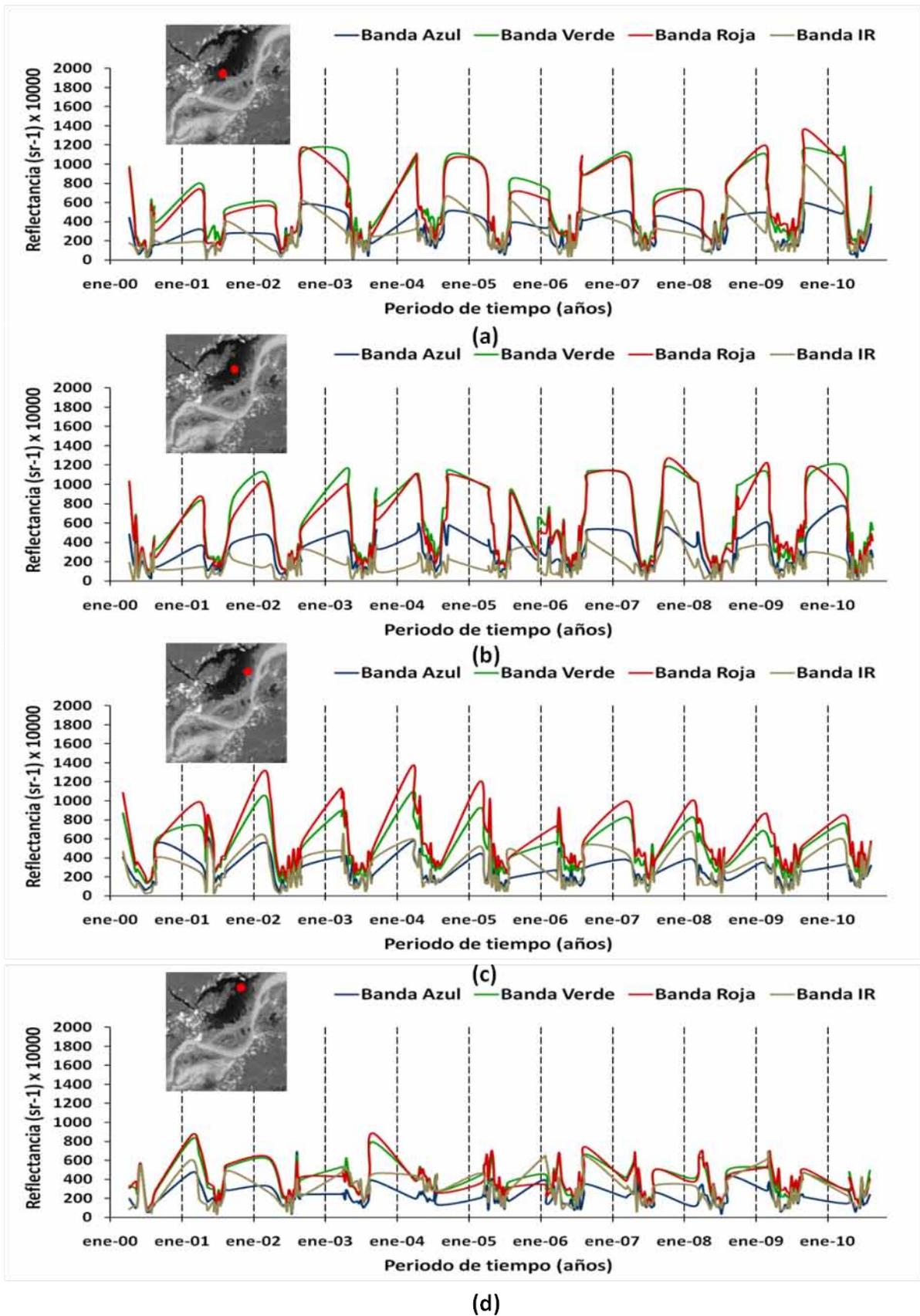
**Figura 62.** Variación espacial y temporal de la reflectancia en el Lago Parú (a) Región Sur (P331) y (b) Región Central (P332).

La estación P332 localizada en la región central del lago (Figura 62 b), también presentó valores altos de reflectancia de la banda roja en relación a las demás bandas, en casi todos los periodos hidrológicos anuales. A diferencia de la anterior estación de muestreo, las curvas de reflectancia de la banda verde sobre las demás predominaron en el periodo de aguas altas y algunas semanas del periodo de descenso de las aguas, en más años. Esto indicaría que los *blooms* de algas se mantuvieron más tiempo debido a la mayor distancia que mantiene esta estación con el río Amazonas.

#### 4.4.3.3 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Camaçari

En el lago Camaçari los espectros de reflectancia de las bandas MODIS variaron en función de la ubicación de las estaciones de muestreo, de su relación con el río principal y de los periodos hidrológicos. En este caso, las estaciones localizadas tanto en la región sur (P16) como en la región central (P20) del lago presentaron altos valores de reflectancia de la banda verde en relación a demás bandas, durante todo el periodo de estudio, excepto el año 2009. Fueron considerados los periodos de crecida de las aguas (Abril), aguas altas (Mayo, Junio y Julio) y algunos años del periodo de descenso de las aguas (Agosto a Octubre) indicando la presencia de floraciones algales o *blooms*. El año 2009, se produjo un evento de inundación extrema. Durante este año, la reflectancia de la banda roja prevaleció en relación a las demás bandas, disminuyendo en el periodo de aguas altas e incrementándose en el periodo de aguas bajas (Figura 63 a y b). Por tratarse de una situación particular el transporte de sedimentos por el río fue bajo y correspondió al mínimo de concentración, además el flujo continuo del agua interrumpió la producción primaria, dando lugar a la ausencia de floraciones de algas.

Por otro lado, la estación localizada al este del lago (P23) presentó altos valores de reflectancia de la banda Roja en relación a las demás. Estos valores fueron observados constantemente en todos los periodos hidrológicos anuales y durante todo el periodo de estudio. Esto se debe al flujo constante de sedimentos por su cercanía y contacto permanente con el río Amazonas. Cabe recalcar, que durante el periodo de aguas altas, la reflectancia de esta banda disminuye, sin embargo se mantiene por encima de las demás bandas, debido posiblemente a que el volumen de agua supera los límites del lago en este periodo permaneciendo enteramente conectado al río Amazonas (Figura 63 c).



**Figura 63.** Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Camaçari (a) Región sur (P16), (b) Región central (P20), (c) Región este (P23) y (d) Región norte (P25).

La estación P25 localizada al norte del lago, influenciada por aguas negras provenientes del río Urubu, presentó una reflectancia más bajas de la banda roja en relación a los otras estaciones de muestreo de este lago, indicando concentraciones bajas de materia en suspensión (Figura 63 d).

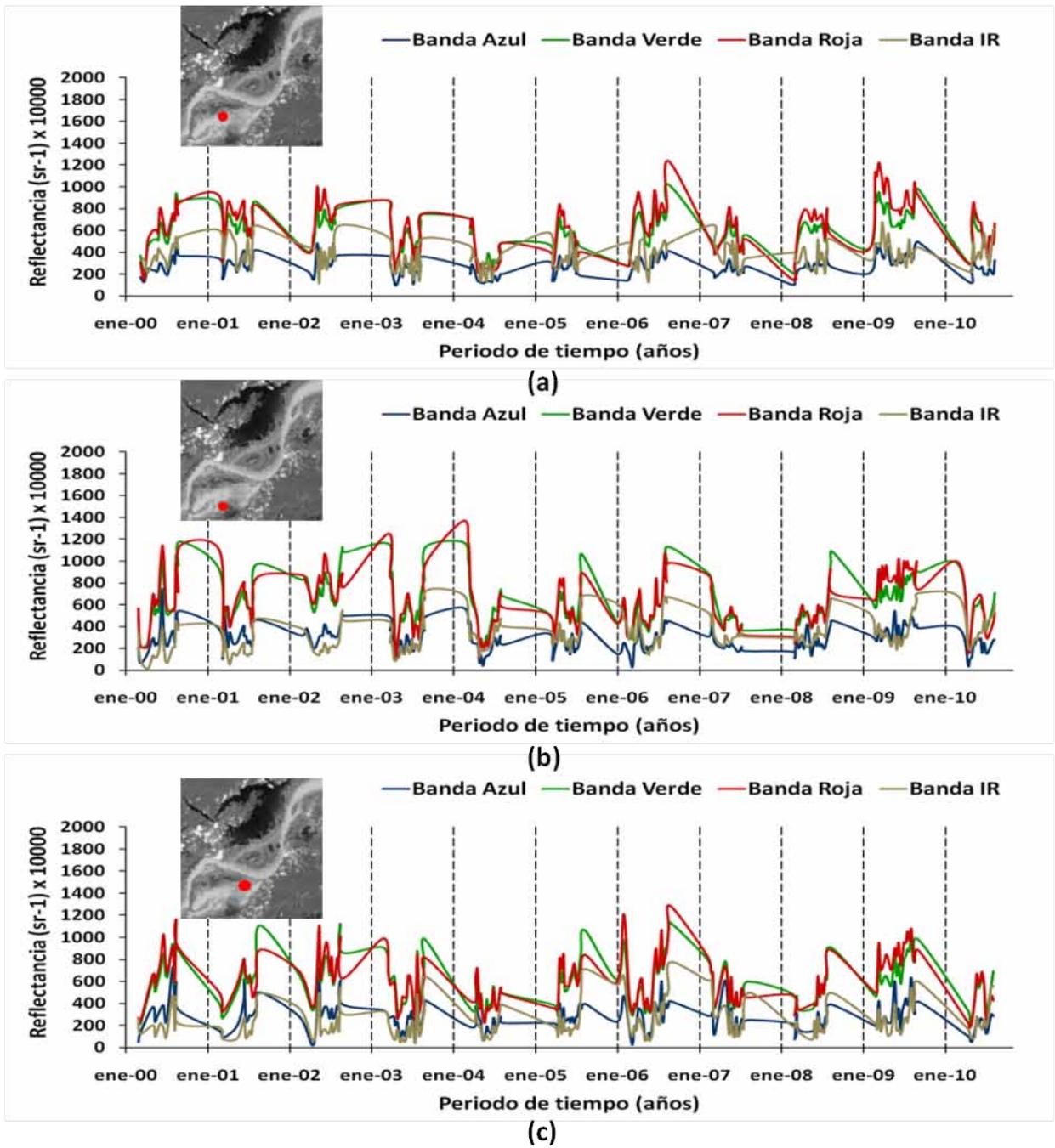
Es importante mencionar que las aguas negras se caracterizan por presentar concentraciones de materia orgánica disuelta (MOD), cuando estas concentraciones se incrementan, los valores de reflectancia disminuyen debido a la mayor absorción en la región del ultravioleta (UV) y banda azul. Estas observaciones se notaron más en esta estación que mantiene contacto directo con el río Urubu, en los periodos de crecida de las aguas y de aguas altas (Figura 58 d). Sin embargo, las demás estaciones presentaron un comportamiento similar respecto a la reflectancia de la banda azul, ya que el lago Camaçari deriva del río Urubu, pero al mismo tiempo está fuertemente influenciado por las aguas del Río Amazonas produciéndose una mezcla de ambos tipos de agua en diferentes periodos.

#### **4.4.3.4 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Mirituba**

En el lago Mirituba al igual que los anteriores lagos, los espectros de reflectancia de las bandas MODIS variaron en función de la ubicación de las estaciones de muestreo, de su relación con el río principal y de los periodos hidrológicos. En este caso, el lago Mirituba recibe aguas blancas provenientes de los ríos Amazonas y Madeira y aguas negras provenientes de la cuenca local.

La estación P4 localizada en la región oeste del lago tiene conexión con los ríos de aguas blancas a través de canales. Por lo tanto, las curvas de reflectancia de la banda roja estuvieron por encima de las demás bandas, en casi todo el periodo de estudio y en todos los periodos hidrológicos (Figura 62 a) indicando el flujo constante y la presencia de sedimentos.

Cabe destacar que algunas semanas de los periodos de crecida de las aguas en 2000, 2008 y 2009, de aguas altas en 2003 a 2005 y de descenso de las aguas en 2000, 2001, 2003, 2007 y 2009 prevalecieron los espectros de reflectancia de la banda verde sobre las demás, demostrando la presencia de floraciones de algas (Figura 64 a).



**Figura 64.** Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Mirituba (a) Región oeste (P4), (b) Región central (P6), (c) Región este (P13)

En la estación P6 localizada en la región central del lago, las curvas de reflectancia tanto de la banda verde como de la banda roja se encontraron por encima de las demás bandas (Figura 64 b). La reflectancia de la banda verde fue alta en los periodos de crecida y descenso de las aguas en todos los años, indicando la presencia de floraciones algales. Durante el periodo de aguas altas, la reflectancia de la banda roja disminuyó indicando bajas

concentraciones de sedimentos y las altas reflectancias de esta banda fueron observadas en los periodos de crecida de las aguas y de aguas altas indicando elevadas concentraciones de sedimentos (Figura 64 b).

La estación P13 localizada en la región este del lago está más influenciada por las aguas negras de la cuenca local y distante de los ríos de aguas blancas (Figura 64 c). Los valores altos de reflectancia de la banda verde predominaron en el periodo de crecida de las aguas (Marzo, Abril), de descenso de las aguas (Agosto, Septiembre) y algunas semanas del periodo de aguas altas, lo cual indicó la presencia de floraciones de algas. Los años restantes del periodo de estudio predominaron los valores altos de la reflectancia de la banda roja lo cual indica la presencia de sedimentos. Sobre la reflectancia de la banda azul, las tres estaciones de muestreo, presentaron curvas similares debido a la influencia de aguas negras en todo el lago. Al incrementarse las concentraciones de materia orgánica en los periodos de crecida de las aguas (Marzo, Abril) y aguas altas (Mayo, Junio y Julio) la reflectancia disminuyó indicando la mayor absorción en esta banda.

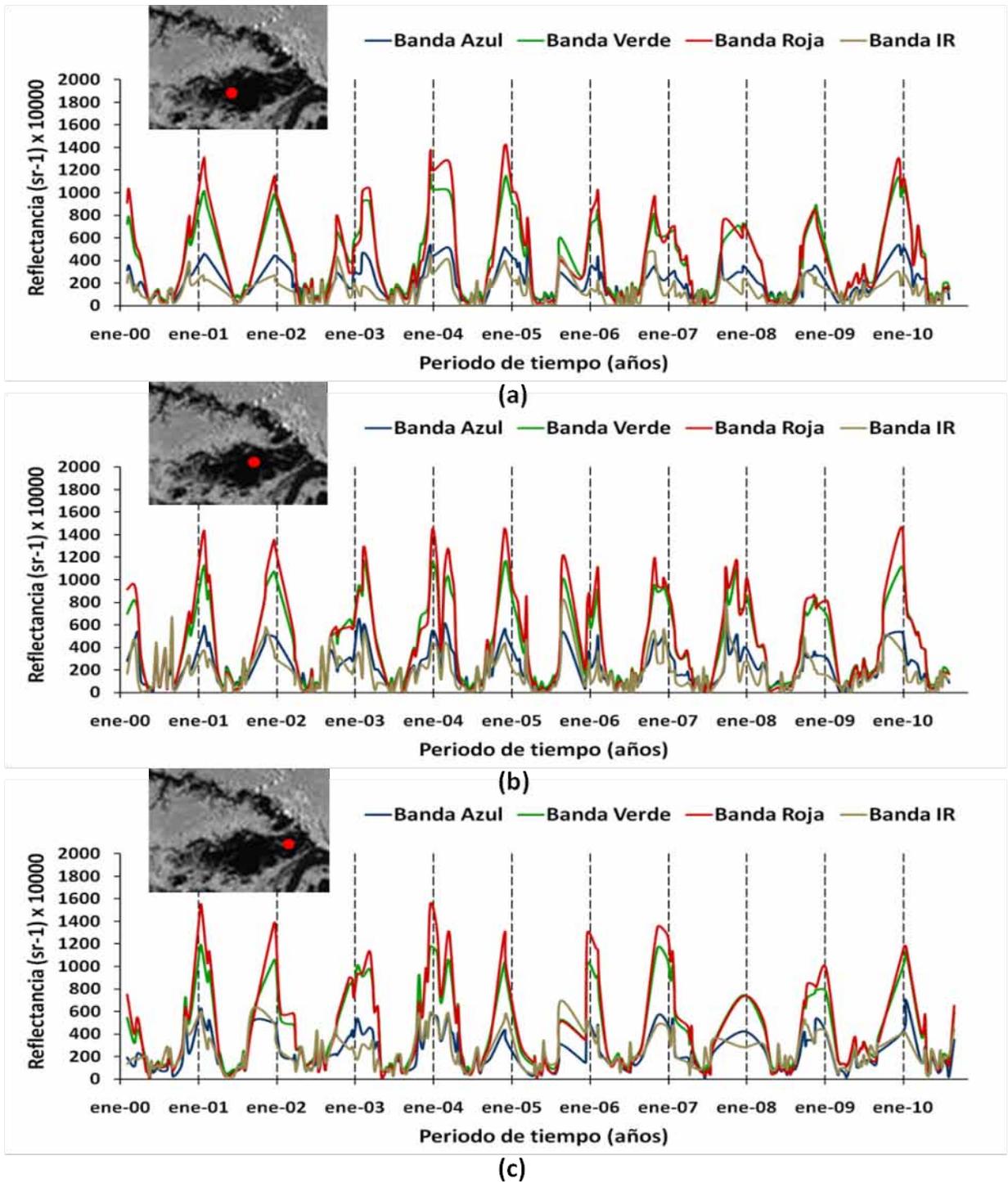
#### **4.4.3.5 Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Manacapuru**

La Figura 65 muestra la variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Manacapuru. Las curvas de reflectancia variaron en función de la ubicación de las estaciones de muestreo, su relación con el río principal y los periodos hidrológicos.

El lago Manacapuru con origen en el río Manacapuru, se caracteriza por la presencia de aguas negras casi en la totalidad del lago. Sin embargo también presenta influencia de aguas blancas provenientes del río Solimões en los primeros meses del periodo de aguas altas por la parte este y por la parte sur se mantiene conectado a este río durante todo el año. De manera general se observa la alternancia de periodos de reflectancias altas (aguas bajas) y de reflectancias bajas (aguas altas) como en los otros lagos. Las reflectancias altas de las bandas roja y verde son observadas en el periodo de estiaje (aguas bajas) en las tres estaciones de muestreo.

Las tres estaciones de muestreo (M1, M2 y M3) (Figura 65 a, b y c) presentaron espectros de reflectancia similares, ya que durante los periodos de aguas bajas y crecida de las

aguas, las curvas de reflectancia de las bandas roja y verde presentaron valores altos en relación a las demás bandas.



**Figura 65.** Variación espacial y temporal de la reflectancia en el lago Manacapuru (a) Región centro-oeste (M1), (b) Región centro-norte (M2), (c) Región centro-este (M3),

La alta reflectancia de la banda roja puede ser interpretada por la ocurrencia de procesos de re-suspensión durante los periodos de estiaje, que remueven el sedimento del fondo de los lagos cuando la columna de agua es más reducida. La alta reflectancia de la banda verde en este periodo denota la presencia de altas concentraciones de clorofila *a* que su vez indican floraciones algales.

Los valores de reflectancia de la banda roja disminuyeron en los periodos de aguas altas y descenso de las aguas porque las concentraciones de materia en suspensión provenientes del río Solimões fueron bajas.

La región centro-este (M3) (Figura 65 c) presentó una predominancia de los espectros de reflectancia de las bandas roja (aguas bajas) e infrarroja (aguas altas) en relación a las demás estaciones de muestreo indicando la presencia de materia en suspensión, ya que esta región tiene también mayor influencia de aguas blancas provenientes del río Solimões. Estas observaciones se dieron en la mayoría de los periodos hidrológicos anuales y durante todo el periodo de estudio.

Sobre la reflectancia de la banda azul, en todas las estaciones de muestreo se presentaron curvas similares debido a la influencia de aguas negras en todo el lago. Al incrementarse las concentraciones de materia orgánica en los periodos de crecida de las aguas y de aguas altas, la reflectancia disminuyó indicando la mayor absorción en esta banda.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS**

#### **5.1 Dinámica espacial y temporal del estado trófico en várzeas y otros lagos. (Procesamiento y pos-tratamiento de las imágenes de satélite)**

En este capítulo se presenta la dinámica espacio-temporal del estado trófico en los lagos de aguas blancas, obtenida a partir del procesamiento y pos-tratamiento de las imágenes de satélite, basada en modelos de fusión de imágenes, clasificación del estado trófico y detección de la materia en suspensión presentados en el capítulo 4. Los lagos de aguas blancas fueron los ambientes donde se obtuvieron los mejores resultados para la detección del fitoplancton.

#### **5.2 Dinámica espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Paru**

La dinámica espacial referida al estado trófico en la várzea de Curuaí y en el lago Paru, fue analizada en relación a la dinámica hidrológica. Como la dinámica espacial depende del periodo hidrológico se decidió destacar algunos escenarios para el análisis, presentando las siguientes secuencias hidrológicas:

- 1) Un ciclo hidrológico anual (Marzo a Septiembre) de 2003
- 2) Los periodos de aguas altas (Junio y Julio) y de descenso de las aguas (Agosto) en 2005
- 3) Un año considerado atípico, de máxima inundación como el 2009, donde fue analizada una gran parte del ciclo hidrológico (Febrero a Agosto).
- 4) El periodo de aguas altas específicamente el mes de Junio (pico o máximo nivel de inundación) de los años 2003 al 2010.

Todas estas secuencias fueron complementadas con el análisis de la dinámica espacial de la concentración de materia en suspensión. Es importante resaltar que debido a la alta

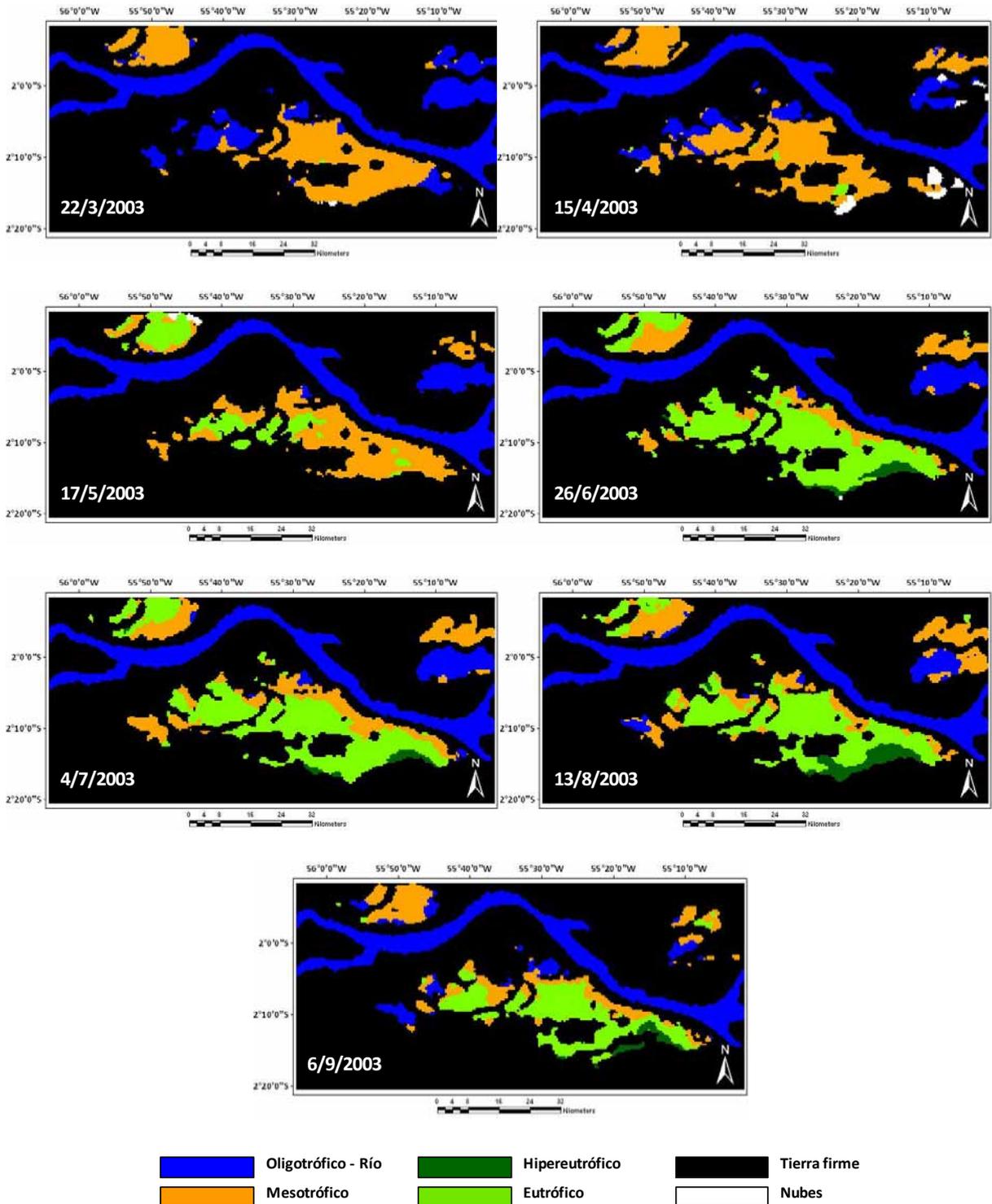
cobertura de nubes, que caracteriza la región amazónica, resulta difícil estudiar la dinámica espacial en la época de lluvias (Noviembre a Febrero) y obtener una secuencia seguida de imágenes claras sin nubes sobre todos los lagos estudiados.

### **5.2.1 Dinámica espacial del estado trófico en un ciclo anual en la várzea de Curuai y el lago Paru (Marzo a Septiembre de 2003)**

En Marzo y Abril (periodo de crecida de las aguas), tanto la várzea como el lago Paru presentaron mayormente características mesotróficas. Sin embargo, los sectores cercanos a los canales de conexión con el río principal presentaron condiciones oligotróficas; ya que durante este periodo el ingreso de las aguas y material (sales nutrientes y minerales) provenientes del río Amazonas son predominantes, encontrándose altas concentraciones de materia en suspensión. Al mismo tiempo, se pudo observar pequeños indicios de la presencia de eutrofización en la región central de la várzea, específicamente en el lago Grande do Poção (A08 y A14) y en la región este, en el lago Grande de Curuai (A05) reflejando el inicio del crecimiento de la producción primaria nueva en sectores que ofrecen estabilidad y condiciones propicias (Figura 66).

En Mayo que representa el inicio del periodo de aguas altas y de época seca se observó que la várzea presentó mayormente condiciones mesotróficas a eutróficas. El proceso de eutrofización o la aparición de floraciones de algas fue predominante en los lagos: Salé (A20) (región oeste), do Poção (A24 y A25) (región centro-oeste) y Lago Grande do Poção (A14 y A08) (región central). En este caso el agua proveniente del río aún continúa ingresando a la várzea por los canales de conexión pero con menor intensidad en relación al periodo de crecida de las aguas. Al igual que la várzea de Curuai, el lago Paru se encontró eutrofizado en su totalidad con algunos sectores mesotróficos. En el periodo de aguas altas (Junio y Julio), la productividad primaria fitoplanctónica nueva se incrementa debido a condiciones propicias de estabilidad de la columna de agua (transferencia lagos-río), disponibilidad de nutrientes provenientes de las contribuciones de las áreas de vegetación inundadas, de la ATTZ y de los igarapés de tierra firme transbordados, mayor radiación solar debido a la escasa presencia de nubes. Por tal motivo, la várzea exhibió eutrofización, la cual se extendió en su totalidad, presentando algunos sectores con características mesotróficas, sobre todo aquellos cercanos a las principales entradas o canales de conexión con el río. Cabe destacar también la presencia de condiciones hipereutróficas localizadas en el lago Grande de Curuai (región este) estaciones

A01 y A05 cercanas a la población de Curuaí a otras poblaciones más pequeñas que se encuentran en el sector de tierra firme.

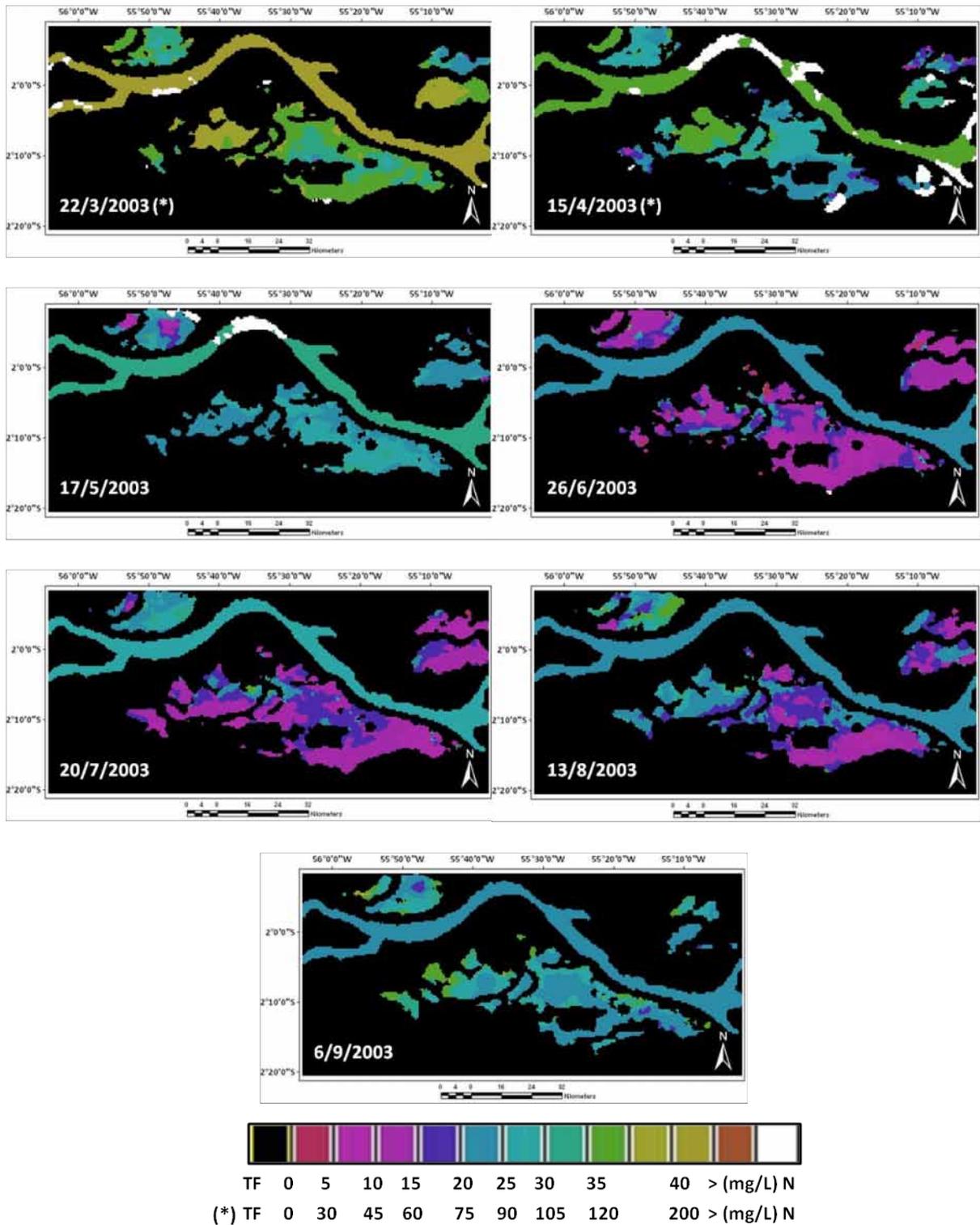


**Figura 66.** Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y el lago Parí. Se puede notar que el estado oligotrófico (azul) tiene relación con el agua del Río Amazonas y los estados eutrófico e hipereutrófico (verde claro y oscuro) representan la presencia de eutrofización y/o floraciones o *blooms* de algas. Ciclo anual de Marzo a Septiembre de 2003.

En el periodo de descenso de las aguas (Agosto y Septiembre) la eutrofización se mantuvo en su totalidad en la várzea, destacándose un incremento de las condiciones hipereutróficas en el lago Grande de Curuai que corresponden a la presencia de floraciones algales. En este periodo las aguas de los lagos salen exclusivamente por las entradas localizadas al este de la várzea. Se observaron también flujos de agua reducidos pero persistentes del río a los lagos Salé y Santa Ninha. Las condiciones mesotróficas se redujeron y los canales de conexión con el río se tornaron nuevamente oligotróficos (Figura 66).

### **5.2.1.1 Dinámica espacial de la concentración de materia en suspensión en un ciclo anual en la várzea de Curuai y el Lago Paru (Marzo a Septiembre de 2003)**

La dinámica espacial de la concentración de materia en suspensión en el periodo de crecida de las aguas (Marzo, Abril) se caracterizó por la presencia de altas concentraciones. En Marzo las concentraciones de 105 a 120 mg/L se presentaron en los lagos: Grande do Poção, en el centro (A08 y A09) y Grande de Curuai, al este (A05, A03, A02 y A01). Las concentraciones >200 mg/L fueron reportadas en el sector oeste y centro-oeste de la várzea, en los lagos Salé (A20), do Poção (A24 y A25) y en los canales de conexión Santa Ninha e Irateua, provenientes de los depósitos rocosos de los Andes y de las márgenes, transportados por el curso principal del Río Amazonas. De igual forma el lago Paru presentó concentraciones de 105 a 120 mg/L en su totalidad, con pequeños sectores que superaron los 200 mg/L y que mantienen contacto con el río Amazonas (Figura 67). El mes de Abril se caracterizó por una reducción en la concentración de materia en suspensión en general, reportándose valores de 120 a 45 mg/L. Las mayores concentraciones similares a las del río (120 mg/L) fueron observadas en la región centro-oeste de la várzea, en el lago do Poção (A24 y A25) y las bajas concentraciones (75 a 45 mg/L) fueron observadas en el lago Salé (A20) en la misma región. También se observó una disminución de las concentraciones de materia en suspensión en las regiones norte y este (Figura 67) con valores de 105 a 75 mg/L. Esta variación se refiere al inicio del proceso de sedimentación en la várzea, en el periodo de aguas altas (Mayo) donde las concentraciones de materia en suspensión disminuyeron drásticamente con valores de 20 a 30 mg/L en toda la várzea, mientras que en el río la concentración de materia en suspensión fue mayor. En el lago Paru las concentraciones se redujeron a 10 mg/L, en la región central del lago (Figura 67).



**Figura 67.** Dinámica Espacial de la concentración de materia en suspensión en la várzea de Curuaí y el lago Parí. Se notan dos escalas de valores de concentración de sedimentos, la primera escala comprende valores de 0 a más de 40 mg/L. La segunda escala marcada por (\*) comprende valores de 0 a más de 200 mg/L. El recuadro (negro) representa tierra firme (TF) y el recuadro blanco la presencia de nubes (N). Ciclo anual de Marzo a Septiembre de 2003.

En Junio y Julio las concentraciones de materia en suspensión fueron muy bajas (5 a 20 mg/L) en relación con el río Amazonas, las cuales coincidieron con la presencia de eutrofización en estos sectores de la várzea. Sin embargo, existieron algunos sectores reducidos en los lagos do Poção (A25) cerca al canal de de entrada (Ai30) y Grande do Poção (A09) que presentaron concentraciones mayores o iguales a las del río (Figura 67). En cuanto al lago Paru, las concentraciones de materia en suspensión fueron menores en gran parte del lago en Junio y se incrementaron en Julio asemejándose a las del río (Figura 67).

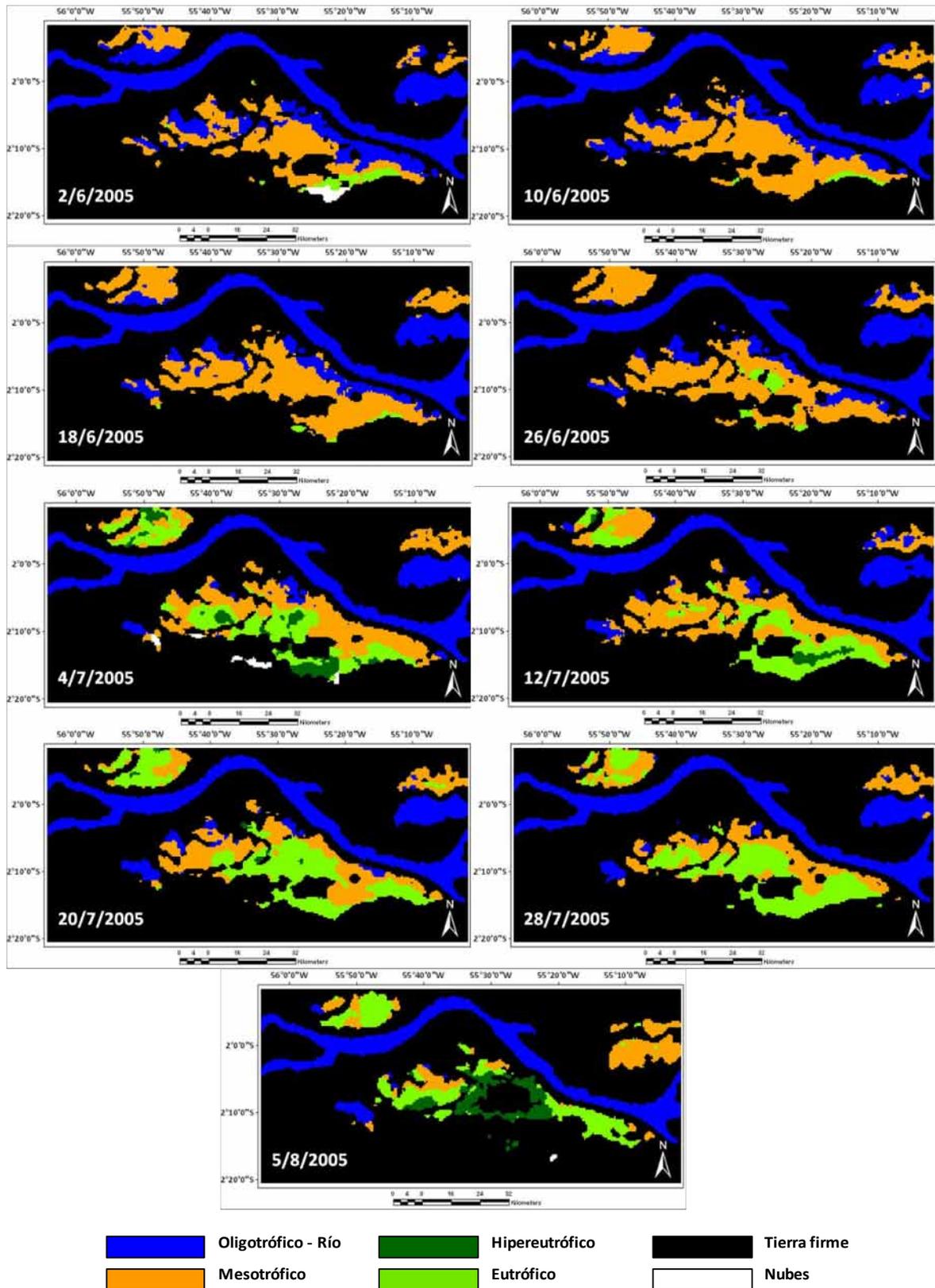
Durante el periodo de descenso de las aguas (Agosto y Septiembre) las concentraciones de materia en suspensión se incrementaron, quizás con la influencia de procesos de re-suspensión por los vientos que aumentaron en función de la reducción de la columna de agua en los lagos. En Agosto las concentraciones de materia en suspensión presentaron valores de 5 a 10 mg/L en el lago Grande de Curuaí (A05, A03, A02 y A01) y parte del lago Santa Nina (A11), de 15 a 20 mg/L en el lago Grande do Poção (A08, A09, A14) y de 20 a 30 mg/L en los lagos Salé (A20) y do Poção (A24 y A25). En Septiembre, las concentraciones se incrementaron en toda la várzea con valores >25 mg/L y el sector oeste de la várzea se caracterizó por presentar valores >40 mg/L. Las zonas de mayor elevación que se secan primero son aquellas donde los procesos de re-suspensión por acción del viento se intensifican. El lago Paru, en este periodo presentó mayor concentración de materia en suspensión con valores de 30 a 40 mg/L y también fueron observadas algunas concentraciones menores (5 a 15 mg/L) en sectores reducidos del lago (Figura 67).

### **5.2.2 Dinámica espacial del estado trófico en la Várzea de Curuai y el Lago Paru en los periodos de aguas altas y de descenso de las aguas (frecuencia semanal Junio, Julio y Agosto 2005)**

El año 2005 fue considerado un año importante en el caso de la várzea de Curuaí por ser el último año de una secuencia hidrológica estable (2000-2005) antes de varios eventos extremos que acontecieron después hasta el año 2010. Durante este año fueron analizados los periodos de aguas altas (Junio y Julio) y de descenso de las aguas (Agosto) (Figura 68). En esta sección se pretende demostrar la variabilidad de los procesos de eutrofización siguiendo una secuencia completa de imágenes de poco más de dos meses. En este periodo el área de la várzea se encontró completamente inundada predominando las condiciones mesotróficas las primeras semanas de Junio. Se registraron contribuciones de las entradas de agua del río

Amazonas en todos los canales de conexión y sectores cercanos, los cuales se caracterizaron como oligotróficos. También se observó un fuerte proceso de eutrofización en el Lago Grande de Curuaí (región este). Puesto que, en este periodo se inicia la producción primaria nueva fitoplanctónica debido a la existencia de condiciones propicias como la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad de la columna de agua. Las dos semanas siguientes se observaron que las condiciones mesotróficas incrementaron, si bien aún existió contribución por parte del río, a través de los canales de conexión, disminuyeron las condiciones oligotróficas. La eutrofización se extendió hacia el centro de la várzea en el lago Grande do Poção. Por otra parte el lago Paru se caracterizó por ser mesotrófico y presentó un carácter oligotrófico en el sector sur que mantiene contacto con el río Amazonas. Las dos últimas semanas de Junio disminuyeron las condiciones mesotróficas (Figura 68).

En Julio el proceso de eutrofización se incrementó y se extendió hacia gran parte de la várzea (regiones centro y este) y se observaron también la presencia de condiciones hipereutróficas puntuales, localizadas en las estaciones A08 en el lago Grande do Poção, A25 en el lago do Poção y A05 en el lago Grande de Curuai. Las condiciones mesotróficas se mantuvieron en los sectores cercanos a los canales o igarapés de conexión y condiciones oligotróficas reducidas en los principales canales (Cassiano, Santa Nina, Irateua y Salé). Sin embargo las dos últimas semanas de Julio, las características tróficas fueron similares, excepto que las condiciones hipereutróficas desaparecieron, manteniéndose solamente condiciones eutróficas (Figura 68). El lago Paru este mes, conservó un carácter mesotrófico a eutrófico, observándose algunos sectores muy reducidos como hipereutróficos (regiones norte y centro) y oligotróficos (región oeste) del lago. A diferencia de los meses anteriores durante la primera semana de Agosto predominaron las condiciones eutróficas e hipereutróficas en la várzea de Curuai, (Figura 68) las cuales se extendieron en gran parte de la várzea, como floraciones de algas puntuales. Las condiciones mesotróficas y oligotróficas se redujeron y estuvieron presentes solamente en los sectores oeste y norte de la várzea, cerca a los canales de conexión (Salé, Tabatinga do Salé, Irateua, Muratuba y Cassiano). Como Agosto corresponde al periodo de descenso de las aguas es predominante la exportación de materia de la várzea hacia el río, así como los procesos de degradación y sedimentación en los lagos. Por su parte el lago Paru, se encontró mayormente eutrofizado y pocos sectores presentaron características oligotróficas a mesotróficas (Figura 68).



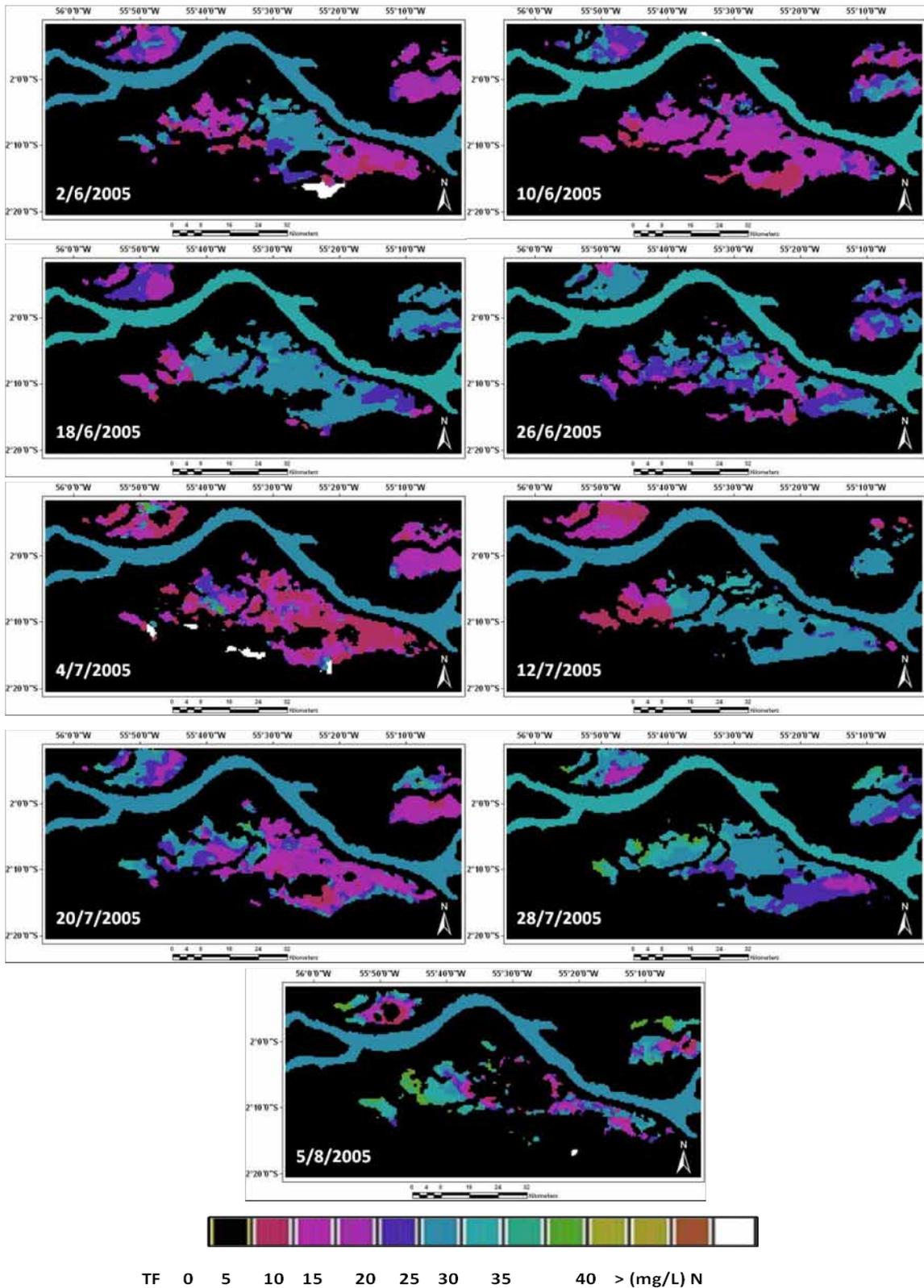
**Figura 68.** Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuaí y el lago Paru. Se nota que el estado oligotrófico (azul) tiene relación con el agua del Río Amazonas y los estados eutrófico e hipereutrófico (verde claro y oscuro) representan la presencia de floraciones o *blooms* de algas. Periodo de aguas altas y de descenso (Junio, Julio y Agosto de 2005).

### **5.2.2.1 Dinámica espacial de la concentración de materia en suspensión en la Várzea de Curuai y en el Lago Paru en los periodos de aguas altas y de descenso las aguas (frecuencia semanal Junio, Julio y Agosto 2005)**

En relación a la concentración de materia en suspensión ambos periodos se caracterizaron por presentar bajas concentraciones (Figura 69). Durante la primera semana de Junio se observaron valores de <5 a <15 mg/L en las regiones: oeste en el lago Salé (A20), centro-oeste en el lago do Poção (A24 y A25) y este en el lago Grande de Curuai (A01, A02 y A03). En tanto, que las concentraciones de materia en suspensión de 15mg/L estuvieron presentes en parte, en los sectores centro (A14) y este (A05) de la várzea. Concentraciones de 30 mg/L, que en este periodo son las mayores como las del río, estuvieron presentes en la región central, en el lago Grande do Poção (A08 y A09) y al norte en el lago Santa Ninha (A11). Asimismo, las entradas o canales de conexión presentaron también valores de 30 mg/L. Por otra parte, el lago Parú exhibió mayormente un rango de <5 a <15 mg/L y sectores muy reducidos con valores de 15 a 30 mg/L.

Durante la segunda semana de Junio, tanto en la várzea como en el lago Paru, predominaron más las concentraciones bajas en su totalidad, notándose un incremento en las entradas o canales de conexión, lo cual indica que el agua del río continua ingresando a la várzea (Figura 69). En la tercera semana se observó que las concentraciones se incrementaron en la várzea siendo semejantes a las del río y la última semana se redujeron encontrándose valores de <5 a 30 mg/L. Estas dos últimas semanas, se presentaron fluctuaciones respecto a los valores de materia en suspensión en el lago Paru, también pasando de menores valores a una condición similar a la del río. En Junio de 2005 (periodo de aguas altas) se observó que aún existe ingreso de las aguas del río a la várzea, lo que coincide con las condiciones oligotróficas y mesotróficas presentes observadas anteriormente.

En contraste, en Julio las concentraciones de materia en suspensión fueron bajas concordando con el proceso de sedimentación, con la presencia de condiciones hipereutróficas en parte de la región centro-oeste, en el lago do Poção (A25), parte de la región central, en el lago Grande do Poção (A08 y A14) y en la región este, en su totalidad en el Lago Grande de Curuai (A01, A02, A03 y A05).



**Figura 69.** Dinámica Espacial de la concentración de materia en suspensión en la várzea de Curuaí y en el lago Parí. Se nota una escala de valores de concentración de sedimentos, que comprende valores de 0 a más de 40 mg/L. El recuadro (negro) representa tierra firme (TF) y el recuadro blanco, la presencia de nubes (N). Periodos de aguas altas y de descenso de las aguas (Junio, Julio y Agosto) de 2005.

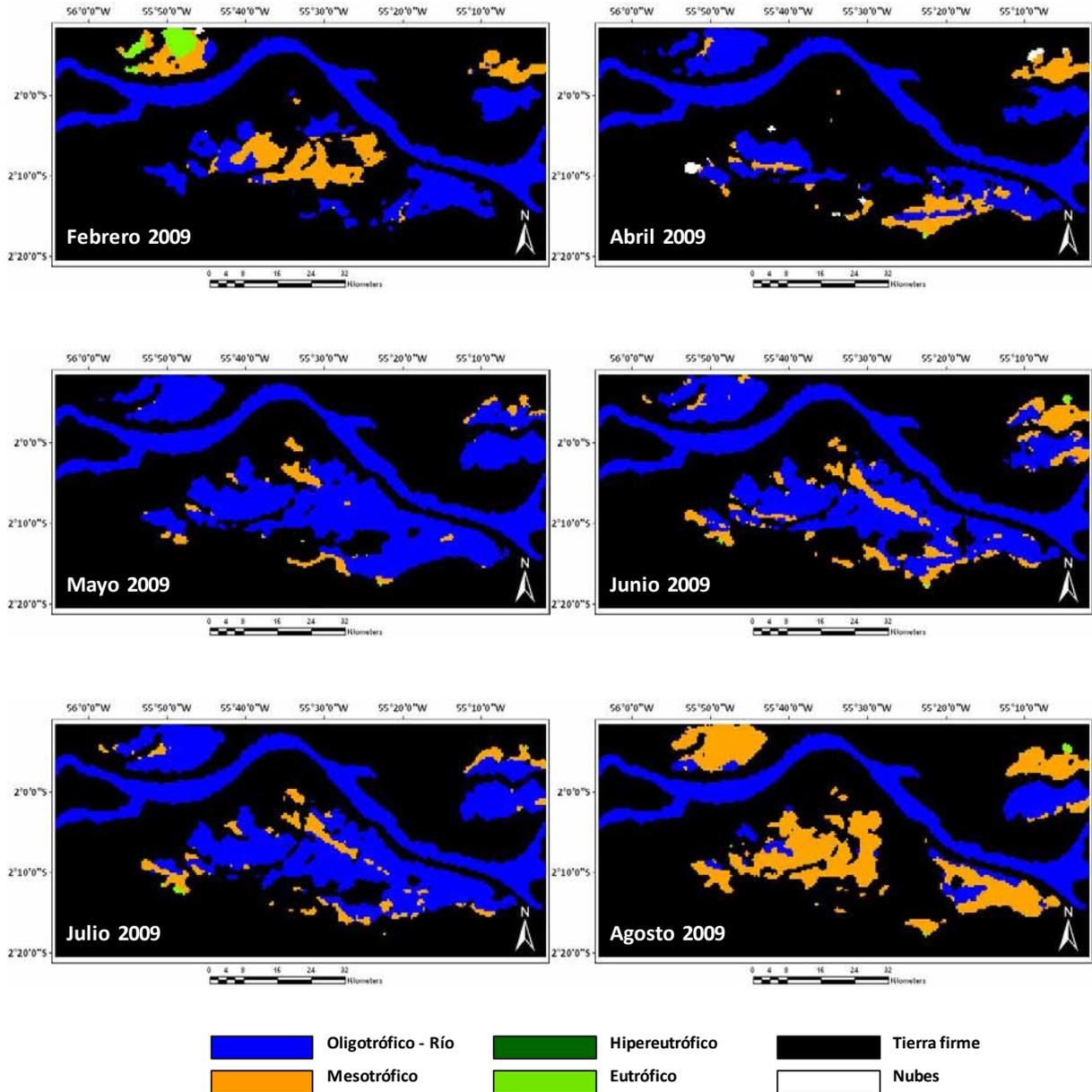
La última semana de Julio y la primera semana de Agosto las concentraciones de materia en suspensión, tanto en la várzea (regiones centro-oeste y oeste) como en el lago Paru comenzaron a incrementarse con valores de 35 mg/L (Figura 69).

### **5.2.3 Dinámica espacial del estado trófico en la várzea de Curuai y el lago Paru en relación a un ciclo anual, en un evento de inundación extrema (frecuencia mensual Febrero a Agosto 2009)**

El año 2009 se caracterizó por la presencia de un evento de máxima inundación que se extendió gran parte del mismo. En esta sección se pretende analizar la variación del estado trófico en un ciclo hidrológico anual siguiendo una secuencia de imágenes, con una frecuencia mensual en un evento de inundación extrema. La várzea de Curuai y el lago Paru presentaron mayormente condiciones oligotróficas preponderantes iguales a las del río Amazonas (Figura 70).

En Febrero de este año se observó como las aguas del río ingresan a la várzea por los principales igarapés o canales de conexión (Salé, Irateua, Cassiano, santa Ninha, Foz Norte y Foz sur) tornándola oligotrófica. Sin embargo, también se observó, la presencia de condiciones mesotróficas en las regiones central (lago Grande do Poção) y centro-oeste (lago do Poção) de la várzea. Por otro lado, el lago Grande de Curuaí localizado en la región este, fue totalmente oligotrófico debido a la entrada del río por los canales Foz Norte y Foz Sur (Figura 70).

El período de crecida de las aguas, se identifica con el ingreso de altas concentraciones de materia en suspensión (MES) provenientes del curso principal del río. Este año, debido al evento de inundación extrema producido, no se observaron floraciones de algas o eutrofización en la várzea, durante el periodo de aguas altas e inclusive hasta el mes de Agosto (Figura 70). La várzea se caracterizó como un ambiente mayormente oligotrófico a mesotrófico. De Abril a Julio prevalecieron las condiciones oligotróficas en toda la várzea mientras que en Febrero y Agosto este ambiente se caracterizó por ser más mesotrófico. Sin embargo, los sectores de canales y conexiones con el río principal se mantuvieron como oligotróficos. En contraste, el lago Paru presentó condiciones eutróficas en los sectores centro y norte del lago en el mes de Febrero. Este lago fue completamente oligotrófico de Abril a Julio y predominantemente mesotrófico en Agosto (Figura 70).

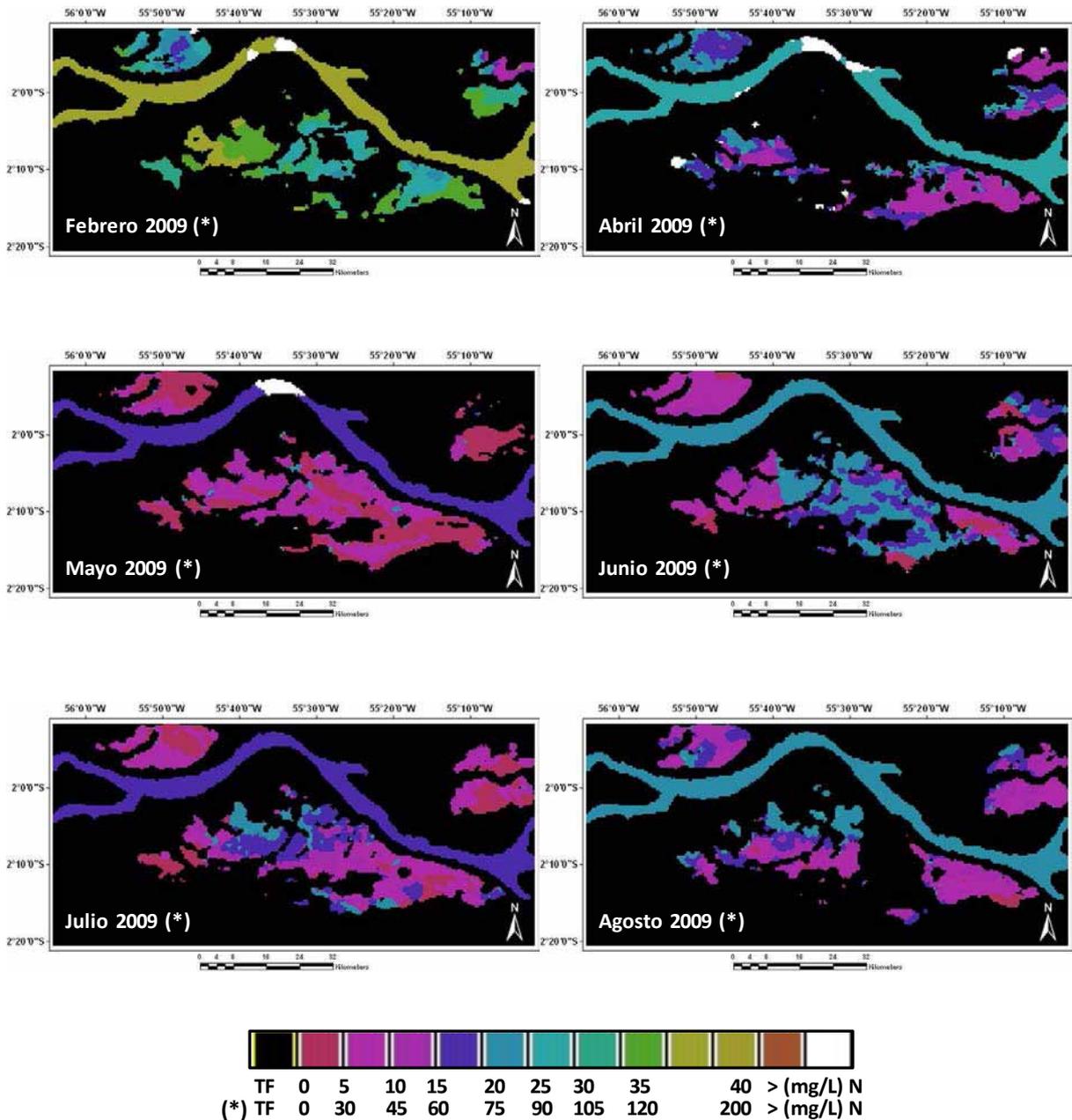


**Figura 70.** Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuai y el lago Parú. Se puede notar que el estado oligotrófico (azul) tiene relación con el agua del Río Amazonas y los estados eutrófico e hipereutrófico (verde claro y oscuro) representan la presencia de floraciones o *blooms* de algas. Ciclo anual de Febrero a Agosto de 2009.

### 5.2.3.1 Dinámica espacial de la concentración de sedimentos en la várzea de Curuai y el lago Paru en relación a un ciclo anual en un evento de inundación extrema (frecuencia mensual Febrero a Agosto 2009)

La concentración de materia en suspensión fue mayor durante el 2009 debido al evento de inundación extrema ocurrido, por lo tanto la várzea permanenció inundada gran

parte del año. El mes de febrero presentó concentraciones de 75 a >200 mg/L en la várzea, mientras que en el lago Paru las concentraciones fueron menores hasta 60 mg/L en la región central que coincide con la presencia de eutrofización o floraciones de algas. En Abril y Mayo las concentraciones oscilaron entre de 105 a 5 mg/L en la várzea y <75 en el lago (Figura 71).



**Figura 71.** Dinámica Espacial de la concentración de materia en suspensión en la várzea de Curuaí y el lago Paru. Se notan dos escalas de valores, la primera escala comprende valores de 0 a más de 40 mg/L. La segunda escala marcada por (\*) comprende valores de 0 a más de 200 mg/L. El recuadro (negro) representa tierra firme (TF) y el recuadro blanco representa la presencia de nubes (N). Ciclo anual de Febrero a Agosto de 2009.

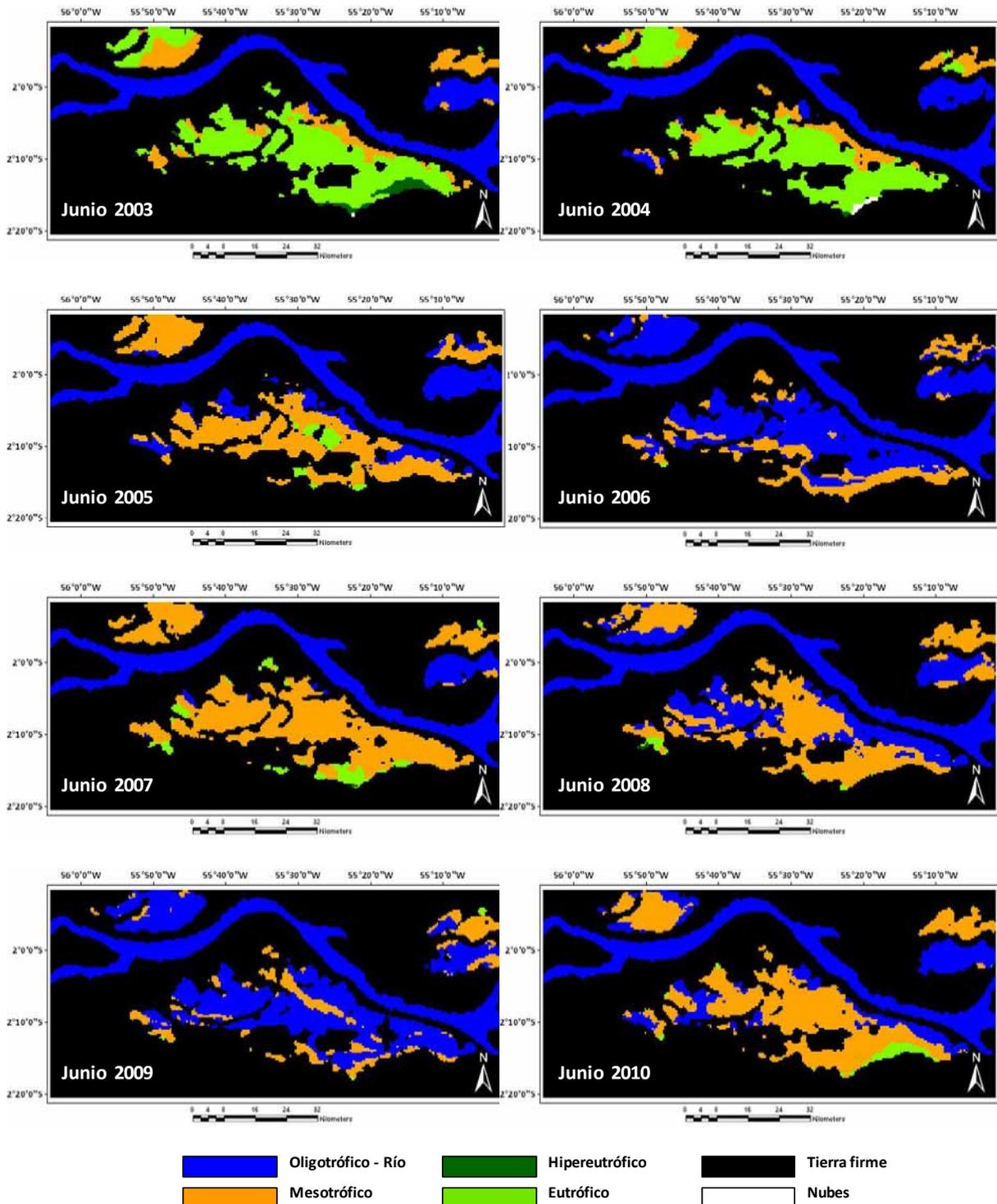
Durante el periodo de aguas altas (Junio y Julio) las concentraciones se mantuvieron de 105 a 60 mg/L en la regiones: norte y centro (L. Santa Ninha, A11 y L. Grande do Poçãõ A14) centro-oeste (L. do Poçãõ, A25) y este en la estación A05 cercana a la población de de Curuai y fueron menores de 60 mg/L en la regiones oeste, centro-oeste (lagos Salé y Poçãõ, A24) y este (L. Grande de Curuai A03, A02 y A01) de la várzea. Contrariamente en Agosto las concentraciones de materia en suspensión se incrementan en las márgenes de los lagos y de los canales de conexión con el río (Salé, Irateua, Cassiano y Santa Ninha), predominando aún las menores concentraciones en el resto de la várzea (Figura 71).

#### **5.2.4 Dinámica espacial del estado trófico en la várzea de Curuai y el Lago Paru en el nivel máximo de inundación (Junio de 2003 a 2010)**

En esta sección se pretende analizar la variación del estado trófico en el pico o nivel máximo de inundación que corresponde al mes de Junio (Figura 72), con una frecuencia semanal de las imágenes en la que fue considerada la semana del 26 de Junio, en los años 2003 a 2010. En los años 2003 y 2004 ambos sistemas se comportaron de forma similar. Fue observado un proceso de eutrofización casi total en las regiones centro-norte y este de la várzea. En este periodo, la producción primaria es nueva principalmente fitoplanctónica y se presenta en los lagos de aguas blancas, debido a la estabilidad de la columna del agua, radiación solar, contribución de nutrientes aportada por las áreas de vegetación inundadas, contribución de la ATTIZ y minerales aportados por el río, bajas concentraciones de materia en suspensión e inicio del proceso de sedimentación. Cabe destacar la presencia de condiciones hipereutróficas en el lago Grande de Curuai presentes solamente el año 2003 (Figura 72). En ambos años, algunos canales de conexión como Cassiano (Ai60) y Salé (Ai10) presentaron condiciones oligotróficas, debido a que en este periodo, todavía existe una contribución de la entrada de las aguas del río Amazonas a la várzea. Finalmente, condiciones mesotróficas a eutróficas fueron observadas en el lago Parú en ambos años.

Contrariamente, los años 2005 a 2010 se caracterizaron por ser atípicos con periodos de sequía extrema (2005 y 2010) y periodos largos de máxima inundación (2006 y 2009), por lo tanto la várzea en general y el lago Parú en particular, presentaron condiciones netamente oligotróficas a mesotróficas predominantes, con algunos procesos de eutrofización aislados (Figura 72). Específicamente los años 2005, 2007, 2008 y 2010 la várzea se caracterizó por

ser mayormente mesotrófica. Las principales conexiones con el río Amazonas fueron oligotróficas, notándose una contribución efectiva del río a la várzea en 2005, 2008 y 2010.



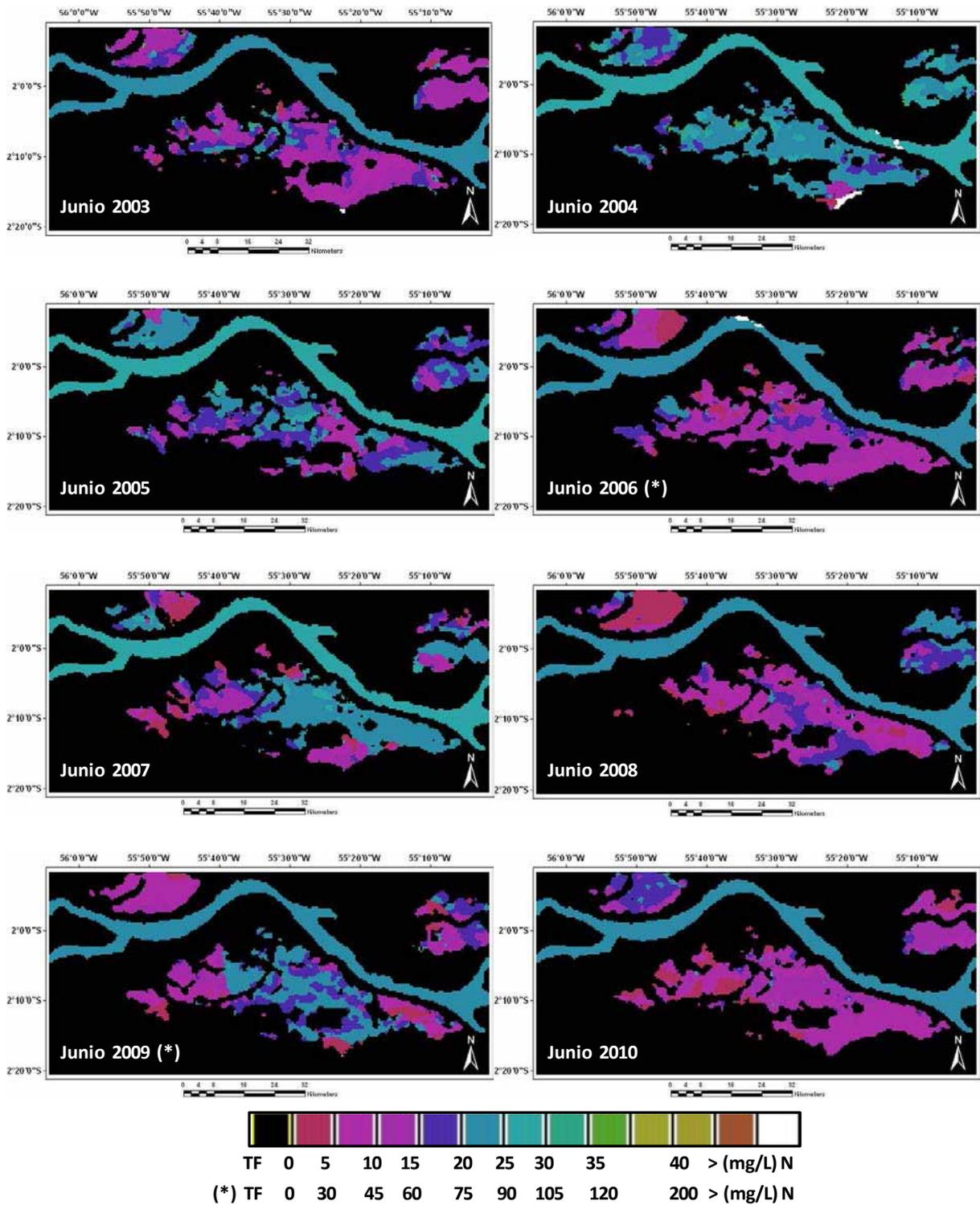
**Figura 72.** Dinámica Espacial del estado trófico en la várzea de Curuai y el lago Parí. Se puede notar que el estado oligotrófico (azul) tiene relación con el agua del Río Amazonas y los estados eutrófico e hipereutrófico (verde claro y verde oscuro) representan la presencia de floraciones o blooms de algas. Nivel máximo de inundación (Junio de 2003 a 2010).

Pese a la predominancia del carácter mesotrófico, algunas condiciones eutróficas fueron observadas en las regiones centro-norte y este de la várzea. Particularmente en la estación (A05) cerca a la población de Curuai, los años 2005, 2007 y 2010 y en el lago Salé (A20) cerca del canal Tabatinga do Salé (AT10) los años 2007 y 2008 (Figura 72). Por otro lado, el lago Parú se caracterizó por ser mesotrófico en su totalidad en 2005 y 2007 y mesotrófico con pequeños sectores oligotróficos localizados al sur en contacto con el río Amazonas en 2008 y 2010. Por el contrario, en los años 2006 y 2009 (Figura 72) ambos sistemas presentaron un comportamiento similar, donde predominaron las condiciones mayormente oligotróficas, relacionadas a episodios de máxima inundación por las aguas del río Amazonas que ingresaron cubriendo casi totalmente a la várzea como al lago Paru. Las condiciones mesotróficas fueron reducidas y se presentaron cerca de las áreas de tierra firme y de la región central de la várzea

#### **5.2.4.1 Dinámica espacial de la concentración de materia y suspensión en la várzea de Curuai y Lago Paru en el nivel máximo de inundación (Junio 2003 a 2010)**

Respecto a la concentración de materia de suspensión los valores presentados fueron variables entre los años 2003 a 2010 en ambos humedales (Figura 73). Tratándose de la época de aguas altas, la várzea se encontró completamente inundada y los valores estimados fueron de <5 a 35 mg/L. Los valores de <5 mg/L fueron reportados en parte del lago Paru y en los sectores centro-norte y oeste de la várzea correspondientes a la región cercana a los canales de conexión con el río principal (2007, 2008 y 2010) (Figura 73).

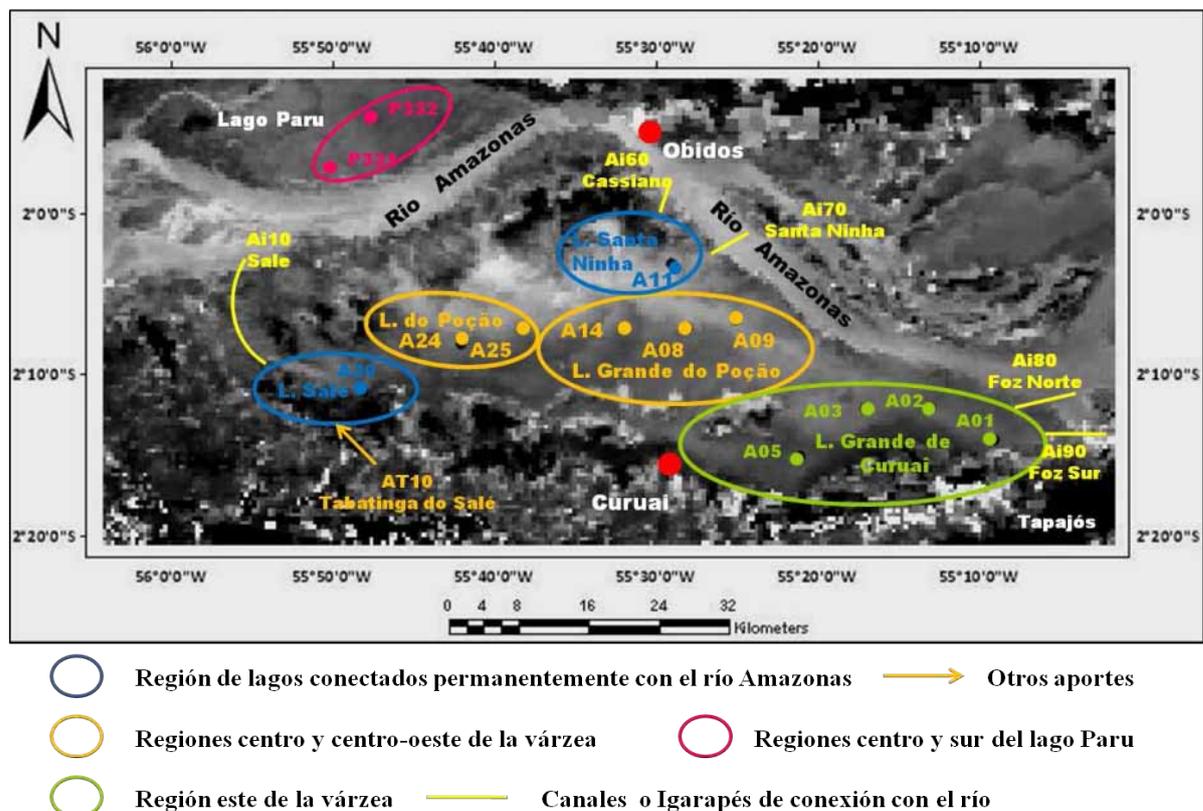
Valores de 5 a 15 mg/L fueron dominantes en la mayor parte de la várzea (2003, 2008 y 2010). También fueron observados sectores reducidos con un incremento en las concentraciones de materia en suspensión de 15 a 30 mg/L distribuidos en diferentes regiones de la várzea y del lago Paru. Los años 2004, 2005, 2007, tanto en la várzea como en el lago Paru, predominaron las bajas concentraciones (15 a 35 mg/L). Sin embargo, también se presentaron altas concentraciones de 60 a 105 mg/L los años 2006 y 2009 debido a los eventos de inundación extrema ocurridos esos años donde la várzea y el lago Parú se ven afectados aún por el ingreso de las aguas del río Amazonas en este periodo (Figura 73).



**Figura 73.** Dinámica Espacial de la concentración de materia en suspensión en la várzea de Curuaí y el lago Parú. Se notan dos escalas de valores, la primera escala comprende valores de 0 a más de 40 mg/L. La segunda escala marcada por (\*) comprende valores de 0 a más de 200 mg/L. El recuadro (negro) representa tierra firme (TF) y el recuadro blanco representa lapresencia de nubes (N). Nivel máximo o pico de inundación (Junio de 2003 a 2010).

### 5.3 Dinámica temporal del estado trófico de várzeas y lagos en relación a su interacción con el río Amazonas en una década (2000-2010)

La serie temporal de datos MODIS analizada, junto con la aplicación de los criterios establecidos por el índice de estado trófico modificado (IETm) para ambientes tropicales (Capítulo 4), permitió inferir una variación inter e intra-anual de las condiciones tróficas de los lagos para un periodo de 10 años. La Figura 74 muestra regiones principales de la várzea de Curuai y sus lagos o estaciones de muestreo (A#) y el lago Paru con sus respectivas estaciones de muestreo (P#) considerados en este estudio.



**Figura 74.** Principales regiones de la Várzea de Curuai y Lago Parú con sus respectivas estaciones de muestreo de campo y canales de conexión que representan la variación del estado trófico.

La estimación del estado trófico fue obtenida sobre una zona de tamaño constante (9 píxeles), correspondiente generalmente a la localización de las estaciones de muestreo en la zona limnética de los lagos para minimizar el efecto de las márgenes en el periodo de sequía (Figura 74).

### 5.3.1 Várzea de Curuai

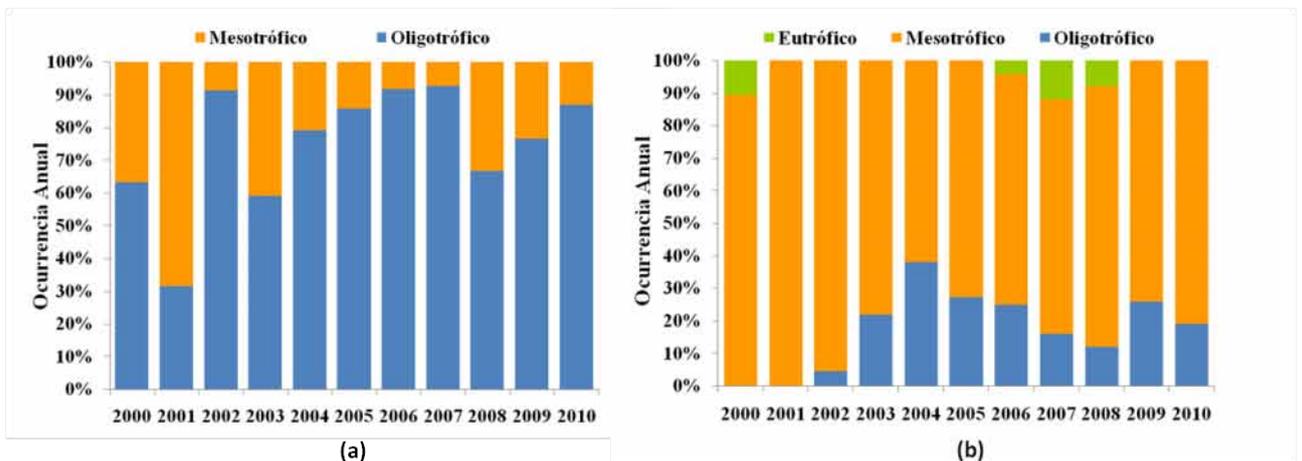
En la várzea de Curuai, los lagos fueron clasificados en base a las concentraciones de clorofila-a y de su posición respecto al río principal. Así los lagos influenciados permanentemente por el río Amazonas fueron clasificados como oligotróficos a mesotróficos, mientras que los lagos de la región centro-norte y región este de la várzea fueron clasificados como mesotróficos a eutróficos y en algunos casos como hipereutróficos. Los gráficos de barra presentan la variación del estado trófico estimada en porcentajes de ocurrencia anual para un periodo de 10 años. Un porcentaje de 100% de un determinado estado (oligotrófico por ejemplo) quiere decir que en 100% del total de las imágenes por año, compuestas a 8 días sin nubes y con un nivel de reflectancia por debajo del valor 0,83 fue encontrado el estado oligotrófico. Cada estado es identificado por el número de semanas que se presenta entre el total de semanas por año. El límite sobre la reflectancia del infrarrojo (>800) está puesto para eliminar los casos de extrema turbidez, cuando no se puede detectar la presencia de algas con la banda verde, por causa de la predominancia de los procesos de absorción y difusión de la luz debido al material mineral en suspensión. En base a este criterio fue posible descartar alrededor de 9 imágenes en promedio por año para todas las estaciones de muestreo en la várzea de Curuai y el lago Parú.

- **Lagos influenciados por el río Amazonas**

El lago Santa Nina (Figura 75 a) que se encuentra influenciado de manera permanente por el río Amazonas a través de dos canales (Figura 74) presentó condiciones oligotróficas dominantes en los 10 años que comprendió el monitoreo. Estas condiciones fueron detectadas por satélite con valores de ocurrencia del 30% como los más bajos, observados el año 2001 y valores de más de 60% observados los años restantes. Los mayores porcentajes de ocurrencia fueron de más del 90% para los años 2002, 2006 y 2007. En este lago también se detectaron condiciones mesotróficas observadas en todos los años durante los periodos de aguas altas (Mayo, Junio, Julio) y descenso de las aguas (Agosto, Septiembre). Cabe destacar que estas condiciones fueron menos frecuentes en relación a las condiciones oligotróficas en todos los años observados. En tanto que, solamente el año 2001 el lago fuemayormente mesotrófico con un 70 % de ocurrencia durante ese año. Contrariamente esta

condición fue reducida, en menos del 10% los años en los que la tendencia al estado oligotrófico fue mayor.

El lago Salé (Figura 75b) está también influenciado por el río Amazonas a través de un canal de conexión, pero mucho más estrecho (aproximadamente 20 Km) y recibe aportes significativos provenientes de tierra firme (Perez, 2008) (Figura 74) Contrariamente al lago Santa Nina, el lago Salé presentó condiciones mayormente mesotróficas. Las condiciones de oligotrofia fueron detectadas a partir del año 2002 hasta el año 2010 en los periodos de crecida de las aguas, descenso de las aguas y aguas bajas, alcanzando valores de ocurrencia que van desde el 5% hasta el 40%, este último valor fue observado el año 2004. Algunos años se presentaron condiciones de eutrofia en este lago, con valores del 10 % el año 2000 durante el periodo de aguas altas (Mayo y Julio), del 2% el año 2006 (Abril), del 11% el año 2007 (Mayo, Junio y Julio) y del 8% el año 2008 (Mayo y Junio).

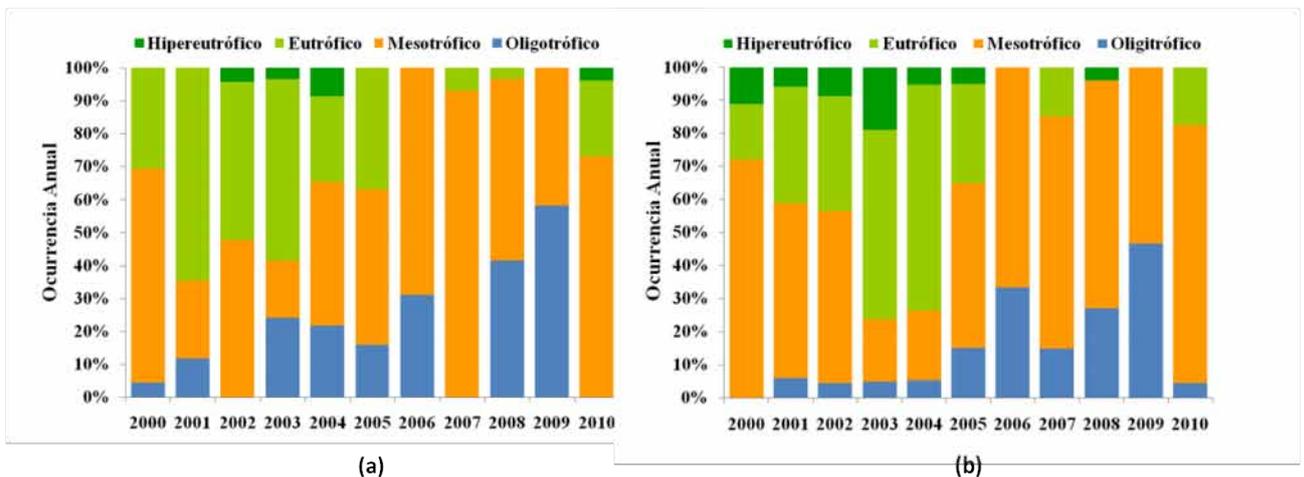


**Figura 75.** Estado trófico de los lagos de la región conectada permanentemente con el río Amazonas, por canales o igarapés en la várzea de Curuai (a) Lago Santa Nina (A11) (b) Lago Salé (A20).

- **Lagos del centro y centro-oeste de la várzea de Curuai**

Las Figuras 76 a y b corresponden a dos sectores (A25 y A24) del lago do Poção que se encuentra en la región centro-oeste de la várzea (Figura 74). Este lago presentó condiciones tróficas similares tanto en el sector norte (A25) como en el sector sur (A24). Se observaron condiciones mesotróficas permanentes en ambos sectores del lago durante todo el periodo estudiado, así como en cada periodo anual. Las condiciones mesotróficas fueron menores los años 2003 y 2004 observadas en el sector sur del lago (Figura 76 b) mientras que en el sector norte (Figura 76 a) los valores menores fueron detectados los años 2001 y 2003.

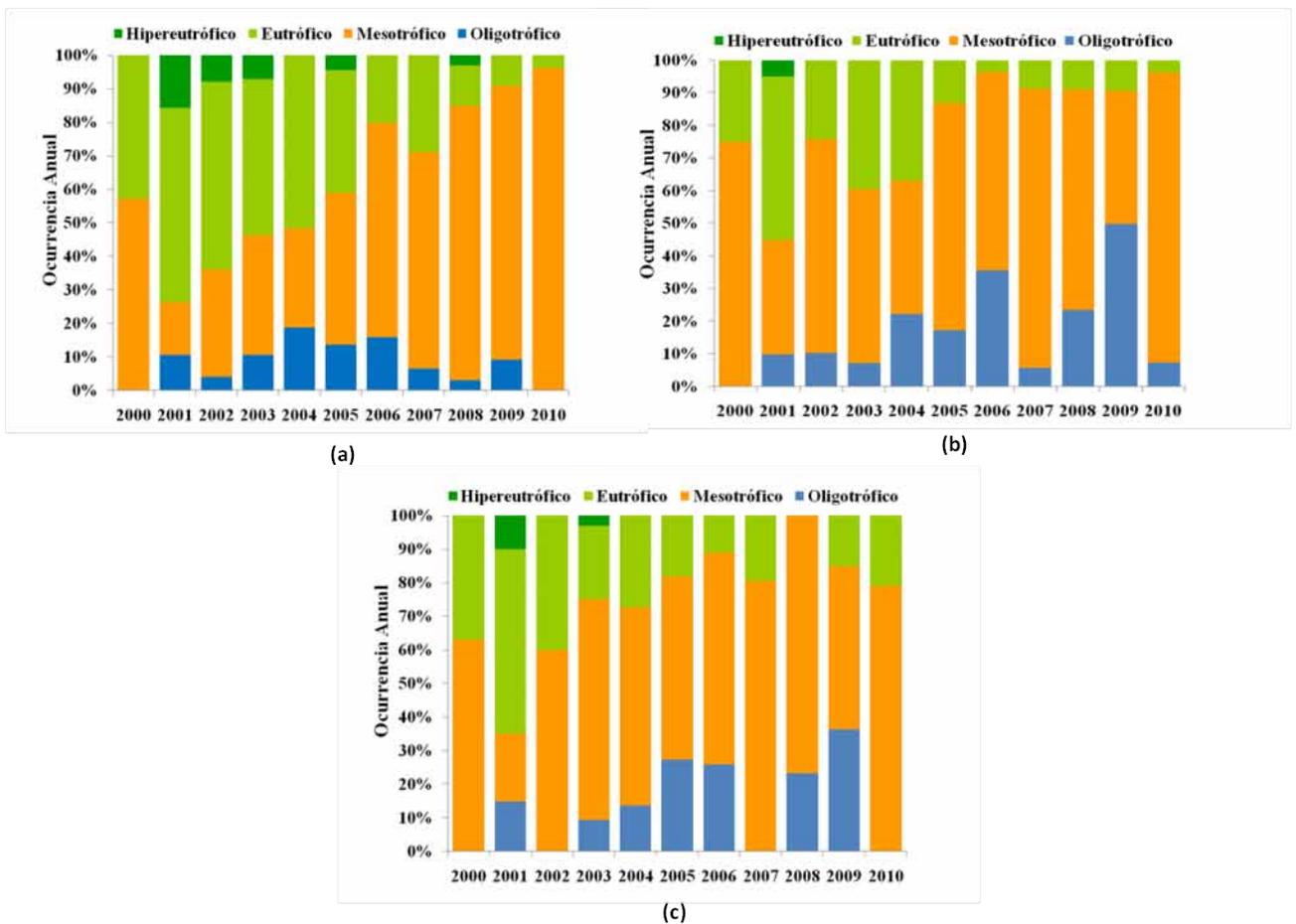
Ambos sectores presentaron condiciones oligotróficas con valores representativos destacándose los años 2006, 2008 y 2009 con una ocurrencia del 25 al 60%. En el sector norte (Figura 76 a) las condiciones oligotróficas desaparecieron los años 2002, 2007 y 2010 y se presentaron mínimamente el año 2000 con menos del 5%. En el sector sur del lago (Figura 76 b) estas condiciones desaparecen el año 2000 y mantienen porcentajes bajos del 5 y 7% hasta el año 2004 y el año 2010. Por otro lado, el lago do Poçã, se caracterizó por presentar condiciones eutróficas e hipereutróficas en ambos sectores, detectadas mayormente en los periodos de aguas altas (Mayo, Junio y Julio), y descenso de las aguas (Agosto y Septiembre) y algunas semanas del periodo de crecida de las aguas (Marzo y Abril), comprendidos entre los años 2000 a 2005 y los años 2007, 2008 y 2010. Al mismo tiempo se observó que en los años 2006 y 2009 estas condiciones estuvieron ausentes tornándose el lago como oligotrófico a mesotrófico en ambos sectores (Figura 76 a y b).



**Figura 76.** Estado trófico de la región centro-oeste de la Várzea de Curuai (a) Lago do Poçã sector norte (A25) (b) Lago do Poçã sector sur (A24).

La Figura 77 presenta el estado trófico de los lagos que forman el lago Grande do Poçã en la región central de la várzea de Curuai. (Figura 74). Los tres lagos presentaron en general características tróficas similares siendo estos lagos clasificados como mesotróficos a eutróficos. La estación A08 del lago Grande (Figura 77 a) exhibió condiciones mesotróficas con mayores porcentajes de ocurrencia en el periodo 2006 a 2010. También el año 2000 fue observado un porcentaje representativo de más del 50%. Las condiciones oligotróficas fueron menores al 20% y se presentaron desde el año 2003 hasta el año 2009. Por el contrario, las condiciones eutróficas dominantes fueron concentradas en el periodo 2000 a 2005 disminuyendo a partir del año 2006. Porcentajes reducidos de condiciones hipereutróficas, del 10 y 15% fueron observados los años 2001 a 2003 durante los periodos de aguas altas (Mayo,

Junio) y descenso de las aguas (Agosto y Septiembre), mientras que el porcentaje más bajo(5%) fue registrado los años 2005 (Julio) y 2008 (Agosto). La estación A09 (lago Vermelho) (Figura 77 b) fue clasificado como mesotrófico a eutrófico. Las condiciones mesotróficas predominaron anual e interanualmente a partir del año 2005 donde se observó mayor incremento alcanzando un 90% el año 2010. Entre los años 2001 y 2004 estas condiciones tuvieron una ocurrencia menor presentando mayormente condiciones eutróficas. Solamente el año 2001 el lago fue considerado hipereutrófico en un periodo reducido del 5% de ocurrencia durante el mes de Septiembre. Durante los años 2001 y 2010 fueron detectadas condiciones oligotróficas con mayor relevancia los años 2006 y 2009 con una ocurrencia del 38 al 50%.



**Figura 77.** Estado trófico del lago Grande do Poçoã en la región central de la várzea de Curuai (a) Estación A08 (b) Estación A09 (lago Vermelho) (c) Estación A14 (lago Inferno).

El lago Inferno o estación A14 (Figura 77 c) fue clasificado también como mesotrófico a eutrófico, durante los 10 años de estudio, exceptuando el año 2008 donde no se detectaron condiciones eutróficas. Por otra parte, las condiciones mesotróficas fueron

relevantes en más del 60% los años 2000, 2002, 2007 y 2010. Estos años coinciden con la ausencia de características oligotróficas. Es importante recalcar que este lago fue mayormente eutrófico gran parte del año 2001 (55%) donde también exhibió condiciones hipereutróficas en un 10% durante el periodo de descenso de las aguas (Agosto y Septiembre). Condiciones similares fueron observadas el año 2003 en el mes de Junio con un porcentaje reducido (2%).

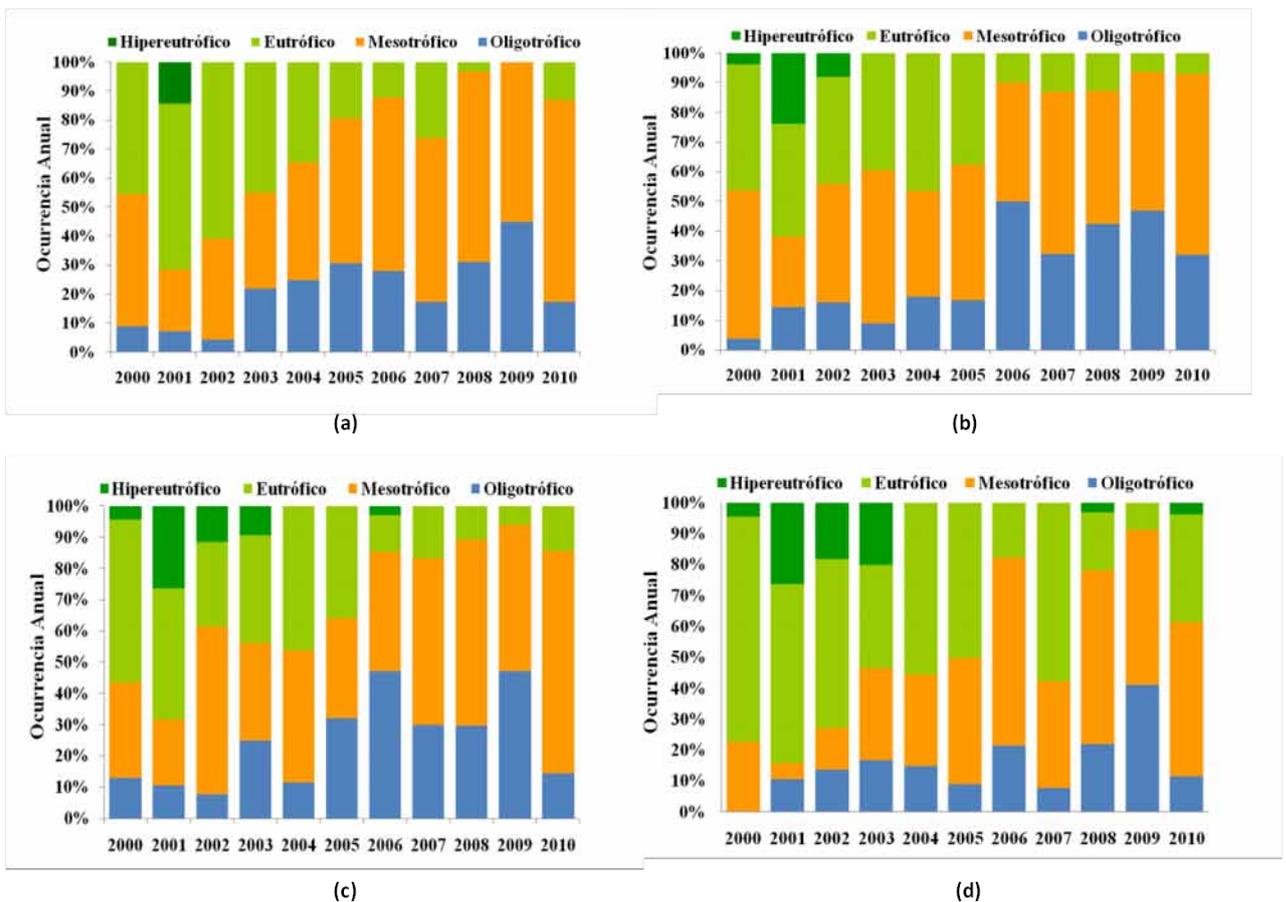
- **Lagos de la región este de la várzea de Curuai**

La estación de muestreo A01 (Figura 74) es aquella que se encuentra más próxima a los canales Foz norte y Foz sur en el extremo este de la várzea. Se caracterizó por presentar condiciones mesotróficas a eutróficas (Figura 78 a) tornándose mayormente eutróficas entre los años 2000 a 2003 con una ocurrencia de más del 40%. A partir del año 2004 hasta el año 2010 existió una disminución significativa, registrándose como escasa el año 2008 (< 2%) y ausente el año 2009. Solamente en el año 2001, este sector se tornó hipereutrófico con un 15% durante los meses de Agosto y Septiembre. A diferencia de estas condiciones, las condiciones mesotróficas estuvieron presentes todos los años, observándose un aumento de estas cuando las anteriores disminuían. A partir del año 2005 estas condiciones incrementaron en más del 50% con mayor ocurrencia el año 2010 alcanzando un 60%. Este sector también exhibió condiciones oligotróficas, que se presentaron todos los años, con porcentajes menores al 10% entre 2000 a 2002, con un 20% los años 2007 y 2010 y con más del 20% los años restantes. La ocurrencia fue mayor el año 2009 con más del 45% (Figura 78 a).

La estación A02 próxima a la anterior presentó un comportamiento similar, de mesotrófico a eutrófico. Así como también, fue observado un incremento de oligotrofia (Figura 78 b). A diferencia de la anterior estación, en esta la ocurrencia de eutrofia fue relativamente constante en más del 30%, en el periodo 2000 a 2005. Nuevamente resaltan las condiciones hipereutróficas con porcentajes reducidos (2% al 8%) los años 2000 y 2002 y con más del 20% el año 2001 durante el periodo de descenso de las aguas (Agosto y Septiembre). Sin embargo, también en los años 2000 y 2002 estas condiciones estuvieron presentes en menos del 10%. A partir del año 2006 se tuvo una disminución de la condición eutrófica, también relativamente constante con menos del 12%. Al mismo tiempo, durante estos años las condiciones mesotróficas se incrementaron con una frecuencia del 60% en el año 2010. Fueron detectados valores importantes de oligotrofia en esta estación los años 2000 a 2005, la

ocurrencia fue menor del 20%. Contrariamente los cinco años restantes estas condiciones se presentaron entre un 32% a 50% los años 2006 y 2009 (Figura 78 b).

Comparando con las anteriores, la estación A03 que se encuentra en el centro de este lago (Figura 74), exhibió un comportamiento mesotrófico a eutrófico, con un incremento de condiciones hipereutróficas entre 2000 a 2004, y en menos del 2% el año 2006. Las condiciones eutróficas fueron mayores los 6 primeros años, decreciendo a menos de un 20% los años restantes, alcanzando un 5% en el año 2009. Del mismo modo, se observó que durante estos años, las condiciones mesotróficas incrementaron, tornándose esta estación mayormente mesotrófica. Además durante este periodo también fueron frecuentes las condiciones oligotróficas, estas fueron menores entre los años 2000 y 2004 contrastando, con el 48% para los años 2006 y 2009 (Figura 78 c). Por último la estación A05 localizada en el centro sur del lago, alejada de la influencia de los canales próximos al río (Figura 74), exhibió un comportamiento mesotrófico a eutrófico. En este sector fueron dominantes las condiciones eutróficas los cinco primeros años, al igual que el año 2007.

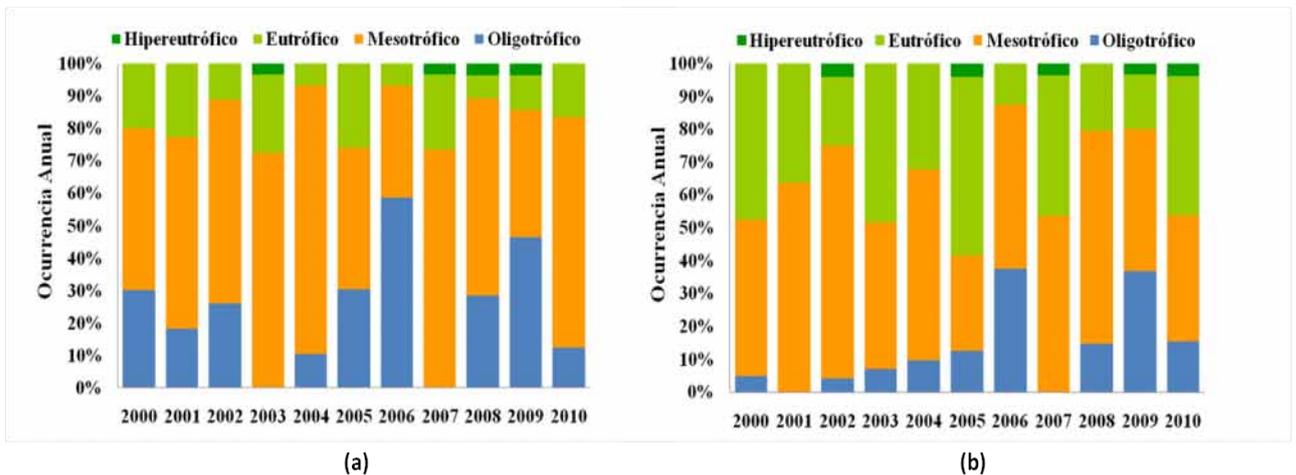


**Figura 78.** Estado trófico del lago Grande de Curuai en la región este de la várzea. (a) Estación A01 (b) Estación A02 (c) Estación A03 (d) Estación A05.

Es preciso recalcar, que en el año 2000 la ocurrencia de la condición eutrófica fue del 70% con un 5% hipereutrófica (Figura 78 d). Entre los años 2001 y 2003 las condiciones hipereutróficas fueron representativas en relación a las demás estaciones con valores de 15% y 25 %. Estas condiciones fueron también detectadas en porcentajes reducidos, menores al 5% los años 2008 y 2010. El carácter mesotrófico se incrementó en esta estación a partir del año 2006. Del mismo modo esta estación fue también oligotrófica aunque en porcentajes menores, durante todo el periodo de monitoreo a excepción del año 2000 siendo relevante el año 2009 (Figura 78 d).

### 5.3.2 Lago Paru

Localizado al noroeste de la várzea de Curuai separado por el curso principal del río Amazonas, este lago fue estudiado considerando dos estaciones de muestreo, una en la región sur (P331) y otra en la región central del lago (P332) (Figura 74) . La región sur del lago Paru (Figura 79 a) se caracterizó por presentar mayor influencia del río Amazonas comparada con la región central del lago (Figura 79 b) Sin embargo ambas regiones presentaron condiciones oligotróficas anuales e interanuales con valores importantes de ocurrencia principalmente los años 2006 y 2009. Estas condiciones estuvieron ausentes los años 2003 y 2007 en la región sur y los años 2001 y 2007 en la región central. Mientras que las condiciones mesotróficas a eutróficas que caracterizan a este lago fueron permanentes durante todo el monitoreo.



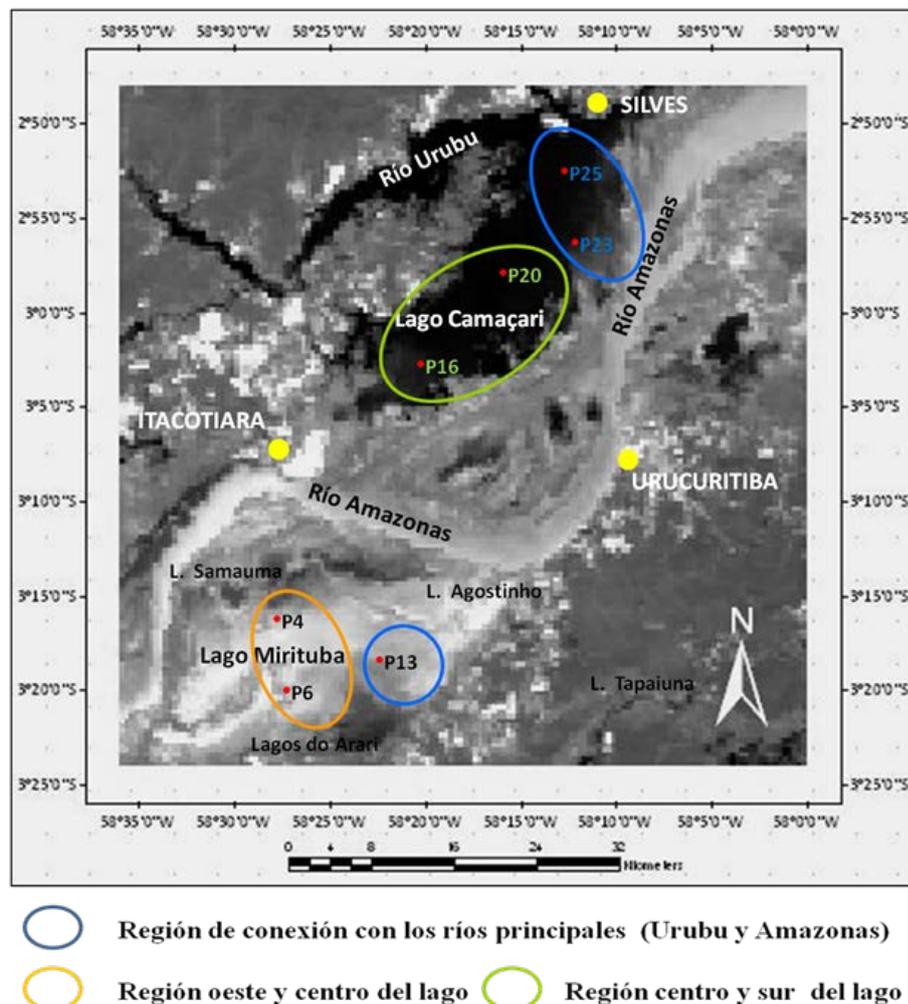
**Figura 79.** Estado trófico del Lago Paru (a) Región sur, estación P331 (b) Región central, estación P332.

La región sur fue predominantemente mesotrófica con valores del 40% al 80% y eutrófica hasta un 25%; con un comportamiento hipereutrófico de solo el 2% para los años

2003, 2007 al 2009 (Figura 79a). Por el contrario las condiciones eutróficas fueron mayores en la región central con valores de 10% a más del 40%. Las condiciones hipereutróficas también fueron observadas en un 2% en cinco de los diez años. (Figura 79 b). Al contrario de lo observado en varios lagos de la Várzea de Curuaí, no se pueden distinguir patrones o ciclos interanuales, demostrando una relativa estabilidad de las condiciones tróficas de este lago, que es más parecido a un lago con aportes exclusivos provenientes de los ríos Amazonas y Trombetas.

### 5.3.3 Lagos Camaçari y Mirituba

La Figura 80 muestra las principales regiones y estaciones de muestreo seleccionadas en los lagos Camaçari y Mirituba.



**Figura 80.** Principales regiones y estaciones de muestreo de los lagos Camaçari (parte superior) y Mirituba (parte inferior) que representan la variación del estado trófico.

### 5.3.3.1 Lago Camaçari

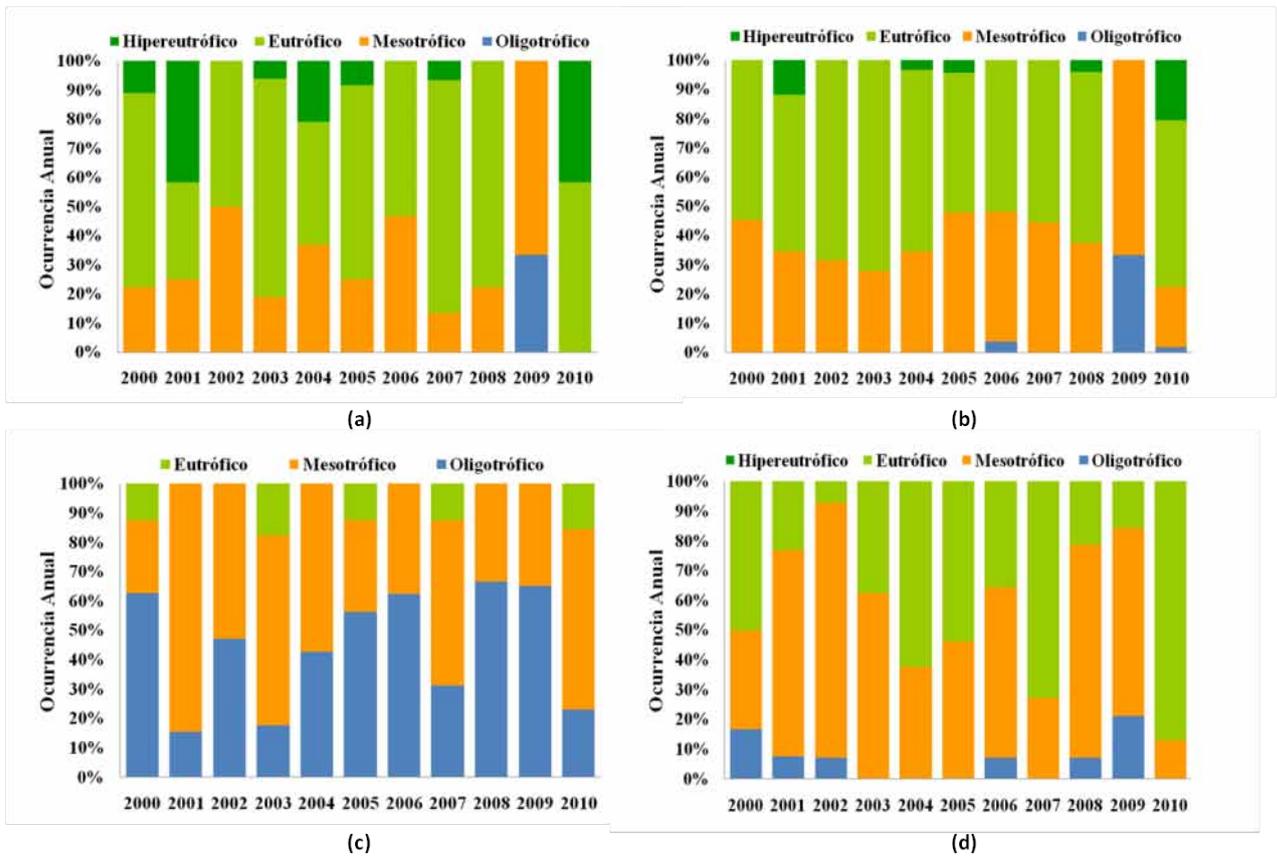
La región sur (P16) del Lago Camaçari (Figura 80) se caracterizó por condiciones eutróficas dominantes en todo el periodo de estudio (Figura 81 a) exceptuando el año 2009, caracterizándose el lago como oligotrófico en un 35% a mesotrófico, el restante 65%. Durante siete años el lago presentó condiciones hipereutróficas, con valores relevantes en los años 2001, 2004 y 2010 del 5% al 40%.de ocurrencia, en los periodos de aguas altas y descenso de las aguas. Es importante mencionar que el año 2010 el lago fue totalmente eutrófico a hipereutrófico, abarcando los periodos de crecida, aguas altas y descenso de las aguas.

La región central del lago (P20) (Figura 80) presentó características similares a la región sur. Sin embargo, fueron observadas algunas diferencias, como la regularidad de las condiciones mesotróficas que se mantuvieron durante todo el monitoreo. Al igual que en la región sur, esta región del lago fue oligotrófica en un 35% y mesotrófica en un 65% el año 2009. Los valores de hipereutrofia fueron observados en cinco de los diez años con registros importantes los años 2001 (Julio) con un 10% y 2010 (Abril, Mayo y Agosto) con un 20%. Fueron observadas condiciones eutróficas predominantes en todos los años, durante los periodos de aguas altas y descenso de las aguas y algunas semanas durante los periodos de crecida de las aguas y aguas bajas, con excepción el año 2009 donde las mismas estuvieron ausentes (Figura 81 b).

A diferencia de las anteriores estaciones, la estación situada al este del lago (P23) (Figura 81c) mantiene conexión directa con el río Amazonas en periodo de aguas altas (Figura 80) presentando en tal sentido características tróficas diferenciales. Esta estación se caracterizó por la predominancia de condiciones oligotróficas en todos los periodos anuales e interanuales. La ocurrencia de estas características presentó una variación del 15% a más del 60%. Las condiciones mesotróficas fueron mayores en los años 2001, 2003, 2007 y 2010. Asimismo fueron detectadas condiciones eutróficas, con menores porcentajes, entre el 10 y 15% en cinco años entre Mayo y Septiembre.

La región norte del lago (P25) (Figura 81 d) que mantiene conexión con el río Urubu de aguas negras (Figura 80) fue mesotrófica a eutrófica. Las condiciones mesotróficas fueron mayores durante los cinco primeros años con mayor ocurrencia los años 2001 y 2002. A partir del año 2006 dominaron las condiciones eutróficas en esta región, con mayor ocurrencia los años 2007 (Marzo-Agosto) con el 70% y 2010 (Mayo-Agosto) con el 85%. Las características oligotróficas se registraron con valores comparativamente menores, entre el 8% y 25%, en

seis años, durante el periodo de aguas altas (Mayo, Junio y Julio). Es importante mencionar que el año 2010 la región norte del lago fue mayormente eutrófica (Figura 81 d).



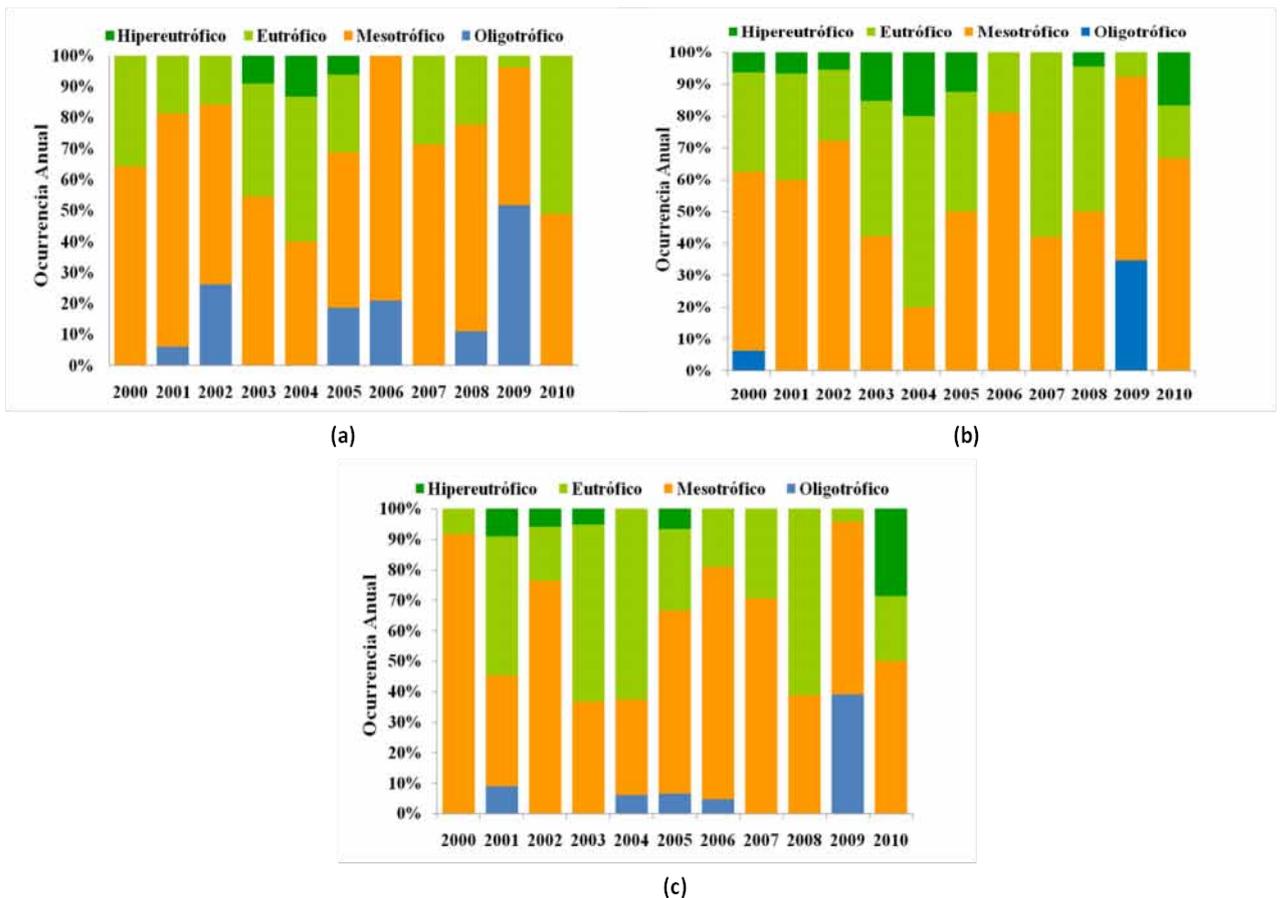
**Figura 81.** Estado trófico del Lago Camaçari (a) Región sur (P16) (b) Región central (P20) (c) Región este (P23) (d) Región norte (P25).

### 5.3.3.2 Lago Mirituba

El lago Mirituba se caracterizó por presentar condiciones mesotróficas a eutróficas dominantes en sus tres regiones (Figura 82). La región oeste (P4) más próxima al río Amazonas fue mayormente mesotrófica, y oligotrófica con menores porcentajes (5% al 28%) en cinco años. El año 2009 se caracterizó por ser oligotrófico con un valor excepcionalmente alto de más del 50% de ocurrencia anual debido al evento de inundación registrado. Las condiciones eutróficas estuvieron presentes en todos los años, con valores mínimos (2%) en el 2009 y ausentes en el 2006. Las condiciones hipereutróficas se presentaron durante los años 2003 a 2005 durante los periodos de aguas altas (Junio y Julio) y descenso de las aguas (Agosto). De la misma forma, la región central (P6) se caracterizó por presentar un estado mesotrófico a eutrófico durante los 10 años observados, destacándose valores del 20% a más

del 50% de ocurrencia anual (Figura 82) Por otro lado, también fueron observadas condiciones hipereutróficas reducidas de 2 a 20% (Mayo a Septiembre), excepto los años 2006, 2007 y 2009. El estado oligotrófico se presentó solamente en dos años con porcentajes del 7% el año 2000 (Julio) y del 35% el año 2009 (Abril a Julio).

El sector este del lago (P13) más próximo a las márgenes de tierra firme de los lagos (Figura 80), al igual que los anteriores sectores presentó características mesotróficas a eutróficas dominantes durante los 10 años estudiados. Dentro de las características mesotróficas se destacaron valores del 30% (2001 y 2004) a más del 50% los años 2002, 2005, 2006 y 2009 alcanzando un valor del 90% en el año 2000. Esta región también presentó condiciones hipereutróficas reportadas durante los periodos de aguas altas y descenso de las aguas, para cinco años, con valores del 5% a 28% de ocurrencia anual. La condiciones oligotróficas presentaron valores menores (2% al 9%) durante los periodos de crecida de las aguas y aguas altas en cuatro años y el mayor valor (40%) fue reportado para el año 2009 (Abril a Julio) (Figura 82).



**Figura 82.** Estado trófico del Lago Mirituba (a) Región oeste (P4) (b) Región central (P6) (c) Región este (P13).

### **5.3.4 Várzea de Janauacá y Lago Manacapuru**

Debido al menor tamaño y forma de la várzea y a las características físico – químicas del lago no fue posible en estos dos ambientes obtener series temporales completas para cada año, para realizar un estudio interanual robusto del estado trófico en función del tiempo. Sin embargo para estos dos ambientes se realizaron calibraciones con los datos de mediciones radiométricas (secciones 4.2.2 y 4.2.3.3) y validaciones con los datos de campo (secciones 4.3.1 y 4.3.2).

## CAPÍTULO 6

### DISCUSIONES

#### 6.1 Estado trófico en lagos tropicales y planicies de inundación

Tradicionalmente, el estado trófico de los ambientes acuáticos puede ser clasificado de acuerdo a la productividad biológica (concentración de clorofila-a) y a las concentraciones de nutrientes (fósforo y nitrógeno) complementadas también con otras variables, como la transparencia del agua (Carlson 1977; OECD 1982; Salas & Martino 1991). Muchos de los estudios en áreas tropicales tienen su base en clasificaciones y tipologías de áreas templadas, las cuales son mucho más estables y por consiguiente, fácilmente monitoreadas. Tal es el caso del índice de Carlson (1977) empleado para la determinación del estado trófico en ambientes templados.

Sobre este punto, Esteves (1988) se refiere como inadecuado, el uso de una tipología de lagos templados según su estado trófico aplicada a lagos tropicales. Esto se debe a que la tipología desarrollada en regiones templadas utiliza indicadores físicos, químicos y biológicos característicos solamente para los diferentes ecosistemas lacustres de aquella región. A diferencia, en las regiones tropicales se ha observado que un mismo lago puede presentar simultáneamente características oligotróficas y eutróficas o alternar las mismas a lo largo de un año, en función de los fenómenos meteorológicos (estación seca y húmeda). Sin embargo, el índice de Carlson (1977) fue aplicado con éxito, con modificaciones realizadas por Toledo (1990) para el estudio del estado trófico en lagos y reservorios tropicales (Ribeiro et al. 2005, Bardy & Novo 2007, Crossetti & Bicudo 2008) y fue conocido posteriormente como el índice de estado trófico de Carlson modificado (IET)m (Toledo 1990). Otro índice empleado igualmente en ambientes acuáticos tropicales es el Índice de Lamparelli (2004) específicamente utilizado para reservorios (Cardoso da Silva et al. 2007).

Comparando ambos índices en un mismo estudio, fue demostrado por ejemplo, que en la metodología propuesta por Lamparelli (2004), el índice de estado trófico (IET) presenta mayor sensibilidad a las variaciones, incrementando de esta manera, la amplitud de las clasificaciones tróficas; mientras que en la metodología propuesta por Toledo (1990) el índice

de estado trófico modificado (IET m) presenta menor amplitud de clasificación pero mayor amplitud numérica, siendo capaz de detectar concentraciones menores. Por cuanto, en términos de aplicación, fue más recomendado el uso del índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo (Nogueira & Ramirez 1998, Mercante & Tucci-Moura 1999; Garcia et al. 2007, Fia et al. 2009). Cabe resaltar que los valores numéricos obtenidos en la aplicación de estos índices, no definen la condición de eutrofia, solamente pueden ser considerados como indicadores del potencial de ella, ya que el indicador de estado trófico puede variar entre lagos y de manera estacional (Nogueira & Ramirez 1998).

En este estudio, la utilización de las imágenes del sensor MODIS y las respuestas espectrales de datos adquiridos en el campo, permitieron estimar la distribución espacial de la clorofila-a, utilizando este parámetro para clasificar los lagos de las planicies de inundación según su estado trófico. En tal sentido, se aplicó el índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo (IET)m para ambientes tropicales. La serie temporal de datos MODIS analizada permitió inferir que el estado trófico de los lagos fue variable inter e intra-anualmente para un periodo de 10 años. Los resultados estimados en porcentajes de ocurrencia anual presentaron correspondencia en cuanto a la clasificación trófica, reportando en su mayoría, lagos que alternaron entre características oligotróficas a mesotróficas, mesotróficas a eutróficas y en algunos casos se reportaron características hipereutróficas, dependiendo de los periodos de aguas altas y bajas y de su posición respecto al río principal. Así los lagos influenciados permanentemente por el río Amazonas, a través de canales de conexión (lago Santa Ninha y lago Salé) fueron clasificados como oligotróficos a mesotróficos y esta condición fue más acentuada en los periodos de crecida de las aguas (Febrero a Abril) y en periodos de extrema inundación, por ejemplo los años 2006 y 2009. Los lagos clasificados como mesotróficos a eutróficos y en algunos casos hipereutróficos se localizaron en las regiones central (lago Grande do Poçãõ), centro-oeste (lago do Poçãõ) y este de la várzea (lago Grande de Curuaí) y se presentaron durante los periodos de aguas altas (Mayo a Julio) y de descenso de las aguas (Agosto a Octubre).

Otros estudios, como el de Alcántara (2007) reportó en el lago Grande do Poçãõ, las mayores concentraciones de clorofila-a (350 µg/L a 5,61 µg/L; valor medio de 68,78 µg/L) durante el periodo de descenso de las aguas, seguido por el periodo de aguas altas con valores de 131, 27 µg/L a 1,59 µg/L y valor medio de 30,61 µg/L. Freire (2010) en su estudio sobre la distribución espacial de la clorofila *a* en la várzea de Curuaí, a partir de imágenes MODIS utilizó también un indicador del estado trófico, basado en el nivel de persistencia de la

concentración de clorofila-a que fue generalizado en dos categorías: natural y antrópica. Su trabajo señaló que las altas concentraciones de clorofila pueden estar asociadas a la productividad natural del sistema, sin estar necesariamente relacionadas al impacto de actividades antrópicas presentes en la várzea. De esta forma, fue posible verificar mayores concentraciones de clorofila durante el periodo de aguas altas (Junio), en algunas localidades del lago Grande do Poção y en el periodo de descenso de las aguas (Septiembre) en el lago Grande de Curuai (valores por encima de la media 65,8 µg/L), donde se identificaron floraciones de algas.

Los resultados del presente estudio y de los estudios citados anteriormente en la zona, comprobaron que las condiciones eutróficas e hipereutróficas se presentaron con mayor frecuencia en los periodos de aguas altas y de descenso de las aguas, la mayor parte del estudio (2000-2010), a excepción de los años de máxima inundación 2006 y 2009. De esta manera, estos resultados contrastaron en parte con lo expuesto por Rai & Hill (1984), cuyo trabajo fue el primero en designar a los lagos de várzea y lagos ría de la región amazónica con el término “multitróficos”, refiriéndose al nivel trófico relacionado con la profundidad y determinando que los niveles bajos de agua están relacionados a condiciones eutróficas y los niveles de agua altos a condiciones oligotróficas.

## **6.2 Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en la várzea de Curuai**

Las Figuras 83, 84 y 85 muestran la relación de la eutrofización (condiciones eutróficas e hipereutróficas) con la dinámica hidrológica del río Amazonas en la estación de Óbidos (Red de mediciones, ANA 2010) en tres regiones de la várzea de Curuai. Dentro de esta relación, fueron considerados dos parámetros hidrológicos, uno de máximo nivel de inundación y otro de nivel bajo extremo. Al mismo tiempo se diferenciaron también dos periodos, uno estable y otro marcado por eventos hidrológicos extremos.

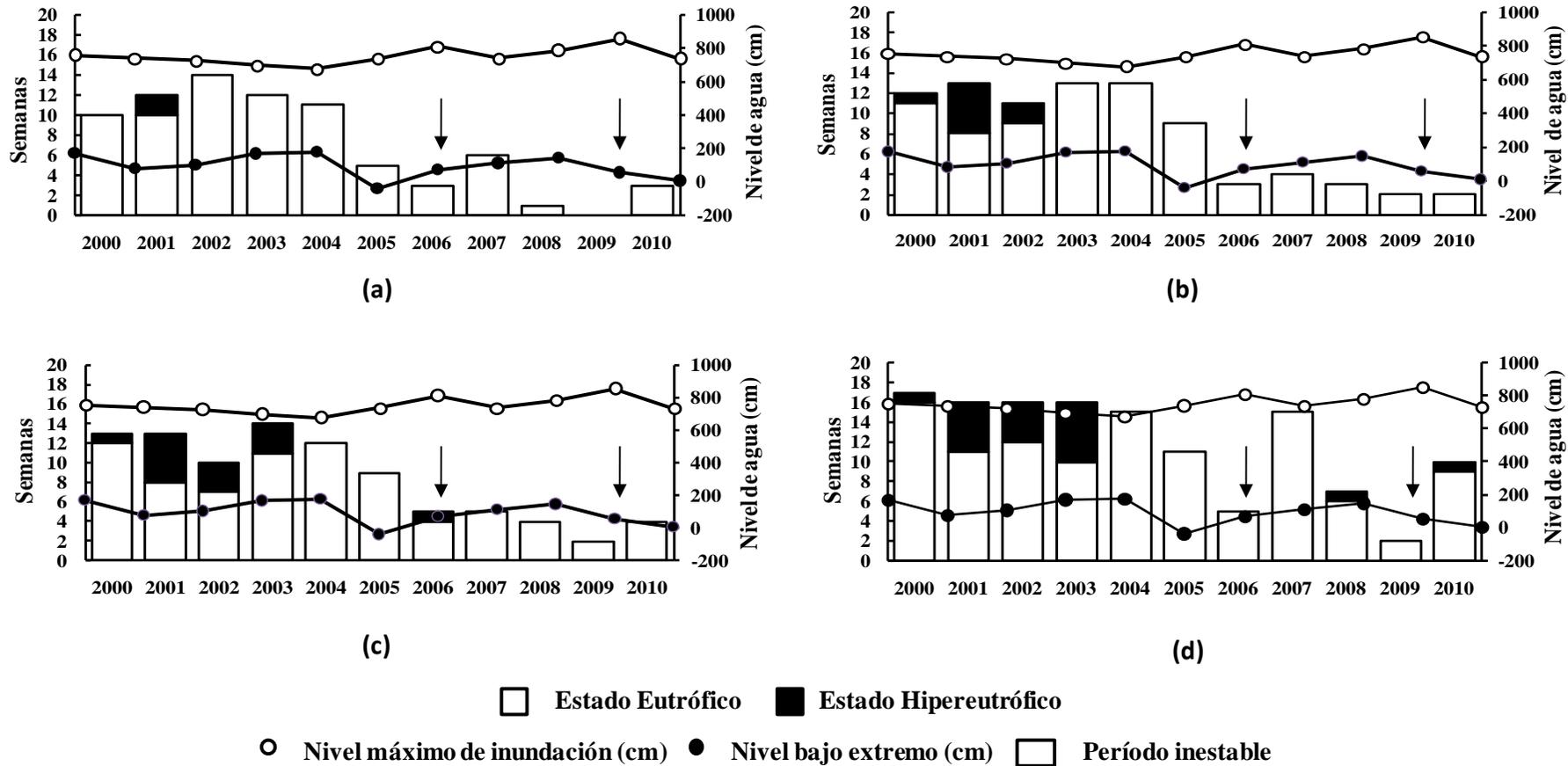
El primer periodo (2000-2005) comprendió una etapa de mayor permanencia de eutrofización y una predominancia de condiciones hipereutróficas. Entre los meses de Septiembre y Noviembre de 2005, se produjo un evento de sequía extrema reportando el nivel de agua más bajo (-0,39 m) en Octubre de ese año. Las consecuencias de este evento fueron observadas el siguiente año (2006), iniciándose un periodo inestable caracterizado por la presencia de fuertes inundaciones en los años 2006 (8,19 m) y 2009 (8,60 m). Durante este

periodo se produjo una reducción drástica e irregular de los procesos de eutrofización y en algunos casos la ausencia de los mismos.

La Figura 83 corresponde al Lago Grande de Curuaí, localizado en la región este de la várzea, que comprende cuatro estaciones de muestreo definidas (A01, A02, A03 y A05). En este sector, se observó la predominancia de condiciones eutróficas con un tiempo de permanencia mayor, de 10 a 17 semanas durante el periodo estable (2000-2005). Al mismo tiempo, cabe resaltar que en este periodo se presentaron condiciones hipereutróficas entre los años 2000 a 2003. En la estación A01 cerca a los canales de conexión Foz norte y Foz sur con el río Amazonas, las condiciones hipereutróficas se observaron solo el año 2001 con una permanencia de dos semanas (Figura 83a).

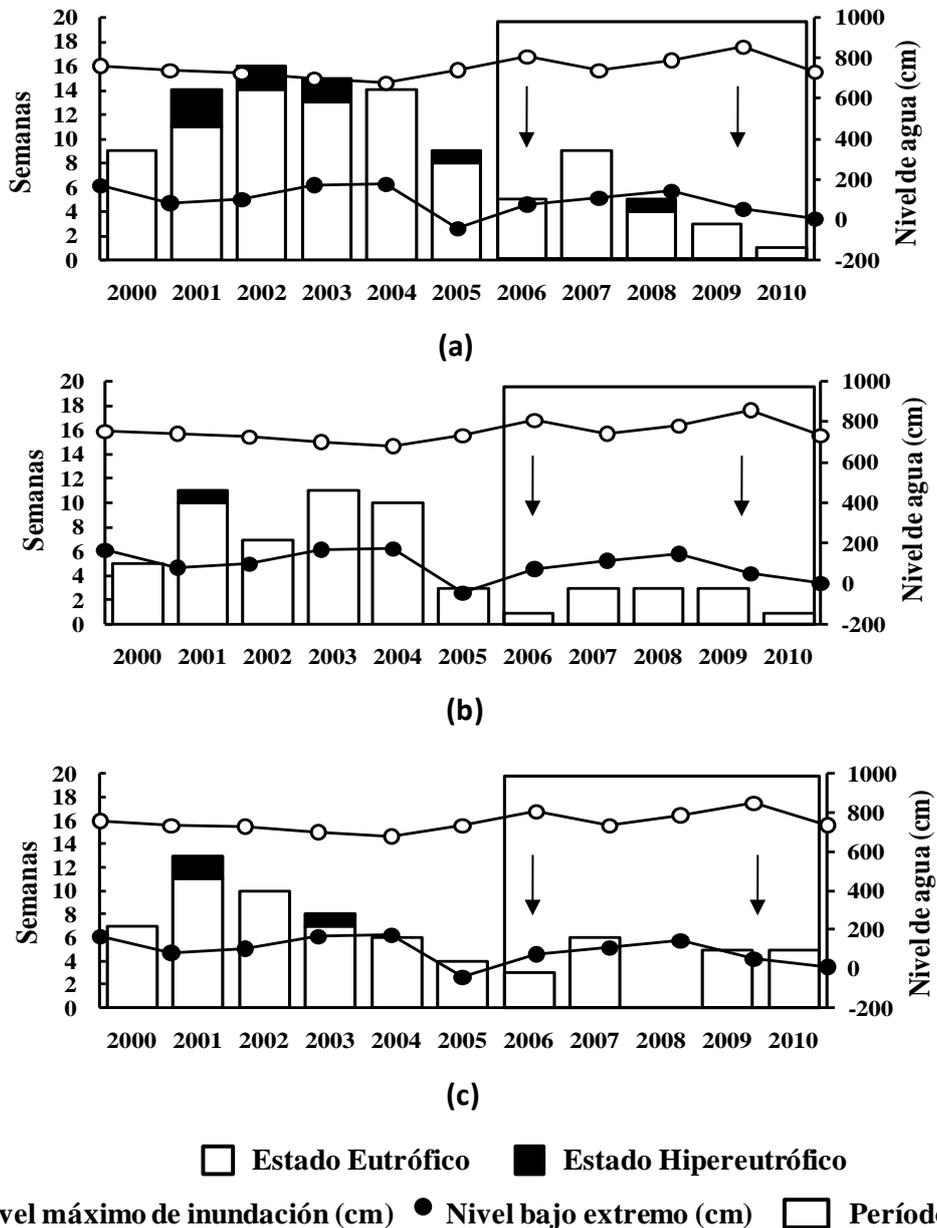
En la estación A02 estas condiciones se reportaron los años 2000 a 2002 con una permanencia de 1 a 5 semanas (Figura 83 b) y en las estaciones A03 y A05 fueron observadas los años 2000 a 2003 con una permanencia de 1 a 6 semanas (Figura 83 c y d). El segundo periodo se caracterizó por una reducción drástica e irregular del tiempo de permanencia de la eutrofización en todos los lagos (Figura 83 a, b, c y d), Durante este periodo la permanencia aproximada de las condiciones eutróficas, fue de 2 a 7 semanas en las estaciones A01, A02 y A03 (Figura 83 a, b y c), mientras que en la estación A05 más alejada de la entrada al lago, la permanencia fue de 15 semanas el año 2007 y de 10 en el año 2010. En esta estación también se presentaron condiciones hipereutróficas, los años 2008 y 2010, con un tiempo de permanencia muy reducido, de una semana (Figura 83 d).

La Figura 84 corresponde a la región central de la várzea de Curuaí, denominada también lago Grande do Poção. Esta región comprende tres estaciones de muestreo: A08, A09 y A14. Durante el periodo estable, en general, las condiciones eutróficas permanecieron de 3 a 16 semanas, con menos semanas en A09 y A14. Este periodo se caracterizó por presentar condiciones hipereutróficas, observadas mayormente en la estación A08, en los años 2001 a 2005 excepto en 2004 (Figura 84 a). Por el contrario, en la estación A09 fueron observadas solo en 2001 (Figura 84 b) y en la estación A14 en 2001 y 2003 (Figura 84 c). Al igual que en el caso anterior, en el segundo periodo la permanencia de la eutrofización fue reducida, en todas las estaciones. En la estación A08 las condiciones eutróficas permanecieron de 1 a 9 semanas, y las hipereutróficas se mantuvieron únicamente por una semana en 2008.



**Figura 83.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Grande (región este) de la várzea de Curuaí. (a) Estación de muestreo A01 (b) Estación de muestreo A02 (c) Estación de muestreo A03 (d) Estación de muestreo A05. El eje X representa el periodo de estudio de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de las condiciones eutróficas e hipereutróficas en los lagos y el eje Y secundario representa el nivel de agua (cm). Las flechas indican la reducción o ausencia de eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

En la estación A09, el tiempo de permanencia fue más bajo en relación a las demás (1 a 3 semanas) sin registro de hipereutrofia (Figura 84 b). En la estación A14 las condiciones eutróficas permanecieron de 3 a 6 semanas, a excepción del año 2008 donde estuvieron ausentes. Tampoco fueron registradas condiciones hipereutróficas (Figura 84 c).



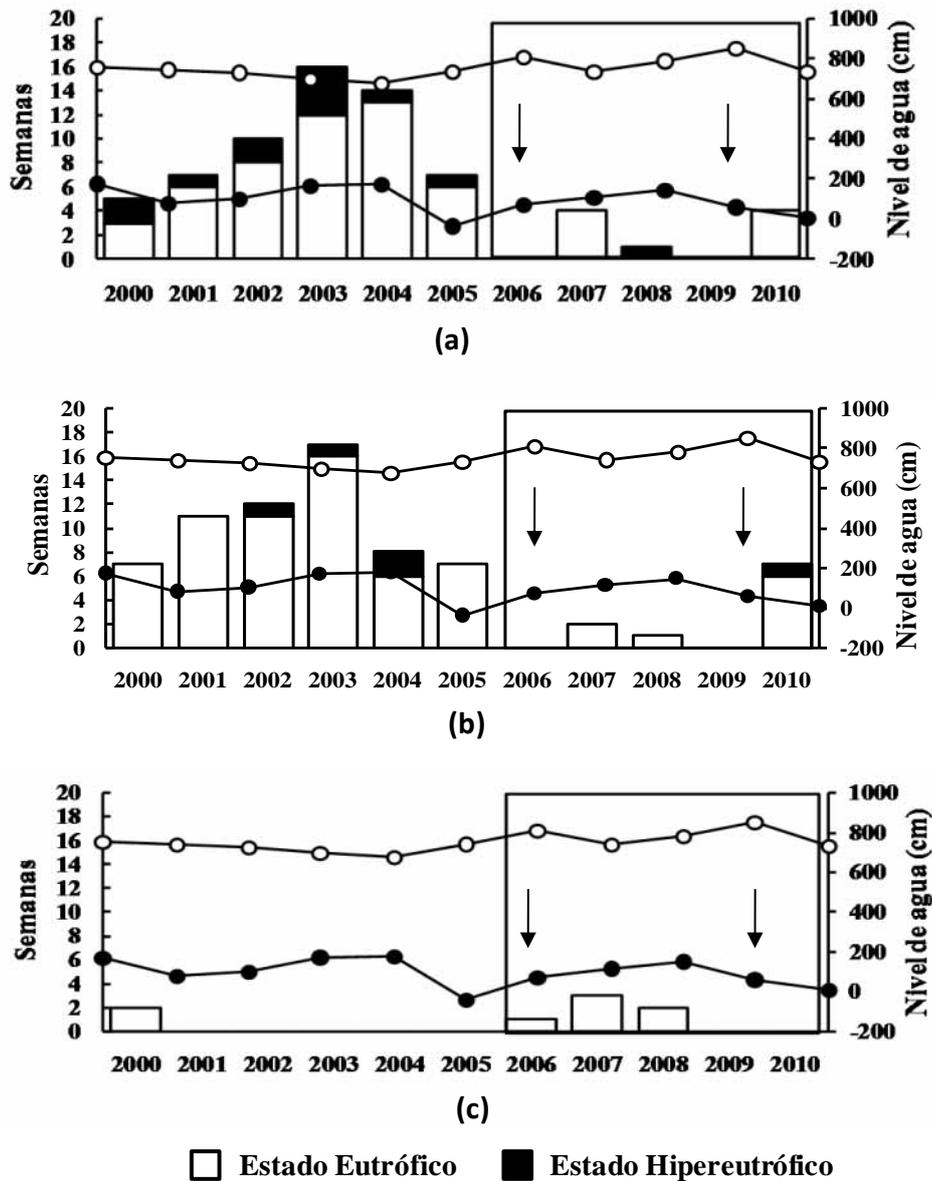
**Figura 84.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Grande do Poção (región central) de la várzea de Curuaí. (a) Estación de muestreo A08 (b) estación de muestreo A09 (c) Estación de muestreo A14. El eje X representa el periodo de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de las condiciones eutróficas e hipereutróficas en los lagos y el eje Y secundario representa el nivel de agua en cm. Las flechas indican la reducción drástica o ausencia de eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

La Figura 85 corresponde a las regiones centro-oeste y oeste de la várzea que comprenden los lagos Poçoão (A24 y A25) y Salé (A20). Ambos sectores se caracterizaron por presentar una reducida permanencia de eutrofización, en los dos periodos, en relación a los demás sectores. En las estaciones A24 y A25, las condiciones eutróficas se mantuvieron de 5 a 17 semanas. La mayor permanencia fue registrada los años 2003 y 2004. Las condiciones hipereutróficas fueron observadas todos los años del periodo estable (2000-2005) en la estación A24 (Figura 85 a), mientras que en la estación A25 fueron reportadas solo los años 2002 a 2004 (Figura 85 b). Por otra parte, en el segundo periodo las condiciones eutróficas e hipereutróficas se mantuvieron de 1 a 7 semanas los años 2007, 2008 y 2010 y estuvieron ausentes en 2006 y 2009 en ambas estaciones. (Figura 85 a y b).

Contrariamente a los casos anteriores, el lago Salé (A20) se caracterizó por una mínima presencia de condiciones eutróficas. Durante el primer periodo, la eutrofización permaneció por 2 semanas el año 2000, estando ausente los años siguientes. En contraste, en el segundo periodo, la permanencia fue 1 a 3 semanas registrada los años 2006, 2007 y 2008. Los años restantes se caracterizaron por la ausencia de estas condiciones (Figura 85 c).

Los resultados basados en la reflectancia de las imágenes MODIS indicarían que la eutrofización y presencia de floraciones algales tienden a desarrollarse y permanecer mayormente en las áreas inundadas extensas y profundas o aguas abiertas de los lagos (Melack & Forsberg 2001). Tal es el caso de las regiones: este o lago Grande de Curuaí (A01, A02, A03 y A05) que representa la mayor área inundada de la várzea, central o lago Grande do Poçoão (A08, A09 y A14) que constituye la segunda mayor área inundada, seguida por región centro-oeste o lago do Poçoão (A24 y A25). Estas tres regiones fueron caracterizados como de aguas abiertas permanentes (Figura 86) por Martínez & Le Toan (2007) coincidiendo con la clasificación actual dada por Junk et al. 2012 para humedales amazónicos.

Durante las campañas realizadas por Perez (2008) los años 2004, 2005 y 2006 en la planicie, fueron determinados los valores de superficie y profundidad de estas regiones. En cuanto a estos valores, la región este o Lago Grande de Curuaí osciló entre 309,7 Km<sup>2</sup> y 9,95 m (época húmeda) a 116,46 Km<sup>2</sup> y 0,36 m (época seca). Esta región fue también definida por Barbosa (2005) como de mayor profundidad y estabilidad.

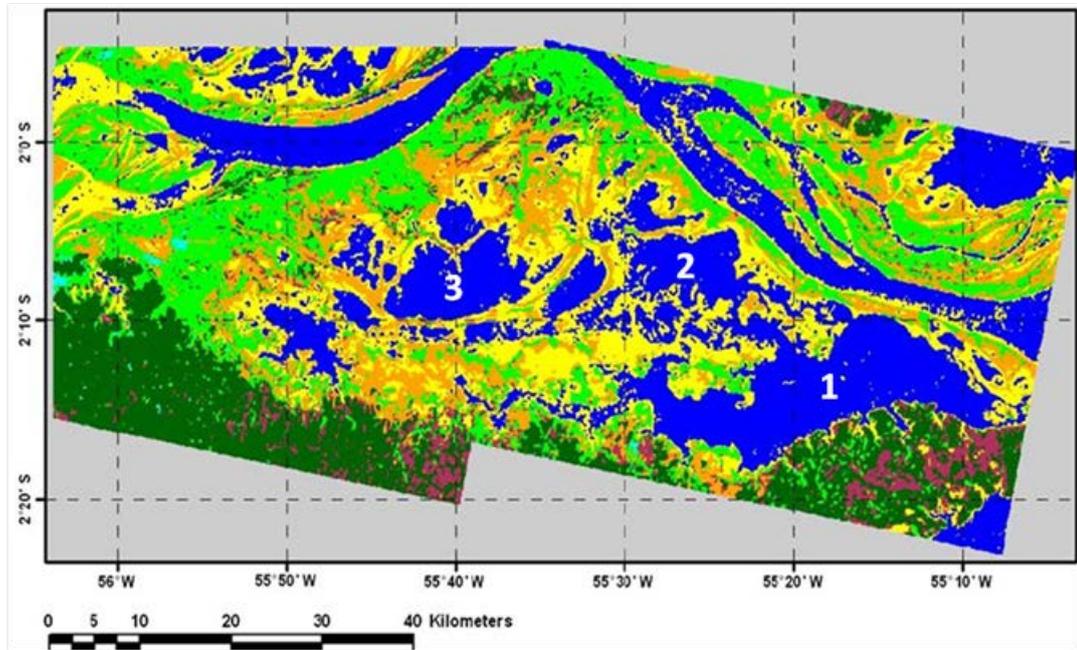


○ Nivel máximo de inundación (cm)    ● Nivel bajo extremo (cm)    □ Período inestable

**Figura 85.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago do Poção (sector centro-oeste) de la várzea (a) Estación de muestreo A24 (b) Estación de muestreo (A25) y en el lago Salé (sector oeste) (c) Estación de muestreo (A20) de la várzea de Curuaí. El eje X representa el periodo de estudio de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de las condiciones eutróficas e hipereutróficas en los lagos y el eje Y secundario representa el nivel de agua en cm. Las flechas indican la reducción drástica o ausencia de eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

En las demás regiones, la superficie del Lago Grande do Poção registrada en estas campañas osciló entre 257,32 km<sup>2</sup> (época húmeda) a 51,3 Km<sup>2</sup> (época seca), mientras que en

el Lago do Poço los valores registrados fueron menores, de 218,09 Km<sup>2</sup> y 5,70 m (época húmeda) a 43 Km<sup>2</sup> y 0,25 m (época seca).



Legenda

	Aguas abiertas permanentes		Vegetación baja nunca inundada		Vegetación baja ocasionalmente inundada
	Bosque inundado ocasionalmente		Bosque inundado permanentemente		Suelos desnudos inundados ocasionalmente
	Vegetación nunca inundada				

**Figura 86.** Mapa de la Várzea de Curuaí derivado de imágenes 21 J-ERS. El mapa presenta condiciones de inundación (nunca, ocasionalmente, permanentemente inundadas) y el tipo de vegetación (bosque, suelos desnudos y vegetación baja) 1. Lago Grande de Curuaí (sector este) 2. Lago Grande do Poço (sector norte) 3. Lago do Poço (sector oeste) (Modificado de Martinez & Le Toan 2007).

Por otra parte, la relación directa de los lagos con el río principal a través de canales de conexión, determinó también la eventual o escasa presencia de eutrofización o la ausencia de las misma, ya que por lo general, en los lagos, es rara la presencia de fitoplancton en los canales de los ríos turbios (Junk et al. 2012). Tal es el caso de los lagos Salé (región oeste) y Santa Ninha (región norte). Este último lago, no se encuentra representado en los anteriores gráficos por la ausencia total de procesos de eutrofización. Como este lago se encuentra conectado con el río a través de un canal de pequeña extensión (aproximadamente 3,5 km) se mantiene constante la entrada de material fluvial presentando altos niveles de sedimentos en suspensión, principalmente en los periodos de crecida de las aguas (Amorim 2009; Moreira et al. 2009).

En cuanto al lago Salé (región oeste) fue caracterizado como mesotrófico, es decir con una productividad biológica intermedia (CETESB 2002), condición predominante en todos los años y establecida en valores de concentración de clorofila-a de 5 a 10,24  $\mu\text{g/L}$ . A diferencia de los demás lagos que se encuentran influenciados directamente por el río principal, este lago recibe una mezcla de aguas que proviene del río Amazonas a través del igarapé o canal de conexión Ai10 y del Lago Curumucuri, un sistema de aguas negras (Perez 2008). Los resultados promedio basados en términos de concentración de clorofila-a (5,5 a 7,1  $\mu\text{g/L}$ ) caracterizaron al lago Salé principalmente como mesotrófico. Estos resultados contrastaron con el valor medio de 13  $\mu\text{g/L}$  estimado por Rai & Hill (1984) y que corresponde a concentraciones intermedias que caracterizan los lagos con mezcla de aguas. Asimismo, este valor se encuentra dentro de los resultados obtenidos por Perez (2008), con valores medios de 12,41 a 17,93  $\mu\text{g/L}$  registrados en el mismo lago. Estos valores corresponderían más a condiciones eutróficas, según el índice de estado trófico de Carlson modificado (IETm) juntamente con los valores de la reflectancia de satélite. Sin embargo, se reportó eventualmente la presencia de condiciones eutróficas en determinados años (2000, 2006, 2007 y 2008) por un tiempo reducido.

Según Putz & Junk (1997) los lagos con mezcla de aguas pueden contribuir en parte, a un mayor enriquecimiento, debido a que una mayor producción de fitoplancton y perifiton es alcanzada en estos lagos, los cuales presentan una adecuada proporción de nutrientes. No obstante, se debe considerar el grado de aporte y la estabilidad del sistema. Si bien este lago no es muy extenso, sus dimensiones son importantes, presenta una superficie de 83,49  $\text{km}^2$  (época húmeda) y 11,61  $\text{km}^2$  (época seca) y una profundidad de 5,60 m (época húmeda) a 0,28 m (época seca) dimensiones (Perez 2008).

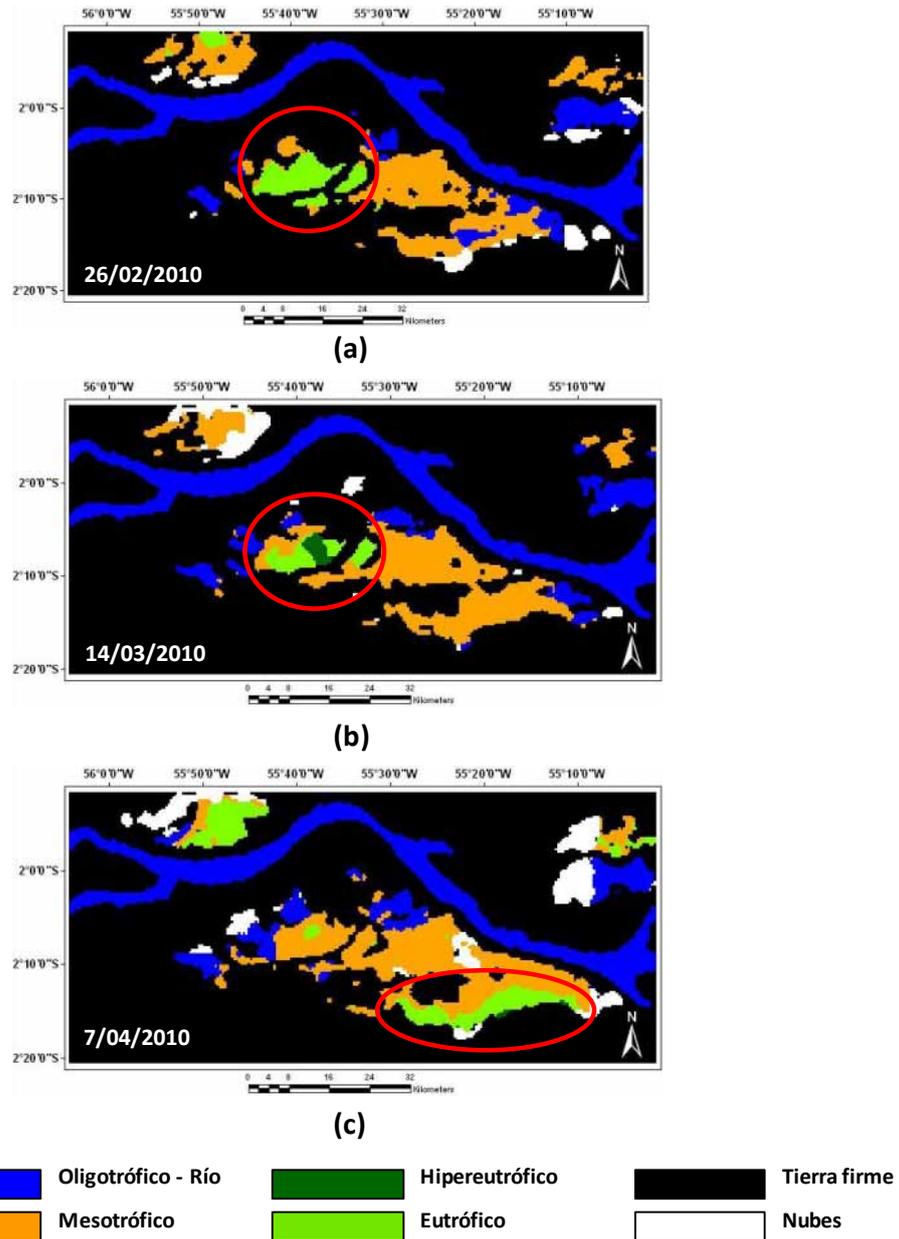
Las imágenes del sensor MODIS en este estudio, también determinaron que las concentraciones de clorofila-a en la várzea de Curuaí comenzaron a incrementarse durante el periodo de aguas altas (Mayo a Julio) en la estación seca, con valores máximos de 26,6  $\mu\text{g/L}$ ; presentando gran parte de los lagos o la várzea en su totalidad condiciones eutróficas. Sin embargo, elevadas concentraciones fueron también identificadas durante el periodo de descenso de las aguas (Agosto a Octubre) predominando más las condiciones hipereutróficas (floraciones de algas) con valores máximos de 142  $\mu\text{g/L}$ . Otros resultados con valores máximos de concentración de clorofila-a de 28,85  $\mu\text{g/L}$  (aguas altas) y 68,78  $\mu\text{g/L}$  (descenso de las aguas) fueron también reportados por Barbosa (2005) en la várzea de Curuaí. Por otro lado, Novo et al. (2006) usando imágenes del sensor MODIS y aplicando un modelo

denominado de mezcla lineal en la misma várzea, determinaron la presencia de mayores concentraciones de clorofila-a en los periodos de descenso de las aguas (Septiembre) y de aguas bajas (Noviembre) los años 2002 y 2003. El estudio de Freire (2010) usando imágenes MODIS reportó altas concentraciones de clorofila-a en los periodos de crecida (127,3  $\mu\text{g/L}$ ) y de descenso de las aguas (media de 103,6  $\mu\text{g/L}$ ) en determinados años, en los lagos y planicies del Bajo Amazonas.

Según Moreira-Turcq et al. 2013, la várzea de Curuai fue caracterizada por presentar alta biomasa fitoplanctónica a lo largo de todo el ciclo anual. Igualmente, otros estudios en la región (Barbosa 2005; Novo et al. 2006 y Alcântara 2007) verificaron la existencia de localidades en la várzea en que las concentraciones de clorofila-a permanecen elevadas durante todo el ciclo anual. Sobre este punto, los resultados obtenidos basados en datos de satélite, mostraron también la presencia de condiciones eutróficas e hipereutróficas durante el periodo de crecida de las aguas (Febrero a Abril) y una presencia escasa durante el periodo de aguas bajas, limitándose únicamente al mes de Enero. En ambos casos, el tiempo de permanencia fue menor de 1 a 3 semanas y las condiciones fueron puntuales localizadas en algunos sectores de la várzea. Por ejemplo, en la región centro-oeste o lago Poçã (A24 y A25) las condiciones eutróficas fueron observadas durante el mes de Abril con una permanencia de una semana, los años 2000 a 2002 y 2007. También el año 2010 fueron reportadas en el mismo lago, en ambas estaciones de muestreo, los meses de Febrero y Marzo por 2 a 3 semanas (Figura 87 a y b).

En el lago Salé (región oeste) fueron reportadas condiciones eutróficas únicamente en Abril de 2006 con permanencia de una semana. En el centro o Lago Grande do Poçã, también estuvieron presentes en Abril de los años 2000, 2001 y 2006. En la región este de la várzea o Lago Grande de Curuai se presentaron mayormente en las estaciones de muestreo A05 y A03, en Marzo y Abril de 2010 (Figura 87 c) con un periodo de permanencia de 1 a 3 semanas. Estos resultados difieren un poco de los reportados por Freire (2010) quien encontró un patrón repetitivo los años 2005 a 2007, referido a altas concentraciones de clorofila-a en este periodo, probablemente atribuido a una reducción de la velocidad de entrada del agua en la planicie lo cual favorece el desarrollo del fitoplancton o respondiendo a un patrón típico de producción de fitoplancton en los lagos. Asimismo, durante el periodo de aguas bajas (Noviembre a Enero) fueron reportadas condiciones eutróficas e hipereutróficas los años 2006 y 2010, presentes únicamente el mes de Enero, y por un periodo reducido de una semana en las estaciones A25 (lago Poçã) A08 y A14 (lago Grande do Poçã). Al referirse solamente a

dos años y a floraciones puntuales con un tiempo de permanencia reducido podría tratarse de un caso particular. Sin embargo, de encontrarse el supuesto de que en este periodo se puedan presentar altas concentraciones de clorofila-a, esto sería imposible de detectar mediante satélite debido principalmente a la cobertura total de nubes en toda la región que caracteriza la época húmeda, lo cual dificulta el procesamiento de las imágenes.



**Figura 87.** Presencia de condiciones eutróficas e hipereutróficas puntuales en el periodo de crecida de aguas en la várzea de Curuai en 2010 (a) Región centro-oeste, Lago Poção (A24 y A25). Región central, Lago Grande do Poção (A14) en Febrero (b) Región centro-oeste, Lago Poção (A24 y A25). Región central, Lago Grande do Poção (A14) en Marzo. (c) Región este, Lago Grande de Curuaí (A03 y A05) en Abril.

Por otra parte, las condiciones hipereutróficas predominaron en el periodo estable (2000-2005) y fueron observadas durante los meses de Agosto y Septiembre (periodo de descenso de las aguas). Eventualmente se presentaron en algunos años del segundo periodo (2006-2010) y en algunos meses correspondientes al periodo de aguas altas. Según Pérez (2008) la disponibilidad de nutrientes y aportes de materia orgánica en esta fase favorece el inicio de la producción primaria en la várzea que llega a su punto culminante en el periodo de descenso de las aguas, mientras que en el periodo de aguas bajas las floraciones algales son más puntuales. Esto puede explicarse también debido a que el material suspendido sedimenta, incrementándose la transparencia y la producción primaria por unidad de área, alcanzando valores máximos al descenso del nivel de agua. Contrariamente en aguas bajas, cuando los lagos alcanzan una profundidad menor a 2 m, la transparencia decrece influenciada por la acción del viento y una mezcla inducida por los peces, agitando la superficie de la capa de sedimentos (Putz & Junk 1984).

Como consecuencia del evento climático extremo de sequía ocurrido en 2005 (Marengo et al. 2008 a, Tomasella et al. 2011) se produjo una mayor reducción del tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas e hipereutroficas o la ausencia de las mismas en la várzea, durante el año 2006, que comienza con un periodo de sequía al que le sigue un periodo de inundación. A partir de este año comienza un periodo inestable (2006-2010), debido a los eventos climáticos extremos registrados (Figuras 83 84 y 85) referidos a las inundaciones del año 2006 y principalmente al evento catalogado como de inundación extrema el año 2009 (Tomasella & Marengo 2011).

El impacto del caudal del río (sistema lótico) en la planicie (sistema léntico) ocasiona una reducción del nivel de luz y una dilución del sistema. La densidad del fitoplancton y la producción primaria son bajos debido a la dilución de la comunidad de plancton existente y a una capa eufótica estrecha (Putz & Junk 1984). Además, el efecto de la dilución ocasiona una disminución de los nutrientes que limitan el crecimiento fitoplanctónico. Sin embargo, cuando el sistema vuelve a la estabilidad, los nutrientes disueltos y material particulado introducidos tienden a favorecer el desarrollo de la productividad primaria (Espíndola et al. 1996).

Las Figuras 88, 89 y 90 muestran la relación de los niveles de eutrofización y la dinámica hidrológica del río Amazonas en Óbidos (Red de mediciones, ANA 2010) en lagos próximos a la várzea de Curuaí, tal es el caso de los lagos Paru, Camaçari y Mirituba. Al igual que en la várzea, el análisis realizado consideró dos parámetros hidrológicos, uno de máximo nivel de inundación correspondiente a los meses de Mayo y Junio y otro de nivel bajo

extremo referido a los meses de Octubre y Noviembre. Se diferenciaron también dos periodos contrastados, uno estable (2000-2005) y otro marcado por eventos climáticos extremos regionales (2006-2010).

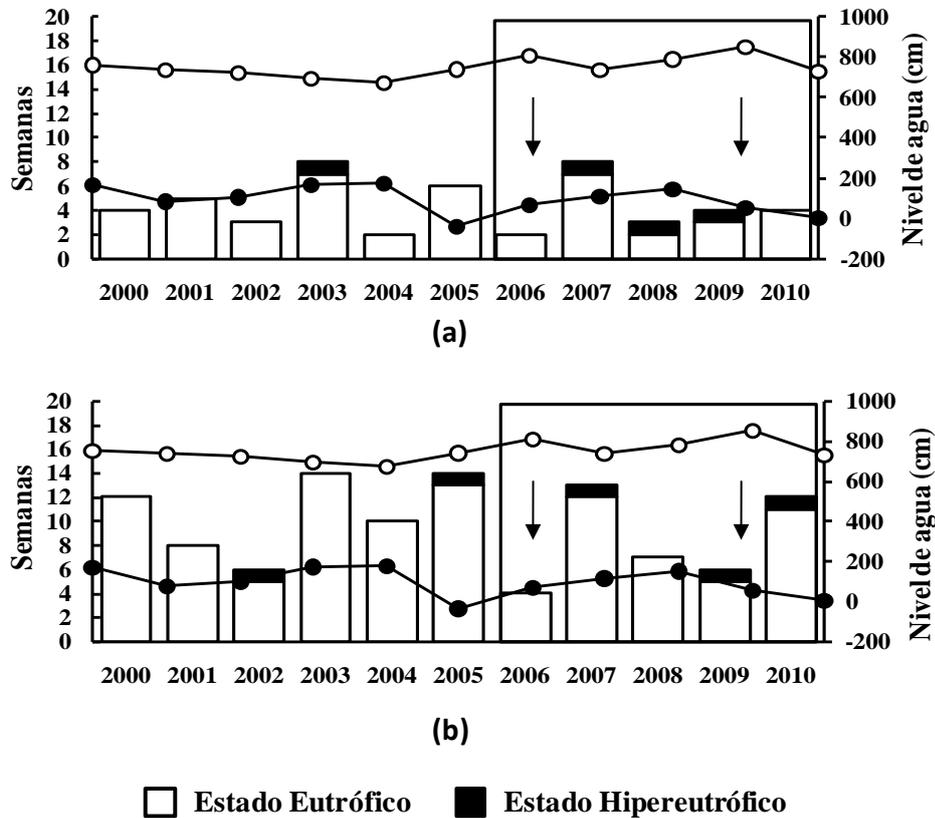
En el lago Parú (Figura 88), un lago pequeño cercano a la várzea de Curuaí y separado por el río Amazonas, fueron consideradas dos estaciones de muestreo. La estación ubicada al sur del lago, próxima a la conexión con el río principal (P331) y la estación ubicada en la región central del lago (P332).

Ambas estaciones presentaron condiciones eutróficas en todos los años del periodo de estudio (2000 - 2010). En la estación P331, la permanencia de estas osciló de 2 a 8 semanas en el periodo estable (2000 a 2005). Las condiciones hipereutróficas se mantuvieron únicamente por una semana, el año 2003. En el segundo periodo, las condiciones eutróficas también se mantuvieron de 2 a 8 semanas (2006 a 2010), igualmente fueron observadas condiciones hipereutróficas con una permanencia de una semana, en los años 2007 a 2009 (Figura 88 a).

La estación P332, registró mayor tiempo de permanencia de la eutrofización comparada con la estación anterior. Durante el periodo estable (2000-2005) las condiciones eutróficas se mantuvieron de 6 a 14 semanas. Las condiciones hipereutróficas solo estuvieron presentes en dos años (2002 y 2005). En contraste con el segundo periodo, la permanencia de condiciones eutróficas fue menor, de 4 a 13 semanas. En este periodo se observó una reducción del tiempo de permanencia en los años reportados como de máxima inundación (2006 y 2009). Durante estos años no se evidenciaron procesos de eutrofización en el periodo de aguas altas, en ambas estaciones de muestreo, debido a los niveles de agua elevados reportados (superior a los 8 m). El evento de inundación provocó la dilución del sistema y la presencia de altas concentraciones de materia en suspensión provenientes del río principal, lo cual ocasionó una disminución de la zona eufótica y restringió el desarrollo del fitoplancton (Putz & Junk 1984). Por otra parte, las condiciones hipereutróficas, en este periodo fueron registradas en los años 2007, 2009 y 2010 (Figura 88 b).

En general, las condiciones eutróficas e hipereutróficas estuvieron presentes en los periodos hidrológicos de aguas altas y de descenso de las aguas. Sin embargo, estas condiciones también fueron observadas en el periodo de crecida de las aguas. Según Freire (2010) las floraciones identificadas en el periodo de crecida de las aguas pueden haber ocurrido debido a una reducción en la velocidad de entrada del agua del río en la planicie, aumentando la profundidad de la zona eufótica lo que favorece el desarrollo del fitoplancton. Dicho autor

también verificó la ocurrencia de floraciones fitoplanctónicas en el lago Paru, en junio de 2004, mientras que las condiciones fueron variables en 2005, 2006 y 2007. En este estudio la presencia de eutrofización en Junio de 2004, fue reportada únicamente en la región central (P332), en tanto que la estación (P331) se caracterizó como mesotrófica en esta época.



**Figura 88.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Parú (a) Estación de muestreo P331 (región sur) (b) Estación de muestreo P332 (región central) El eje X representa el periodo de estudio de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de condiciones eutróficas e hipereutróficas en los lagos y el eje Y secundario representa el nivel de agua en cm. Las flechas indican la reducción drástica o ausencia de la eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

En el lago Camaçari fueron analizadas cuatro estaciones de muestreo (Figura 89), la estación P16 en el sur y P20 que corresponde a la región central del lago, presentaron condiciones eutróficas e hipereutróficas, durante el periodo de estudio (2000-2010) exceptuando el año 2009, donde los procesos de eutrofización estuvieron ausentes. Ambas estaciones se caracterizaron por una predominancia de condiciones eutróficas e hipereutróficas.

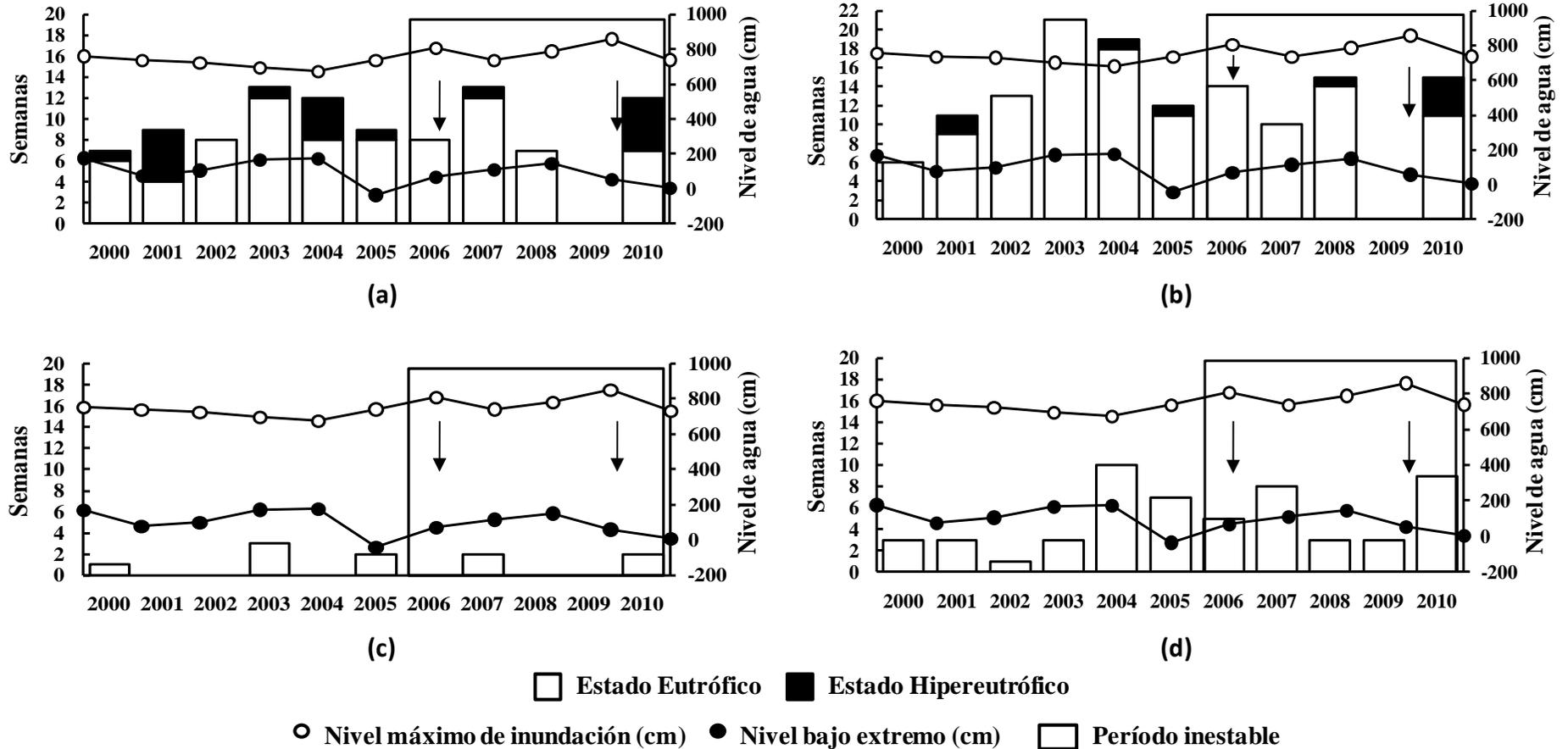
En la estación P16 (Figura 89 a) el tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas fue menor (7 a 13 semanas) en relación a la estación P20 (6 a 21 semanas), observado mayormente durante el primer periodo (2000-2005). Asimismo, las condiciones hipereutróficas fueron dominantes en este periodo encontrándose presentes de 1 a 5 semanas.

Contrariamente en la estación P20 (Figura 89 b) el tiempo de permanencia fue menor (1 a 2 semanas) prevaleciendo más las condiciones eutróficas. En el segundo periodo se observó un comportamiento relativamente similar en ambas estaciones. Los procesos de eutrofización se redujeron o estuvieron ausentes los años 2006 y 2009 por los niveles máximos de inundación reportados.

La estación P23 (Figura 89 c) próxima a la conexión con el río Amazonas en la región este del lago, se caracterizó por una presencia mínima de condiciones eutróficas, con características más mesotróficas, al igual que el lago Salé (A20) en la várzea de Curuai. Durante el primer periodo, la eutrofización fue observada únicamente los años 2000, 2003 y 2005 manteniéndose de 1 a 3 semanas. En cambio, el segundo periodo el tiempo de permanencia fue de 2 semanas únicamente en los años 2007 y 2010. Los años restantes se caracterizaron por la ausencia total de estas condiciones.

La estación P25 (Figura 89 d) en la región norte del lago, influenciada por la presencia constante de aguas negras provenientes del río Urubu, se caracterizó en general, por una permanencia menor de eutrofización en ambos periodos. De 1 a 10 semanas durante el primer periodo y de 3 a 9 semanas el segundo periodo. Esta estación también se caracterizó por la ausencia de condiciones hipereutróficas. Según los resultados de la reflectancia de satélite observados, las condiciones eutróficas ocurrieron durante los periodos de crecida de las aguas y aguas altas, periodos en los cuales este lago permanece enteramente conectado al río Amazonas (Ferreira de Faria 2010).

A diferencia de los lagos Salé y Mirituba que se encuentran también influenciados por la mezcla de aguas negras y blancas, el lago Camaçari presentó una mayor influencia de la mezcla de ambos tipos de agua, en sus estaciones P25 y P23. Esta mezcla se presentó en los periodos de crecida de aguas y aguas altas dando lugar a la presencia de condiciones eutróficas.



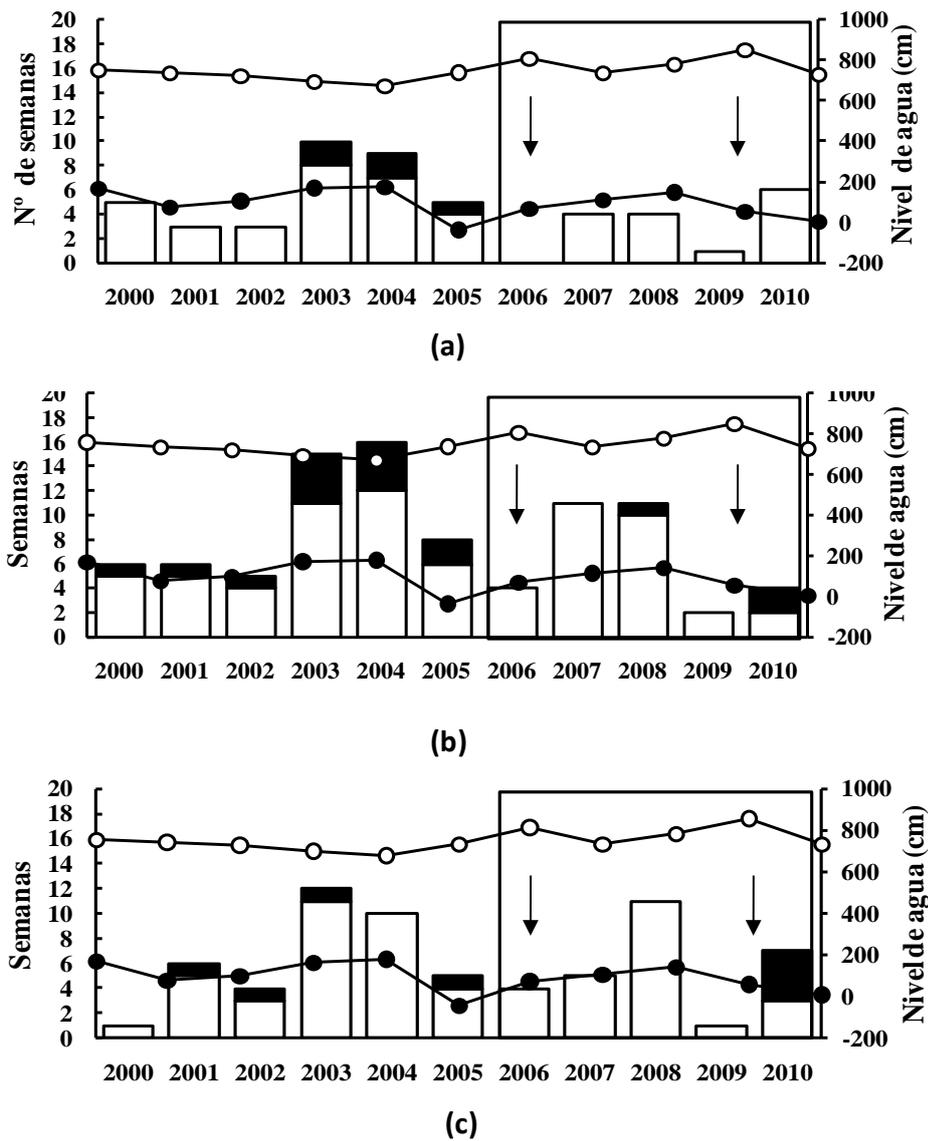
**Figura 89.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Camazari (a) Estación de muestreo P16 (región sur) (b) Estación de muestreo P20 (región central) (c) Estación de muestreo P23 (región este) (d) Estación de muestreo P25 (región norte). El eje X representa el periodo de estudio de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de las condiciones eutróficas en los lagos y el eje Y secundario representa el nivel de agua en cm. Las flechas indican la reducción drástica o ausencia de eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

En el lago Mirituba fueron analizadas 3 estaciones de muestreo. La estación P4 (Figura 90 a) localizada en la región oeste se caracterizó por tiempos de permanencia de eutrofización menores en ambos periodos, en relación a las otras estaciones. Durante el periodo (2000-2005) las condiciones eutróficas se mantuvieron de 3 a 10 semanas y de 1 a 6 semanas el segundo periodo. Las condiciones hipereutróficas (floraciones de algas) fueron observadas los años 2003, 2004 y 2005 del periodo estable y el tiempo de permanencia fue corto (1 a 2 semanas).

Los años 2006 y 2009 catalogados como de máxima inundación, presentaron ausencia o una permanencia mínima (1 semana) de condiciones eutróficas. Por tratarse de una estación que mantiene relación con el río Amazonas, los procesos de eutrofización tienden a mantenerse por periodos muy cortos o a ausentarse dependiendo de los niveles de agua que ingresan a la planicie.

En tanto, la estación P6 (Figura 90 b) que se encuentra en la región central del lago, presentó un tiempo mayor de eutrofización de 5 a 16 semanas en el periodo estable y de 2 a 11 semanas el segundo periodo. De igual manera, en esta estación se observó una reducción importante del tiempo de permanencia de condiciones eutróficas, los años 2006 y 2009 con eventos de máxima inundación. Además en esta estación predominaron las condiciones hipereutróficas en ambos periodos, encontrándose también influenciada por aguas negras produciéndose una mezcla de aguas en los periodos de crecida y aguas altas.

En la estación P13 localizada al este (Figura 90 c) se observó nuevamente una reducción en la permanencia de condiciones eutróficas, de 1 a 12 semanas en ambos periodos. Las condiciones hipereutróficas prevalecieron durante el primer periodo por el lapso de una semana y de 3 a 7 semanas, únicamente el año 2010 del segundo periodo.



□ Estado Eutrófico    ■ Estado Hipereutrófico

○ Nivel máximo de inundación (cm)    ● Nivel bajo extremo (cm)    □ Período inestable

**Figura 90.** Relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en el lago Mirituba (a) Estación de muestreo P4 (región oeste) (b) Estación de muestreo P6 (región central) (c) Estación de muestreo P13 (región este). El eje X representa el periodo de estudio de diez años. El eje Y representa las semanas de permanencia de las condiciones eutróficas e hipereutróficas y el eje Y secundario representa el nivel de agua en cm. Las flechas indican la reducción drástica o ausencia de eutrofización a causa de las inundaciones extremas.

### 6.3 Relación de la eutrofización con la climatología

Las variaciones de precipitación en escalas interanuales y entre décadas son una de las características más importantes en las regiones tropicales. Estudios como los de Ronchail et al. (2002) y Marengo (2004), mostraron que la parte norte de la cuenca amazónica, se ve muy afectada por el calentamiento o enfriamiento anómalo de la temperatura en la superficie del mar en el Pacífico tropical, eventos conocidos respectivamente como los índices ENSO (“El Niño” y “La Niña” *SouthernOscillation*) (Trenberth 1997).

Los episodios cálidos en el Pacífico tropical (El Niño) tienden a provocar déficits de precipitación en los sectores norte, este y central de la cuenca amazónica. Por el contrario, los episodios fríos están generalmente asociados con precipitaciones excesivas en la parte norte de la cuenca amazónica. Las perturbaciones del régimen de las lluvias alteran el régimen hidrológico de los ríos de la región. En el caso del río Amazonas en Óbidos, el evento de “El Niño” de 1983 provocó una reducción del 16% del caudal medio anual y “La Niña” de 1989 fue responsable de un exceso del 14% del caudal medio anual (Guyot et al. 1998).

En relación a las planicies de inundación en la Amazonía, Schöngart y Junk (2007) afirman que las condiciones extremas relacionadas con los índices ENSO (El Niño-*SouthernOscillation*) como el evento del “El Niño” en su fase cálida, afectaría el pulso de inundación en la planicie produciendo una reducción de la fase acuática, mientras que el evento de “La Niña” en su fase fría provocaría niveles máximos y prolongados de inundación.

Según Marengo et al. 1992 y Ronchail et al. 2002, se han relacionado algunas de las principales sequías en la Amazonía con tres aspectos: (a) la ocurrencia de eventos intensos de “El Niño”, (b) un fuerte calentamiento de la superficie de las aguas del Atlántico tropical norte, durante la estación de verano-otoño en el hemisferio norte o (c) ambos. Basado en dichos aspectos, podemos citar los eventos de “El Niño” que fueron asociados con sequías extremas en la región amazónica, reportadas en los años 1925-26, 1982-83 y 1997-98, las dos últimas también experimentaron un calentamiento intenso en el Atlántico tropical norte junto con un calentamiento en el Pacífico ecuatorial (Marengo et al. 2008a, Tomasella et al. 2011).

Es así, que el evento de sequía extrema del año 2005 que afectó la parte sur y oeste de la cuenca, fue una consecuencia del calentamiento anómalo del Atlántico tropical norte relacionado con irregularidades térmicas de la temperatura del mar en la zona tropical del Atlántico, el cual produjo un retroceso en los principales tributarios, causando una rápida

disminución del caudal y no tuvo ninguna relación con el índice ENSO (El Niño-*SouthernOscillation*). Este también fue el mismo fenómeno responsable para la sequía de 1963 en la región (Marengo et al. 2008a, Tomasella et al. 2011).

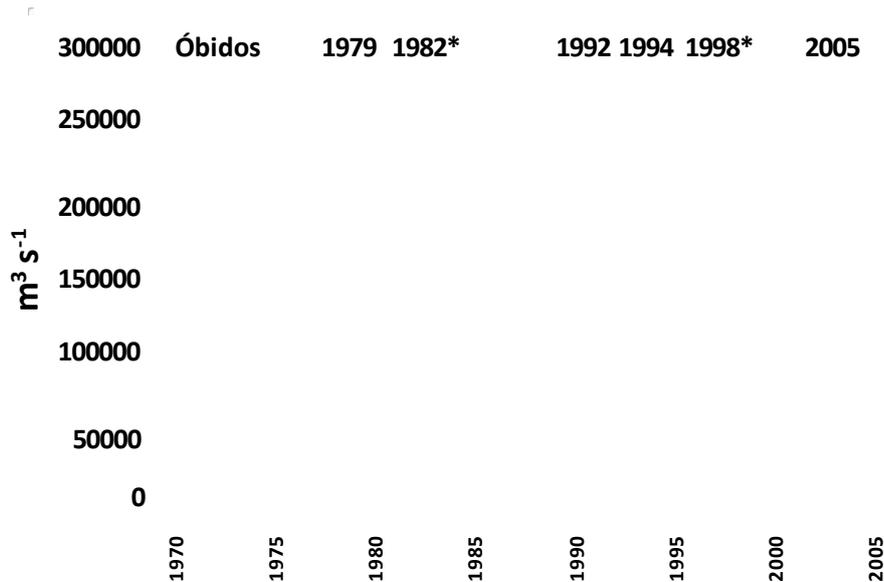
En este trabajo, las variaciones periódicas (2000-2005) y (2006-2010), estuvieron relacionadas a eventos climáticos extremos, tanto en las planicies de inundación como en otros lagos. Registros del río sugieren que en promedio, el Amazonas experimentó eventos climáticos extremos, ya sea una sequía o una inundación cada 10 años. Sin embargo, últimamente en el corto lapso de cinco años, la cuenca Amazónica se vió afectada por dos eventos graves de sequía y dos eventos de inundación severa (Marengo et al. 2011).

Estos eventos se iniciaron a finales del año 2005, presentando un nivel de agua considerablemente bajo en la región o una sequía extrema (Marengo et al. 2008a, b; Tomasella et al. 2011). Como consecuencias de este evento fueron registrados periodos de sequías y fuertes inundaciones en el año 2006. Posteriormente en el año 2009 en particular, se reportaron niveles extremados de inundación concluyendo el año 2010 con un nuevo evento de sequía extrema (Marengo et al. 2011).

Este panorama respondería a la predicción hipotética que en una década de datos analizados, cada 5 años (un periodo) podría repetirse un evento extremo de sequía como los reportados los años 2005 y 2010. Además estos eventos de sequía extrema tendrían influencia también sobre los eventos de inundación. Por ejemplo, durante el año 2005 las condiciones de sequía fueron intensificadas durante la estación seca hasta el mes de Septiembre, cuando la humedad fue más baja que lo normal y la temperatura del aire de 3-5°C más caliente que lo normal. El mismo año, las lluvias retornaron a partir de Octubre y generaron inundación después de Febrero de 2006 (Marengo et al. 2008a).

Esto puede explicarse mejor tomando en cuenta los datos de nivel de agua registrados en Óbidos (Red de mediciones, ANA 2010). Según Marengo et al.(2008b) los valores de caudales del río Amazonas en la estación de Óbidos, registrados durante el periodo de aguas altas (Mayo a Junio de 2005) estuvieron levemente por encima de lo normal (Figura 91), los meses de Julio y Agosto los valores del nivel de agua descendieron de 6,65 a 3,15 m y el mes de Septiembre el nivel de agua presentó un valor aún menor de 3,04 a 0,62 m. Sin embargo, el valor más bajo registrado de -0,39 m el 28 de Octubre, correspondió a una de las mayores sequías reportadas de los últimos 40 años (Marengo et al. 2008b). En este caso, los caudales del río Amazonas en Óbidos, durante el periodo de aguas bajas (Septiembre-Octubre de 2005) presentaron valores por debajo de  $100000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  los cuales fueron los más bajos desde 1970

(Figura 91). La sequía extrema de 2005 tuvo su impacto en 2006 donde fue observada una notable reducción del tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas así como la presencia de bajas concentraciones de clorofila-a, debido a la drástica reducción de la columna de agua, lo cual provoca un incremento de las concentraciones de materia en suspensión debido a procesos de re-suspensión de sedimentos por la acción de los vientos o inducida por los peces que agitan el sedimento (Putz & Junk 1984).



**Figura 91.** Series de niveles de caudal del río Amazonas en Óbidos durante 1970-2006, para los periodos de aguas altas en los meses de Mayo a Junio (línea sólida negra) y de descenso de las aguas de Septiembre a Octubre (línea sólida gris; en  $m^3 s^{-1}$ ) Las flechas muestran años con sequía. La media y la s.d. son mostrados para las estaciones alta y baja del río. El asterisco indica años Niño (Modificado de Marengo et al. 2008 b).

A partir del año 2006, se inicia un segundo periodo donde el tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas en general, se reduce aún más o se presenta una ausencia de las mismas. Además se trata de un periodo inestable, por presentar eventos de inundación extrema, con niveles máximos registrados los años 2006 (8,10 m) y 2009 (8,60 m) (Red de mediciones, ANA 2010). Respecto a la inundación de 2009, Marengo et al. (2011) determinaron que este evento ocurrió durante una migración anómala de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ITCZ en inglés) hacia el sur los meses de Mayo-Junio, debido principalmente al calentamiento de las aguas superficiales en el Atlántico tropical sur. Durante el año hidrológico 2008-2009, la estación lluviosa en los sectores norte y noroeste de la Amazonía comenzó prematuramente y fue seguida por una estación lluviosa más larga que lo normal. Como consecuencia hidrológica, la lluvia torrencial en los sectores norte y este de

la Amazonía incrementó el nivel del río Amazonas y de sus tributarios, durante el verano austral (2008-2009). Tanto los caudales máximos de los tributarios del norte y su confluencia con el curso principal del río casi coincidieron con los caudales máximos de los tributarios del sur, estas combinaciones simultáneas de los tributarios dieron como resultado un evento de inundación extrema.

En ambos años (2006 y 2009), la várzea se caracterizó por la predominancia de condiciones oligotróficas y mesotróficas, principalmente en el periodo de aguas altas. Las condiciones eutróficas se presentaron por tiempo reducido en otros periodos. Por ejemplo, en el año 2009 estas condiciones permanecieron de 1 a 4 semanas únicamente los meses de Septiembre y Octubre en las regiones de los lagos Grande do Poção (A14, A09, A08) y Grande de Curuai (A05). En contraste, en el año 2006, las condiciones eutróficas fueron observadas por tiempo reducido en varios meses (Enero, Abril, Agosto y Septiembre) en las mismas regiones, solo que en más estaciones (A03, A02). Estas observaciones demostraron que durante el periodo de aguas altas (Mayo-Julio) la várzea se encontró completamente inundada tanto en el año 2006 como en el 2009 hasta el periodo de descenso de las aguas (Agosto-Octubre) donde se evidenció la aparición de floraciones algales. Este hecho puede ser explicado tomando en cuenta el impacto de la invasión del río en la planicie, lo cual ocasionó la ausencia de las condiciones eutróficas, debido a una considerable entrada de materia en suspensión (sedimentos y minerales) que provoca la reducción del nivel de luz y la entrada de aguas del río a la planicie provoca una dilución del sistema ocasionando una disminución de los elementos nutricionales pudiendo limitar el crecimiento fitoplanctónico (Espíndola et al. 1996).

Por otro lado, en el año 2010 caracterizado por presentar el mayor evento de sequía extrema (Tomasella & Marengo 2011; Marengo et al. 2011), se observó tanto en la várzea de Curuaí, en las regiones: este o lago Grande de Curuaí (Figura 83 a, b, c y d), centro o lago Grande do Poção (Figura 84 a, b y c), centro-oeste o lago do Poção (Figura 85 a y b) y en el lago Paru, en ambos sectores (Figura 88 a y b), que el tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas fue menor en comparación con el año 2005 donde se produjo el evento de sequía extrema anterior. Al respecto, la sequía de 2010 fue única y según Marengo et al. (2011) y Tomasella & Marengo (2011) los cambios en los regímenes de circulación que conducen a la sequía fueron asociados con el calentamiento del océano Atlántico tropical Norte, la cual fue incluso más caliente que la anterior sequía de 2005, hasta 2°C más caliente, en los meses de Marzo-Mayo de ese año. Por otra parte, esta sequía comenzó durante un

evento de “El Niño” débil, ocurrido a principios del verano austral. Dicho evento fue complementado con el calentamiento del Atlántico tropical Norte influenciando desfavorablemente en los periodos de aguas altas y recargas de los tributarios en la región norte, durante la época húmeda de diciembre 2009 hasta marzo 2010.

Durante el otoño del hemisferio sur, el Atlántico tropical continuó calentando en tanto que en el Pacífico tropical el fenómeno de “El Niño” fue sustituido por la fase fría o fenómeno de “La Niña” en la estación seca del invierno austral y la siguiente primavera. Esta situación climática durante el verano y el otoño favoreció la ocurrencia de sequías severas en los tributarios del canal sur del río Amazonas hasta octubre de 2010. A su vez, el impacto de la sequía durante la estación seca fue particularmente notable en los inusuales niveles bajos de caudal en el curso principal del río.

Si bien los datos analizados en este trabajo abarcaron hasta el mes de septiembre de 2010, los valores de nivel de agua en la estación de Óbidos (Red de mediciones, ANA 2010) fueron proporcionados también hasta esa fecha. Comparando ambos años verificamos que el máximo nivel fue registrado el 30 de mayo con 7,34 m que es similar al máximo nivel registrado en 2005, el 21 de mayo (7,35 m). En Julio y Agosto los niveles descienden de 6,84 a 4,17 m, los niveles de agua en estos meses fueron más bajos en 2005 (6,65 a 3,15 m). En Septiembre de 2010 el descenso fue de 3,98 a 1,02 m, mientras que en 2005 los niveles fueron aún más bajos (3,04 a 0,62 m). Sin embargo, los niveles más bajos extremos fueron registrados en Octubre en ambos años, lo cual nos lleva a confirmar que la evolución hidrológica del año 2010 fue similar a la del año 2005. Esta aseveración fue también confirmada en el caso del Río Madera por Tomasella & Marengo (2011).

El período de descenso de las aguas en 2010 fue provocado por la superposición de una sequía severa en los tributarios del sur del canal principal, en Octubre y Noviembre combinada con los niveles hidrométricos muy bajos para este periodo del año en los tributarios del norte; sumándose también un periodo de descenso de las aguas excepcional de la parte Andina de la cuenca. La combinación de los déficits en los caudales de ambos márgenes del río fue responsable de la abrupta pérdida de los caudales en el curso principal (Marengo et al. 2011).

En adición, los otros lagos, como Paru (Figura 88 a y b) y Mirituba (Figura 90 a y c) presentaron también una baja notable de la productividad en 2006 como consecuencia de la sequía de 2005. A excepción, el lago Camaçari (Figura 89 a, b y d) parece ser el único lago no afectado por dicho evento, debido probablemente a que este lago, presenta una cuenca muy

grande y mayor en relación a los demás. Por lo tanto, el nivel del lago Camaçari en 2005 no disminuyó tanto, comparado con Curuaí y los demás lagos. Además el tiempo de permanencia de las condiciones eutróficas en 2006 fue mayor en relación al año 2005, lo cual podría ser explicado en función de la hidrología de este lago, ya que presenta aportes o conexión con el río Urubu (río de aguas negras). De algún modo, la mezcla de aguas blancas y aguas negras incrementaría la productividad (Putz & Junk 1984) puesto que en este lago predominaron también las condiciones eutróficas y su tiempo de permanencia.

#### **6.4 Relación de la eutrofización con la Geoquímica**

Las planicies de inundación (várzeas) y los lagos asociados a ellas son ambientes que reflejan la biogeoquímica de la Cuenca Amazónica. Un factor primordial asociado al estudio de esta área, son los tres tipos principales de aguas: blancas, negras y claras, reconocidos y clasificados por Sioli (1975), basados en la cantidad de nutrientes, en el color, cantidad de sólidos suspendidos, pH y cantidad de minerales disueltos, indicado por la conductancia específica (Furch & Junk 1997). En este estudio, nos enfocamos en las planicies de inundación (várzeas) o lagos de aguas blancas y en las planicies de inundación (igapós) o lagos de aguas negras (Irion et al. 1997).

Los resultados obtenidos mediante imágenes de satélite, así como de las mediciones radiométricas y de los muestreos *in situ* demostraron que la producción fitoplanctónica se concentra y desarrolla principalmente en los lagos de aguas blancas, que dominan la várzea de Curuaí. En estos lagos fueron verificadas altas concentraciones de clorofila-a y por consiguiente, la presencia de floraciones algales dando lugar a una coloración del agua verde a verde-azulada donde prevalecieron las condiciones eutróficas e hipereutróficas. Aspectos similares fueron observados en los lagos de aguas blancas próximos a la várzea.

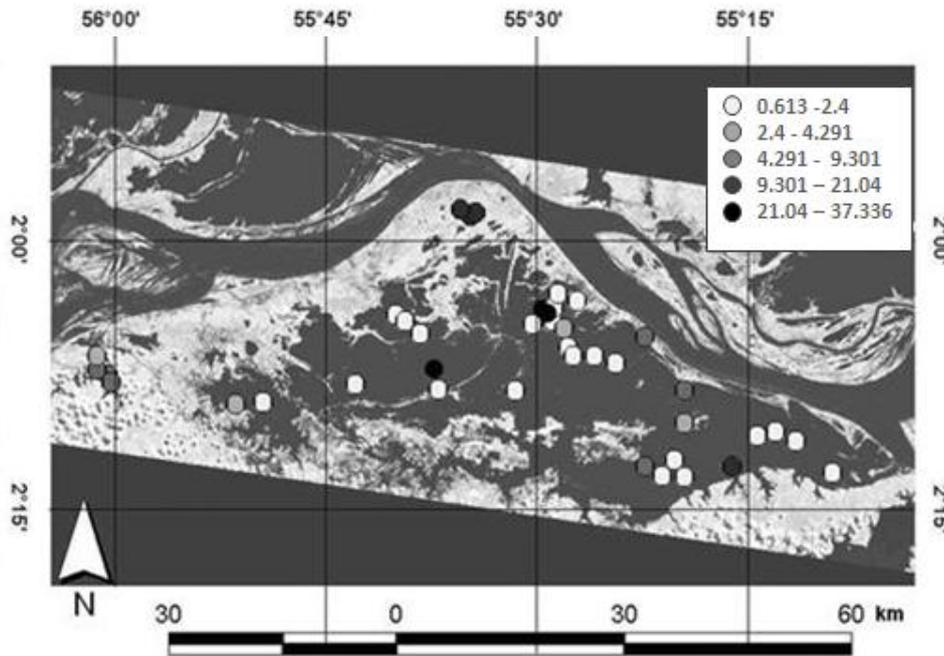
Por su parte, Perez (2008) en su estudio sobre la biogeoquímica de la várzea de Curuaí confirmó que la producción fitoplanctónica se desarrolla principalmente en los lagos de aguas blancas, ricos en nutrientes y altamente productivos, mientras que los lagos de aguas negras presentan una baja productividad y son pobres en relación a los nutrientes. Del mismo modo, los trabajos de Junk & Piedade 1997 y Junk et al. 2012 confirmaron que el alto contenido de nutrientes y materia en suspensión en los lagos de aguas blancas, estimula la producción primaria y estos ambientes son colonizados por algas y macrófitas acuáticas y semi-acuáticas. Sin embargo, un aspecto importante a considerar fue observado en los lagos que presentan

tanto aguas blancas como aguas negras (lago Salé en la várzea de Curuaí, y lagos próximos como Camaçari (estación P25) y Mirituba (estación P 13) siendo el factor de mezcla de ambos tipos de agua, el cual se da en los periodos de crecida y de aguas altas dando lugar a una mayor productividad, y a la presencia de floraciones algales (Putz & Junk 1997), cuya permanencia de tiempo en este caso, fue menor en relación a las estaciones localizadas únicamente en lagos de aguas blancas (Figuras 85 c, 89 d y 90 c ).

Pese a que los niveles de nutrientes (C, N y P) son generalmente bajos en los lagos ría y lagos de várzea en la Amazonía Central (Rai & Hill, 1984), su distribución está relacionada al tipo de aguas y su disponibilidad es uno de los factores responsables de la eutrofización. Igualmente, el nitrógeno y el fósforo influyen en la densidad, la duración y la composición de las floraciones algales, siendo requeridos particularmente por las cianobacterias (Fernandes et al. 2009).

Respecto al carbono, Cordeiro et al. (2008) y Perez (2008) constataron que las várzeas presentan mayores flujos de carbono que lo observado en lagos aislados de la dinámica fluvial amazónica, lo cual destaca el papel de estos ecosistemas en la acumulación de material orgánico proveniente tanto del Río como de la vegetación de tierra firme. Amorim et al. (2009) observaron en la várzea de Curuai, que en los lagos de aguas blancas la cantidad de materia orgánica es variable y generalmente dependiente de la proximidad con el río Amazonas. Los lagos más próximos al río principal tendieron a presentar bajas concentraciones de carbono orgánico (Lago Salé, Lago Santa Ninha, Lago Grande de Curuai estaciones A01 y A02) lo cual fue relacionado al mayor aporte de material mineral transportado por el río Amazonas. Por el contrario, los lagos más distantes del curso principal (Lago do Poção estación A25, Lago Grande de Curuai estaciones A03 y A05) presentaron concentraciones medias a altas (Figura 92).

Cabe destacar que también fueron reportados mayores valores en los lagos Santa Ninha y Grande de Poção próximos a sus márgenes, donde crecen bancos de macrófitas durante el periodo de aguas bajas. Asimismo, las concentraciones más altas de materia orgánica y homogéneamente distribuídas fueron encontradas en los lagos de aguas negras (Lago Açai y Lago Curumucuri).



**Figura 92.** Concentraciones de carbono orgánico en (%) en los lagos de la várzea de Curuai. Lagos próximos al río Amazonas con bajas concentraciones (blanco y gris). Lagos más distantes del río Amazonas y lagos de aguas negras con mayores concentraciones (gris oscuro a negro) Modificado de Amorim et al. 2009.

En este estudio, la eutrofización representada por los estados eutrófico e hipereutrófico fue concentrada mayormente en los lagos de aguas blancas de la várzea, distantes de la conexión con el río y en las estaciones de muestreo localizadas en la región central de los lagos próximos. Sin embargo, en el muestreo realizado en octubre de 2008 en la várzea de Curuai fueron observadas floraciones puntuales en la región este de la várzea en las estaciones A01 y A02, que se encuentran cerca de los canales Foz norte y Foz sur que conectan la várzea con el río Amazonas. Este hecho puede ser explicado tomando en cuenta que la materia orgánica producida en los lagos de la várzea está directamente relacionada a la hidrología del río Amazonas y es más lábil que la encontrada en el río, presentando además alta contribución algal (Moreira-Turcq et al. 2003). Por lo tanto, durante el periodo de crecida de las aguas la fuente dominante de materia orgánica particulada (MOP) en la várzea es el río Amazonas.

Esta contribución decrece durante el periodo de aguas altas alcanzando su mínimo valor en el periodo de descenso de las aguas cuando se observa una predominancia de la producción autóctona fitoplanctónica. Justamente durante este periodo (Agosto a Octubre) se observa el mayor aporte de materia orgánica de la várzea al río, y donde se concentran las floraciones puntuales que por el nivel bajo del agua se mantienen cerca a los canales. Pese a que la región este o lago Grande de Curuai representa el sector de mayor profundidad de la

várzea (Barbosa 2005 y Perez 2008), durante el periodo de descenso de las aguas el nivel baja considerablemente manteniéndose aún una columna de agua reducida en relación al resto de la várzea donde se mantienen floraciones puntuales. Adicionalmente, esta región también representa mayor estabilidad ya que no se encuentra sujeta a la intensa perturbación del viento (Barbosa 2005). De acuerdo con Fernandes et al. 2009, los ambientes de aguas calmas en los que la velocidad del viento es baja e insuficiente para mezclar toda la columna de agua son favorables a la formación de floraciones algales superficiales.

En cuanto al nitrógeno, los patrones de las formas de este elemento exhiben marcadas diferencias a bajos y altos niveles de aguas. La diferencia es tan grande que los lagos pueden oscilar de oligotróficos a mesotróficos y a eutróficos en un solo ciclo anual (Rai & Hill 1984). En la várzea de Curuaí, en los lagos Grande do Poçãõ y lago Poçãõ fueron verificados valores altos de  $\delta_{15}\text{N}$  (señal isotópica de nitrógeno) en el análisis de nitrógeno total particulado. La mayoría de las estaciones situadas en el centro de los lagos con valores altos de hasta 5,80 ‰ indicaron probable producción primaria *in situ*, siendo estos lagos donde ocurren mayormente las floraciones o *blooms* fitoplanctónicos (Perez 2008).

Cuando en ambientes eutróficos, el crecimiento del fitoplancton pasa a ser limitado por la disponibilidad relativa del nitrógeno es favorable la aparición de especies capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Perez (2008) determinó que el crecimiento de la producción primaria en la várzea está limitado por el nitrógeno inorgánico disuelto a lo largo del ciclo hidrológico (N/P medio entre 4,51 y 12,8). Ambientes con razón molar N/P menor a 15 son más susceptibles a la dominancia de cianobacterias especialmente las fijadoras de nitrógeno atmosférico. También fue determinada una señal isotópica negativa de  $\delta_{15}\text{N}$  (-5,72‰) en el lago Grande de Curuaí (estación A40) en el periodo de aguas bajas el año 2004, evidenciando la presencia de cianobacterias en el sistema.

En este estudio, los muestreos *in situ* realizados en el periodo de descenso de las aguas (Octubre 2008) así como las mediciones radiométricas y los análisis de las muestras de fitoplancton en laboratorio determinaron la presencia y dominancia de la división Cyanophyta (cianobacterias o algas verde-azules), cuyo valor de frecuencia relativa fue de 38 a más del 80% y el espectro de reflectancia fue característico para este grupo de algas (Peña-Martinez & Dominguez-Gomez 2004) en ambas várzeas estudiadas. Otros estudios de fitoplancton como los de Ibañez et al. (2003) y Arantes Gama & Nogueira (2008) identificaron especies de cianobacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico en la várzea de Curuaí.

En cuanto al fósforo, la cantidad más elevada fue observada en la estación de Óbidos, seguida de la encontrada en la várzea y en los igarapés de tierra firme. El fósforo es uno de los nutrientes asimilados por el fitoplancton, bacterias y plantas. Los procesos de transporte y reciclaje del fósforo todavía no fueron bien calculados, principalmente en los ríos extensos de la cuenca Amazónica, donde los sistemas de várzea pueden retener el fósforo por medio de decantación de partículas y por medio de remoción de fósforo de la columna de aguas por la acción de organismos (Perez 2008). La retención de fósforo y otros nutrientes está relacionada al tiempo de deposición de las aguas fluviales en los sistemas de várzea, a la circulación del agua dentro del sistema y a la adsorción físico-química en partículas y a su sedimentación (Melack & Fischer 1990).

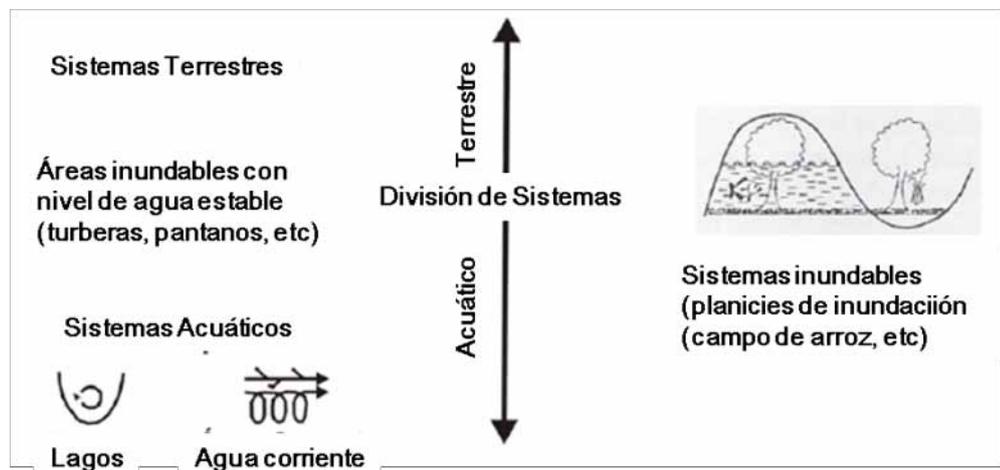
Según Perez (2008) en el sistema Río Amazonas-Várzea de Curuaí durante el periodo de aguas altas, tiene lugar la etapa de deposición de material dentro de la várzea, siendo las concentraciones de fósforo inorgánico disuelto (PID) y de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) significativamente más bajas en los lagos, indicando una reducción efectiva de los nutrientes disueltos disponibles. Las concentraciones de material en suspensión son significativamente más bajas, en tanto que las concentraciones de clorofila-a son más elevadas. Estos resultados sugieren que la reducción de PID y NID en los lagos puede ocurrir debido al consumo de estos nutrientes por el fitoplancton, cuyo crecimiento es estimulado por el aumento de la transparencia relativa de la columna de agua. En el periodo de aguas bajas, la influencia del río sobre los lagos de la várzea es significativamente reducida. En tanto se puede observar un aumento de la razón NID/PID en el río Amazonas durante el periodo de descenso de las aguas, cuando la várzea exporta material para el río.

## **6.5 Relación con los conceptos de pulso de inundación y pulso hidrológico**

Los conceptos introducidos como “pulso de inundación” (Junk et al.1989; Junk & Wantzen 2004) y “pulso hidrológico” (Neiff 1990) para el estudio de las planicies de inundación, se enfocan principalmente en las interacciones laterales de los sistemas río-planicie de inundación. Ambos conceptos toman en cuenta comúnmente el flujo de pulsos o régimen de pulsos asociados a periodos o fases distintas: inundaciones y aguas bajas y considera también el concepto de conectividad que ayuda a explicar el funcionamiento de la planicie de inundación. El concepto de “pulso de inundación” está basado en consideraciones

hidrológicas del río, la cuenca de captación y la planicie de inundación. Junk et al. (1989) designaron tales complejos como “sistemas río-planicie de inundación” abarcando los dos ambientes. En estos sistemas, el área de oscilación entre los estados terrestre y acuático es designada como la Zona de Transición Acuática/Terrestre (ATTZ en inglés). Esta zona desempeña un papel fundamental en los ecosistemas inundables, ya que la producción primaria asociada con la ATTZ es mucho mayor que la de los cuerpos de agua permanentes en sistemas no modificados y pueden exceder frecuentemente a los hábitats terrestres permanentes.

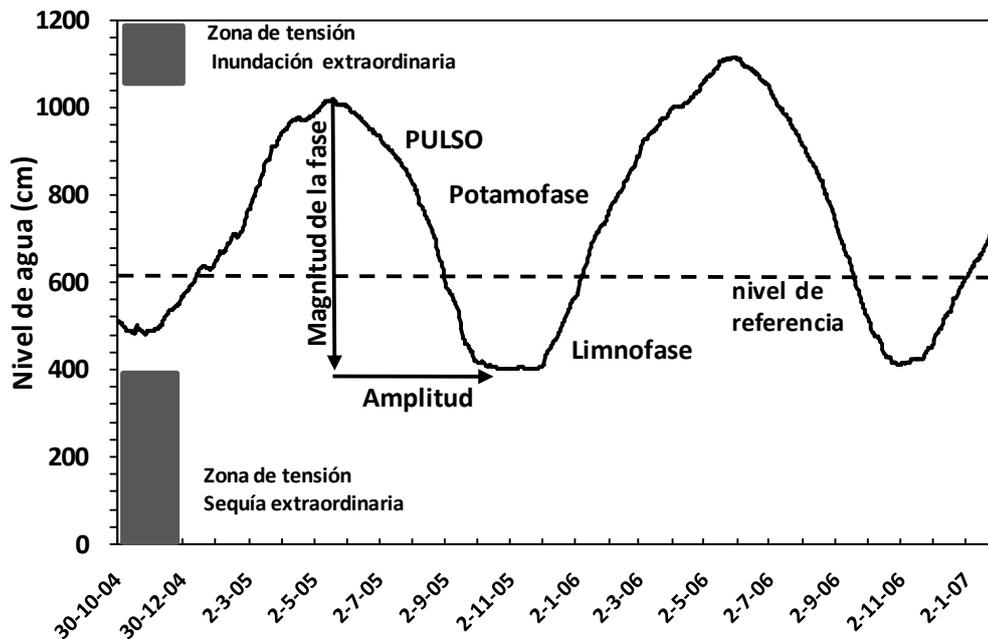
La productividad acuática y terrestre del sistema río-planicie de inundación depende principalmente del estado de los nutrientes en el agua y en los sedimentos, del clima y del pulso de inundación. La planicie de inundación incluye hábitats lóticos y lénticos, como las áreas que están periódicamente expuestas al avance y retroceso de las inundaciones. Durante el periodo de aguas altas el río transborda inundando toda la planicie, ocurriendo un intercambio mutuo de materiales tanto orgánicos como inorgánicos entre los dos sistemas. Durante el periodo de descenso de las aguas, los cuerpos de agua lénticos son sistemas acumulativos, conforme el nivel de agua del río sube, estos ambientes asumen la función de reservorios (Junk 1997). La dinámica variable de las planicies de inundación distingue este tipo de ambiente de otras áreas de transición terrestre y acuática (Figura 93) que tienen niveles de agua relativamente constante, por ejemplo turberas, pantanos o las zonas litorales de muchos lagos. Debido a esta característica variable, las planicies de inundación ocupan una posición intermedia entre los sistemas de transporte abiertos y los sistemas acumulativos cerrados (Junk 1997).



**Figura 93.** Posición de las planicies de inundación en relación a otros ecosistemas acuáticos y terrestres (Modificado de Junk 1997).

El pulso de inundación en la Amazonía está relacionado a una fuerte estacionalidad del régimen de precipitación de la cuenca, dividiendo el curso principal de un año hidrológico, en un periodo de niveles de aguas bajos conocidos como *fase terrestre*, la cual es seguida por un periodo de aguas altas conocido como la *fase acuática* (Junk et al.1989).

Por otro lado, el concepto de “pulso hidrológico” propuesto por Neiff (1990) utiliza los términos pulsos de energía y materia y está formado por cada fase de inundación y de sequía, denominándose “pulso hidrológico” o simplemente “pulso”. Estas dos etapas son complementarias del pulso sobre la alta capacidad reguladora del “macrosistema fluvial”. La dinámica de pulsos (Figura 94) puede ser caracterizada por atributos hidrológicos, definidos en la función *fFITRAS* acrónimo de: Frecuencia, Intensidad, Tensión, Regularidad, Amplitud y Estacionalidad (Neiff 2004; Casco et al. 2005).



**Figura 94.** Representación del pulso hidrológico con sus dos fases: Fase de inundación o Potamofase y Fase de sequía o Limnofase. Modificado de Neiff (2004).

La fase de inundación es denominada *potamofase* y es donde se producen flujos horizontales de información (agua, sedimentos, minerales, organismos) desde el curso del río hacia la planicie de inundación y la fase de sequía o *limnofase* donde el flujo no siempre es transversal al curso del río y lleva información desde la planicie al cauce del río (Neiff 1999).

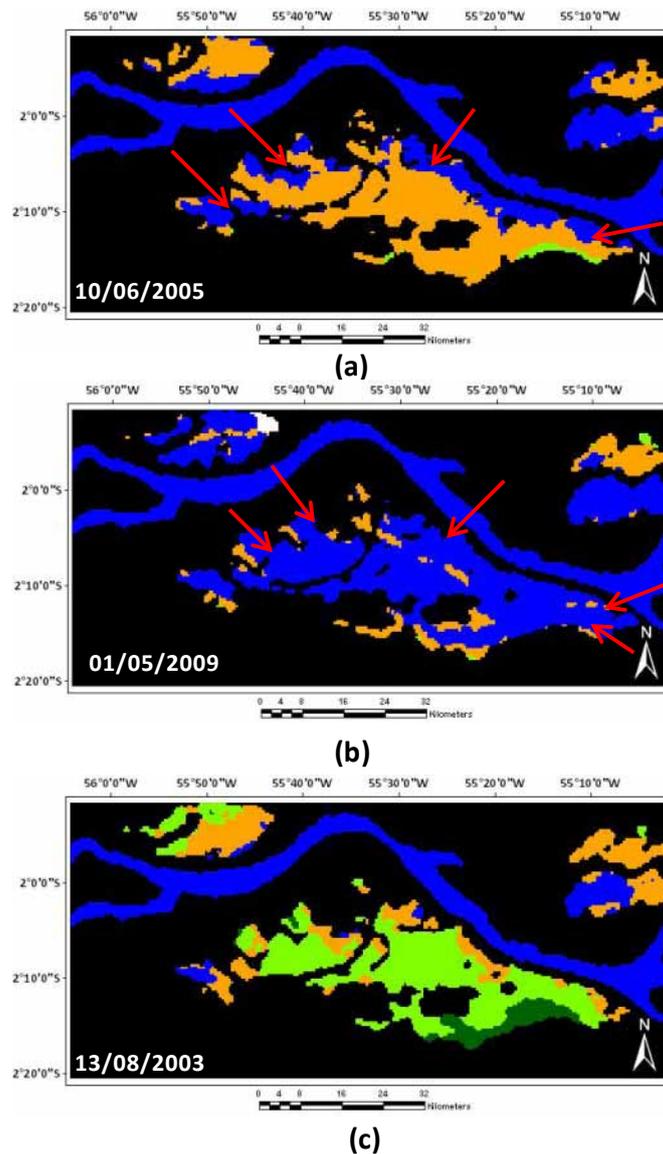
Ambos autores (Junk 1989; Neiff 1990) coinciden en que la estacionalidad del régimen hidrológico se manifiesta e influye sobre el pulso de energía y materia y ha sido considerada, como el factor principal que condiciona la planicie de inundación,

diferenciándola de otros ambientes acuáticos. El régimen hidrológico anual de los ríos principales, también ha sido reconocido como el factor principal que registra los cambios limnológicos temporales en los lagos de planicies de inundación. Durante el pulso de inundación ocurre el intercambio de materiales y energía entre los ecosistemas terrestre y acuático. Al momento el impacto inicial del pulso de inundación durante los periodos de crecida y aguas altas, determina una desestructuración de las comunidades y una disminución de la productividad, debido al aporte excesivo de material en suspensión y como consecuencia una acentuada reducción en la penetración de la luz (Nogueira 2003).

En este trabajo, se pudo evidenciar mediante los mapas temáticos desarrollados en base a datos de satélite este proceso (pulso de inundación) mostrando el ingreso de las aguas del río por los diferentes canales de conexión y expandiéndose en la várzea. Además fue verificado que durante los periodos de crecida e inicio de las aguas altas, las condiciones de productividad disminuyeron encontrándose en la planicie lagos con características oligotróficas a mesotróficas (Figura 95 a y b). Estas observaciones fueron mucho más claras los años en los que se presentaron inundaciones extremas (2006 y 2009) (Figura 95 b). Según Putz & Junk (1997) la biomasa algal así como la producción primaria en las planicies de inundación son fuertemente influenciadas y controladas por el pulso de inundación.

Se verificaron también en los mapas temáticos elaborados mayor productividad y aumento de la biomasa durante el periodo de descenso de las aguas, traducida en la aparición de floraciones algales que determinan condiciones hipereutróficas (Figura 95 c). Según Nogueira (2003) en el periodo de descenso de las aguas, el depósito de nutrientes generado por el intercambio entre los dos ambientes, aumenta la productividad y contribuye al aumento de la biomasa de los lagos. Por otra parte, un concepto importante y complementario a la influencia del pulso de inundación o pulso hidrológico es la conectividad. La cual ha sido entendida como una condición de transferencia de organismos, materia y energía entre el curso del río y la planicie de inundación y conexión horizontal entre parches. (Ward & Stanford 1995a; Ward & Tockner 2001). La conectividad es también definida como un vehículo para la homogenización de la vegetación de los humedales (Piedade et al. 2010; Neiff et al. 2008). Neiff & Poi de Neiff (2003) también definen la conectividad como un enlace entre elementos y procesos de un sistema, el cual es determinado por su estado de variables en espacio y tiempo. Asimismo, el grado de conexión entre el río y la planicie de inundación depende de los periodos de inundación y recesión de las aguas. Los lagos de planicies de inundación cambian de sistemas de almacenaje a sistemas de transporte de agua,

de un sistema léntico a uno lótico, de limnofase a potamofase (Junk & Wantzen 2004). Los hábitats de las planicies de inundación pueden ser alterados, permaneciendo diferenciados durante la fase de aguas bajas y siendo más similares entre si durante la fase de inundación (Carvalho et al.2001). En esta fase el pulso de inundación homogeniza las características limnológicas, físicas y químicas de los cuerpos de agua contiguos incrementando la conectividad (Thomaz et al. 2007).



**Figura 95.** Representación del pulso de inundación o pulso hidrológico en la várzea de Curuaí. (a) Pulso de inundación en el periodo de aguas altas (Junio/2005). (b) Pulso de inundación en el periodo de aguas altas (evento de inundación extrema Mayo/2009). Las flechas rojas indican el ingreso del agua del Río Amazonas por los canales de conexión (c) Ausencia del pulso de inundación (periodo de descenso de las aguas Agosto/2003).

En aguas bajas, la planicie de inundación se encuentra desconectada del río. La biocenosis (comunidad biótica) en tierra como en el resto de los cuerpos de agua se encuentra aislada y comienza a desarrollarse independientemente del río. Este desarrollo sufre un conflicto cuando se producen las inundaciones, las cuales tienden a conectar los cuerpos de agua con distintas características hidrológicas. En tal sentido, los procesos ecológicos y las comunidades biológicas tienden a ser más similares entre los distintos hábitats del sistema rio-planicie de inundación (Junk 1997; Thomaz et al. 2007).

Los niveles de conectividad varían de conexión a corto plazo a conexión permanente durante inundaciones extremas (Junk 1997; Amoros & Bornette 2002). Las planicies de inundación muy grandes tienen patrones de conectividad complejos (Junk & Wantzen 2004) y los grandes lagos son conectados al río mayormente por canales largos o “paraná” y atajos o “furos”. La gran cantidad de flujo de entrada y salida del agua mantiene estos canales abiertos, dando lugar a la formación de lagos que pueden ser aislados durante varios meses y conectados nuevamente al río principal solo en el periodo de aguas altas (Junk et al. 2012).

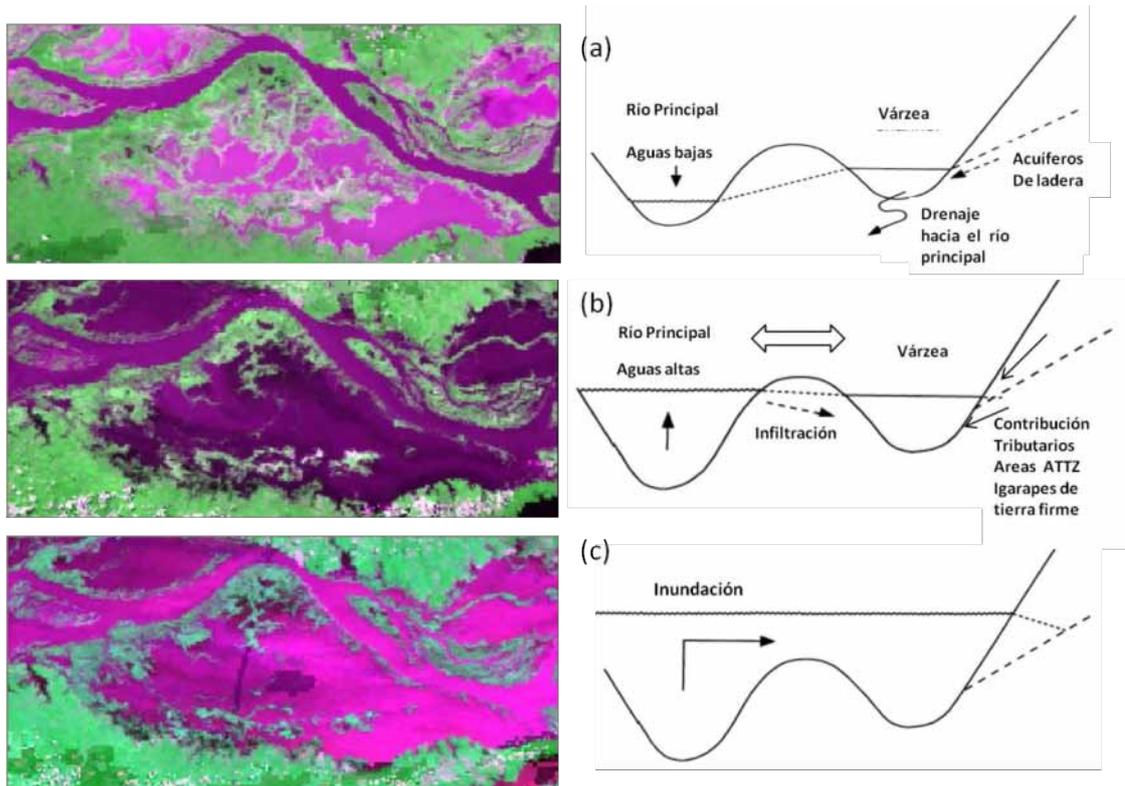
En el caso de la várzea de Curuaí, los lagos de la planicie de inundación pueden conectarse al curso principal por otros lagos es decir existe una interconexión (Bonnet et al., 2008). En este caso la migración de los organismos acuáticos facilita la colonización de los lagos y del río. Sin embargo, la entrada de materia disuelta y suspendida es concentrada en los lagos cercanos al río, como fue observado en los lagos Santa Nina, Salé, lago Grande de Curuaí (A01 y A02) y su concentración disminuye en los lagos distantes (lago do Poçã, lago Grande do Poçã y lago Grande de Curuaí, estaciones A03 y A05 los cuales mantienen condiciones lacustres).

La Figura 96 muestra la dinámica de conectividad hidrológica a corto plazo (escalas cortas de tiempo como meses o años) en relación con los niveles del río y con la dinámica de la planicie de inundación o várzea de Curuaí. Dentro de la planicie el flujo de agua se distribuye por los canales menores conectados al río principal. El flujo de agua en estos canales puede cambiar de dirección, del río hacia la planicie con el aumento del nivel de agua y de la planicie hacia el río cuando el nivel de agua disminuye.

Durante el periodo de descenso de las aguas, todavía se mantiene la conectividad entre ambos sistemas, siendo la várzea predominantemente un sistema exportador de materia hacia el río. Ya en el periodo de aguas bajas la planicie de inundación se encuentra completamente desconectada del río, no hay intercambio de material y la várzea se torna en un sistema

acumulador. Puede existir contribución únicamente de los acuíferos de ladera (Figura 96 a). Existe un incremento de las concentraciones de materia en suspensión, debido a la concentración de material y a procesos de re-suspensión, generados por la baja profundidad de la columna de agua y por acción del viento, principalmente en los lagos de aguas blancas de mayor área superficial (Amoros & Bornette 2002). Con la disminución de la conectividad, los lagos tienden a establecer sus propios ciclos de nutrientes específicos y constituyen importantes refugios para la fauna acuática. También se observan procesos de reciclaje, debido a la acción bacteriana y floraciones fitoplanctónicas puntuales (Perez 2008; Junk et al. 2012).

Durante el período de crecida de las aguas, existe conectividad entre el río y la planicie, predominando las entradas de agua y material hacia la várzea. En este periodo se observa también otras contribuciones como la precipitación local sobre la superficie de los lagos, el flujo local de la cuenca de drenaje, de los igarapés de tierra firme y de la infiltración de la capa freática.

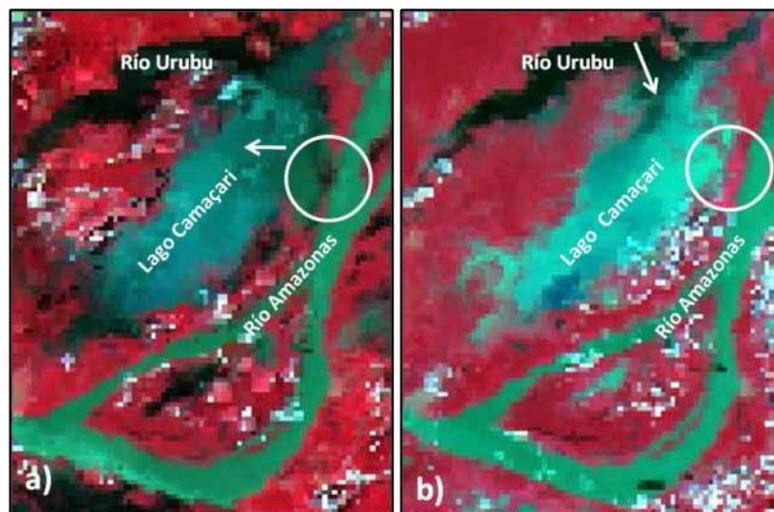


**Figura 96.** Representación esquemática (derecha) de la dinámica a corto plazo de la conectividad hidrológica en relación con los niveles del río y la dinámica de la várzea de Curuaí (imágenes MODIS, izquierda) (a) Periodo de aguas bajas, no existe conectividad entre el río y la planicie (b) Periodo de aguas altas, la planicie se encuentra conectada con el río. (c) Evento de Inundación extrema, la planicie de inundación presenta conectividad permanente con el río (lado derecho, adaptado y modificado de Amoros & Bornette 2002).

En los lagos de aguas negras, predomina la contribución del flujo por la cuenca de tierra firme e infiltración de las aguas subterráneas. En tanto, que en el periodo de aguas altas el área de la várzea está completamente inundada, existiendo aportes del río Amazonas y viceversa, de los tributarios del río localizados al norte de la cuenca amazónica, de las áreas de vegetación completamente inundadas, de los Igarapés de tierra firme transbordados y de la zona de transición entre agua y tierra (ATTZ) (Figura 96 b).

La producción primaria es nueva, principalmente fitoplanctónica en los lagos de aguas blancas y los procesos de reciclaje se dan a lo largo de la columna de agua (Amoros & Bornette 2002; Perez 2008). En periodos de inundación extrema la conectividad con el río es permanente, la planicie se encuentra inundada completamente (Figura 96 c) debido al desborde de flujo del río (Amoros & Bornette 2002).

Por otro lado, los tributarios con diferente calidad de agua pueden causar desconexión hidro-química de los lagos de planicies de inundación, como se presenta en los lagos-ría (lago Manacapuru) formados por tributarios de aguas claras y aguas negras en la planicie de inundación del río Amazonas. Otros ejemplos son los lagos Mirituba y Camaçari. Tomando como modelo el lago Camaçari, (Figura 97) este lago puede estar permanentemente conectado al río Amazonas el cual transporta aguas blancas. Cuando el nivel de agua sube, las aguas blancas del curso principal del río Amazonas reprimen las aguas del río Urubu (aguas negras) y dominan parte del lago (Figura 97 a). Cuando el nivel de agua baja, las aguas negras de los tributarios avanzan a la entrada del lago, en este caso existe desconexión del lago con el curso del río principal (Figura 97 b).



**Figura 97.** Desconexión hidroquímica en el lago Camaçari a) Periodo de aguas altas (Mayo/2005) b) Periodo de agua bajas (Diciembre/2008).

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES

A partir de la metodología y análisis efectuados en este trabajo, fue posible concluir que:

- La integración de las tres técnicas (muestreo *in situ*, radiometría de campo, imágenes de satélite) empleadas permitió detectar la eutrofización, la presencia de floraciones algales basada en el monitoreo de las concentraciones de clorofila-a por series temporales largas de satélite. También fue posible detectar las concentraciones de materia en suspensión y las variaciones a nivel espacial y temporal de ambos parámetros.
- La división Cyanophyta o de las Cianobacterias fue dominante en las várzeas de Curuaí (aguas blancas) y de Janauacá (aguas negras), caracterizando estos ambientes principalmente en el periodo de descenso de las aguas con la presencia de importantes floraciones.
- La relación de las dos primeras técnicas permitió entender las propiedades ópticas del fitoplancton y de la materia en suspensión ya que los espectros de reflectancia radiométrica en las várzeas y lagos próximos presentaron curvas características de los pigmentos fotosintéticos (clorofila-a), de algunos grupos del fitoplancton (Cianobacterias) y de la materia en suspensión relacionadas a los periodos hidrológicos y a su conexión con el río principal.
- La relación de la segunda y tercera técnica mediante el análisis de las curvas de reflectancia radiométrica (valores máximos y mínimos de absorción) y su correspondencia con las bandas 2 (verde) y 3 (roja) de MODIS, permitió establecer una relación (división) de bandas (B2/B3) para estimar el estado trófico y la presencia de floraciones cuantificando así la sensibilidad de las imágenes de satélite a los parámetros limnológicos analizados.
- La comparación de los datos provenientes de las tres técnicas facilitó la calibración de las imágenes y la validación de los algoritmos para la elaboración de mapas multi-

temporales de los parámetros respectivos. La simulación de bandas MODIS fue la más adecuada para detectar concentraciones de clorofila-a en presencia de bajas concentraciones de materia en suspensión, lo que corresponde al periodo de aguas altas. Esta simulación también fue adecuada para detectar concentraciones de clorofila-a en ambientes con mezcla de aguas o con predominancia de aguas negras.

- Con la simulación de bandas de otros sensores como MERIS, se pudo detectar altas concentraciones de clorofila-a en ambientes con elevadas concentraciones de materia en suspensión (periodo de descenso de las aguas) y con diferentes tipos de aguas, debidos a su alta resolución espectral.
- Ambas simulaciones de bandas (MODIS y MERIS) fueron apropiadas para detectar concentraciones de materia en suspensión en los lagos de planicies de inundación.
- En base a los datos de concentración de clorofila-a y a las técnicas de simulación de bandas MODIS y de Match-up fue estimado el estado trófico de los lagos y planicies de inundación, aplicando el índice de estado trófico de Carlson modificado (IET)<sub>m</sub> por Toledo para lagos y reservorios tropicales. Este índice fue el más apropiado y ajustado para el estudio de estos sistemas, ya que su aplicación ilustró correctamente la distribución de la clorofila-a, la presencia de floraciones algales y su relación con la dinámica hidrológica.
- La técnica de Match-up fue la más apropiada para la determinación del estado trófico, debido a que los valores de reflectancia detectados coincidieron con los valores de concentración de clorofila-a propuestos en el Índice de Estado Trófico de Carlson modificado (IET)<sub>m</sub>. Los valores resultantes de esta técnica fueron la base de los modelos para la elaboración de los mapas temáticos.

A partir de los resultados obtenidos se pudo concluir que:

- La clasificación del estado trófico de los lagos y planicies de inundación plasmada tanto en gráficos de barras como en mapas temáticos reportó en su mayoría, lagos que alternaron entre características “oligotróficas a mesotróficas” y “mesotróficas a eutróficas” dependiendo de los periodos hidrológicos y de su posición respecto al río principal.

- Los lagos clasificados como “oligotróficos a mesotróficos” fueron aquellos que mantienen relación directa con el río principal. Los “grandes lagos” en la várzea, así como, los lagos próximos fueron clasificados como “mesotróficos a eutróficos”, exhibiendo también condiciones hipereutróficas.
- El uso de mapas temáticos del estado trófico permitió describir la dinámica espacial y temporal relacionada a las concentraciones de clorofila-a y materia en suspensión en la várzea de Curuaí y lago Parú.
- A través del análisis de las series temporales MODIS fue posible inferir que el estado trófico de los lagos fue variable inter e intra – anualmente a lo largo de una década para las planicies de inundación y lagos próximos.

La interpretación de los resultados a partir de datos auxiliares permitió concluir que:

- Los resultados interpretados en función de la dinámica hidrológica, reportaron mayores concentraciones de clorofila-a en los periodos de aguas altas y de descenso de las aguas (época seca). Por el contrario,
- las concentraciones de materia en suspensión disminuyeron en periodos de aguas altas, excepto en eventos de inundación extrema y se incrementaron en el periodo de descenso de las aguas.
- Las variaciones periódicas (cada cinco años) resultantes de la relación de la eutrofización con la dinámica hidrológica en las planicies de inundación y otros lagos, estuvieron relacionadas a eventos climáticos extremos, fuertes sequías (2005 y 2010) e inundaciones severas (2006 y 2009) producidos por el calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Atlántico tropical sur y norte. Las sequías provocaron una disminución del tiempo de permanencia de las floraciones o *blooms* de algas y las inundaciones provocaron la ausencia de las condiciones eutróficas, prevaleciendo las condiciones oligotróficas y mesotróficas en la gran mayoría de los lagos, especialmente el año 2009.
- La relación de la eutrofización con la geoquímica demostró que la producción fitoplanctónica se desarrolló principalmente en los lagos de aguas blancas, ricos en nutrientes y altamente productivos, distantes de la conexión con el río principal y en las estaciones localizadas en el centro de los lagos próximos. Sin embargo, algunos

lagos próximos que presentan mezcla de aguas blancas y negras pueden presentar mayor productividad. En los lagos de aguas blancas el crecimiento de la producción primaria fue limitado por el nitrógeno inorgánico disuelto a lo largo del ciclo hidrológico favoreciendo la dominancia de Cianobacterias especialmente fijadoras de nitrógeno atmosférico.

- Según los conceptos de pulso de inundación y pulso hidrológico el principal efecto sobre los organismos es hidrológico. En un sistema rio-planicie de inundación la mayor parte de la productividad proviene directa o indirectamente de los intercambios laterales con la planicie de inundación.
- La estacionalidad del régimen hidrológico influye sobre el pulso de inundación y ha sido considerada como el elemento principal que condiciona a la planicie de inundación diferenciándola de otros ambientes acuáticos.
- La conectividad entre el río y la planicie de inundación depende de los periodos de inundación y recesión de las aguas. Los hábitats de las planicies de inundación pueden ser alterados, diferenciándose durante la fase de aguas bajas y tornándose más similares entre si durante la fase de inundación.

En base a todo lo expuesto anteriormente:

- Podemos entender que la dinámica limnológica, referida al proceso de eutrofización y presencia de materia en suspensión en las planicies de inundación en la Amazonía, fue controlada por las fluctuaciones de los niveles de agua que tienen relación directa con los periodos hidrológicos y climáticos. Así mismo se logró demostrar que los eventos hidrológicos extremos llegan a disminuir o anular drásticamente las condiciones eutróficas de estos ambientes.

## CAPÍTULO 8

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas (ANA) 2010. [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)
- Alcântara, E. H., Stech, J. L., Novo, E. M. L. M., Shimabukuro, Y. E., & Barbosa, C. C. F. 2008. Turbidity in the Amazon floodplain assessed through a spatial regression model applied to fraction images derived from MODIS/Terra. *IEEE Trans. Geo. Rem. Sens.* 46, 2895-2905.
- Alcântara, E. H. 2007. Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. INPE-14621-TDI/1200.
- Alves, M. M. 2001. Sistemas Sensores. Em: Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 1-22 p.
- Amorim, M. A., Moreira-Turcq, P. F., Turcq, B. J. & Cordeiro, R. C. 2009. Origem e dinâmica da deposição dos sedimentos superficiais na Várzea do Lago Grande de Curuaí. *Acta Amazonica*. 39 (1): 165-172.
- Amoros, C. & Bornette, G. 2002. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology* 47, p 761-776.
- Anagnostidis, K., Koma`rek, J. 1988. Modern approach to the classification system of cyanophytes.3-Oscillatoriales. *Archiv für Hydrobiologie, Suppl. Vol. 80.nº. 1-4 Algological Studies, Stuttgart, v. 50-53. p. 327-472.*
- APHA- American Public Health Association. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18º Edition. Washington. APHA, AWWA, WWCF. p 2-54.
- Arantes Gama, W. & Nogueira, I.S. 2008. Algas Planctônicas de diferentes ambientes da Várzea do Curuaí (Para, Brasil) durante o período de águas altas em 2004. Em: Anais do V Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão. Campus Samambaia. 6-10/10/2008.
- Barbosa, C. C. F., Novo, E. M. L. M., Melack, J. M., Freitas, R. M. & Filho, W. P. 2006. Metodología de análise da dinâmica de área e volume inundável: O exemplo da Várzea do lago Grande de Curuai. *Revista Brasileira de Cartografia* Nº 58/03.

- Barbosa, C. C. F. 2005. Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. 286 p. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/MTCm3@80/2006/02.22.15.03>. Acesso em: Nov/2009.
- Bardy Prado, R. & Novo, E. M. L. M. 2007. Avaliação espaço-temporal da relação entre o estado trófico do reservatório de Barra Bonita (SP) e o potencial poluidor de sua Bacia hidrográfica. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia. 19 (2): 5-18.
- Bonnet, M. P., Lambach, B., Boaventura, R. G., Oliveira, E., Seyler, F., Calmant, S. and P. Seyler. 2011. Impact of the 2009 exceptional flood en the floodplain of the Solimões River IAHS joint Symposia, Melbourne.
- Bonnet, M.P., Barroux, G., Martinez, J.M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G.; Melack, J.M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J.G., Roux, E., Calmant, S.; Guyot, J.L., Seyler, P. 2008. Flooding hydrology in an Amazonian floodplain lake (Lago Grande de Curuai). *Journal of Hydrology*, v. 349, n.1-2, p. 18-30.
- Bouali, M., Yahia, H., Turiel, A. & Henry, P. 2009. A multifractal approach for Sunlint in medium resolution satellite imagery. ASPRS Annual Conference Baltimore, Maryland. March 9-13, 2009.
- Bourrelly, P. 1985. Les algues d'eau douce. Tome III. Les Algues Bleues et Rouges. Les Eugléniens, Peridiens et Cryptomonadines. N. Boube'e et Cie, Paris, pp. 1-606.
- Bourrelly, P. 1972. Les algues d'eau douce. Tome I: Les Algues Vertes. N. Boube'e et Cie, Paris, pp. 1-551.
- Brasil Visto do Espaço 2004. Disponível em: <http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/> Acesso em: 4/11/2010.
- Brasil das Aguas 2003-2004. Disponível em: <http://www.brasildasaguas.com.br>. Acesso em Diciembre/2010.
- Bricaud, A., Claustre, H., Ras, J. & Oubelkheir, K. 2004. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. *J. Geophys. Res.* 109: C11010, doi: 10.1029/2004JC002419.
- Calijuri, M. C. 1988. Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização. São Carlos. Universidade Federal de São Carlos, 293 p. (Tese).

- Campos, C. P. & Freitas, C. E. C. 2010. Curva de crescimento do Tucunaré *Cichla monoculus* Spix & Agassiz, 1831 do Lago Grande de Manacapuru, Amazonas, Brasil. Rev. Bras. Eng. Pesca 5(1): 1-9.
- Cardoso da Silva, S., Yuri Nishimura, P., Pompêo, M. L. M., Moschini-Carlos, V. 2007. Caracterização limnológica das águas superficiais do reservatório Billings (São Paulo-SP). Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 23-28 Setembro, Caxambu-MG..
- Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22: 361-369.
- Carvalho, P., Bini, L. M. Magela Thomaz, S., Gonçalves de Oliveira, L., Robertson, B., Gomes Tavechio, W. L. & Darwisch, A. J. 2001. Comparative limnology of South American floodplain lakes and lagoons. *Acta Scientiarum*. Maringá, Vol. 23. n.2, p. 265-273.
- Casco, S. L., Basterra de Chiozzi, I. & Neiff, J. J. 2005. La vegetación como indicador de la geomorfología fluvial. *Rev. Bras. Geomorfol.* 6:123-136.
- CETESB, 2002. Índice e indicadores de qualidade da água. Revisão as literaturas PNMA II Índices e indicadores. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>
- Cordeiro, R. C., Moreira-Turcq, P. F., Turcq, B. J., Moreira, L. S., de Carvalho Rodriguez, R., Lima da Costa, R., Sifeddine, A. & Lamego Simões Filho, F. F. 2008. Acumulação de carbono em lagos amazônicos como indicador de eventos paleoclimáticos e antrópicos. *Oecol. Bras.*, 12 (1):130-154.
- Crossetti, L. O. & Bicudo, C. E. M. 2008. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application. *Hydrobiologia*. 610:161-173.
- Chalar, G. 2006. Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: Embalse Salto Grande (Argentina-Uruguay) en: Eutrofização na America do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle. Tundisi, J. G., Matsumura Tundisi, T. & Sidagis, C. G. (eds). Instituto Internacional de Ecologia. Academia Brasileira de Ciencias. 87-101p.
- Dellamano-Oliveira, M. J., Cabral Senna, P.A. & Massae Taniguchi, G. 2003. Limnological characteristics and seasonal changes in density and diversity of the phytoplanktonic community at the Caçó Pond, Maranhão State, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology An international Journal*. Vol. 46, nº 4. pp. 641-651.

- Dominguez Gomez, J. A., Marcos Martín, C., Chao Rodriguez, Y., Delgado Rojas, G. & Rodriguez Perez, D. 2011. Estudio de águas continentales mediante teledetección. UNED, Madrid, España. Disponible en: <http://www.books.google.com>.
- Duarte, M. A. C. 1999. Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IETm) em três lagoas naturais no nordeste do Brasil. In: 20º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. Brasil, Río de Janeiro. Anais: AbesRío99.
- Espíndola, E. G., Matsumura-Tundisi, T. & Moreno, I. D. 1996. Estrutura da comunidade fitoplanctônica da lagoa Albuquerque (Pantanal Matogrossense), Mato Grosso do Sul, Brasil. *Acta Limnologica Brasiliensia*. Vol.8. 13-27p.
- Estevez, F. A. 1998. Fundamentos de Limnología. Río de Janeiro. Interciencia.
- Esteves, F. A., Thomaz, S. M. & Roland, F. 1994. Comparison of metabolism of two floodplain lakes of the Trombetas river (Pará, Brasil) based on a study of diel variation. *Amazoniana* 13, 33-46.
- Esteves, F.A. 1988. Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. *Acta Limnologica Brasiliensia*. Vol. 11. 3-28p.
- European Spacial Agency (ESA) MERIS 1996. web site. Disponible en: <http://envisat.esa.int/instruments/meris> Acceso en: 20/10/2010.
- Fernandes, V. O., Cavati, B., Bassani de Oliveira, L. & Souza, B.D. 2009. Ecología de Cianobactérias: Fatores promotores e consequências das floracções. *Oecol. Bras.* 13(2) pp. 247-258.
- Ferreira de Faria, I. 2010. Gestão territorial e mapeamento participativo na Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) de Sacará Piranga/Silves-AM. Em: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 5.,2010, Portugal. *ActasCoimbra: CEGOT, 2010. Comunicações*, p. 12.
- Fia, R., Texeira de Matos, A., Carteri Coradi, P., Pereira Ramirez, O.2009. Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS. Brasil. *Ambiente e Água- Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*. Universidade de Taubaté. Vol. 4. Núm.1. pp. 132-141.
- Filizola, N. 2003. Transfer sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Thèse de Doctorat de L'Université Toulouse III. 290 pp.
- Fisch, G., Marengo, J.A. & Nobre, C.A. 2006. Clima da Amazonia. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Acceso en: 4/7/2010. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rc/limanl/boletim/cliesp10a/fish.html>.

- Fisher, J.T.R. & Parsley, P.E. 1979. Amazon Lakes: Water storage and nutrient stripping by algae. *Limnol.Oceanogr.* 24(3): 547-553.
- Furch, K. & Junk, W.J. 1997. Physicochemical conditions in floodplains. In: Junk WJ (ed) *The Central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system.* Ecological studies, vol. 126. Springer, Berlin, pp 69-108.
- França, A. M. S. 2005. Aplicação do sensoriamento remoto no estudo da influência da dinâmica sazonal do rio Amazonas sobre a morfologia dos sistemas lacustres. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. São José dos Campos. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/arquivos\\_publicacoes/](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/arquivos_publicacoes/)
- Freire, B. 2010. Integração de imagem MODIS e de dados censitários na avaliação do impacto da pecuária sobre o estado trófico de sistemas aquáticos do Baixo Amazonas. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. (INPE). Sao Jose dos Campos. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37AS332>. Acesso em: Sept/2010.
- Freitas, R. M. & Novo, E. M. L. M. 2005. Mapeamento de áreas alagáveis na planície do rio Amazonas a partir de dados do sensor MODIS - Região do Lago Curuai-PA. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 533-540.
- Froidefond, J.M. & Doxaran, D. 2004. Télédétection optique appliquée à l'étude des eaux côtières. *Télédétection*, vol. 4, n° 2, p. 579-597.
- Garcez Costa Souza, R., Carvalho Freitas, C. E., Witkoski, A. C., Souza Brito, M. A. 2008. Mudanças Sociais na Pesca Artesanal: Um Estudo a partir da Pressão sobre o Estoque de Tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier, 1818) do Lago Grande de Manacapuru (Am). IV Encontro Nacional da Anppas 4, 5 e 6 de junho de 2008 Brasília, Brasil.
- Garcia, C.Z., Garcia, D.C.O., Leite, M.A. 2007. Comparação entre dois índices de estado trófico para o reservatório de Ilha Solteira. In Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil. 23 a 28 de setembro. Caxambu - Minas Gerais.
- Gitelson, A., Yacobi, Y., Schalles, J., Ruiniquist, D., Han, L., Stark, R. & Etzion, D. 2000. Remote estimation of phytoplankton density in productive waters. *Archiv für Hydrobiologie. Advances in Limnology*, vol. 55, pp. 121-136.

- Golterman, H. L., Clymo, R. S. Ohnstad, M. A. M. 1978. Methods for Physical and Chemical Analysis for Freshwaters 2<sup>o</sup> ed. IBP Handbook nº8. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 213 p
- Guyot, J. L., Callède, J., Molinier, M., Guimarães, V. & Oliveira, E. 1998. La variabilité hydrologique actuelle dans le bassin de l'Amazonie. Bull. Inst. Fr. Étud. Andin.. 27(3):779-788.
- Herve, S. & Heinonen, P. 1984. Factors affecting the chlorophyll a assay of phytoplankton samples during transport and analysis. Ann. Bot. Fennici 21:17-20.
- Holm-Hansen, O. & Helbling, E. W. 1995. Técnicas para la medición de la productividad primaria en el fitoplancton. En: Manual de Métodos Ficológicos. K. Alveal, M. E. Ferrario, E. C. Oliveira y E. Sar (Eds) Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 329-350 p.
- Holm-Hansen, O., Lorenzen, C. J., Holmes, R. W., Strickland, J. D. H. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. Journal du Conseil International pour l' Exploration de la Mer. 30, 3-15.
- Huszar, V. L. M. 2000. Fitoplancton In: Bozelli, F. A., Esteves, F. A. & Roland, F. (eds.) Lago Batata: Impacto e recuperação de um ecossistema amazônico. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Sociedade Brasileira da Limnologia. p. 91-104
- Huszar, V. L. M. & Reynolds, C. S. 1997. Phytoplankton periodicity and sequences of dominance in an Amazonian flood-plain lake (Lago Batata, Pará, Brasil): responses to gradual environmental change. Hydrobiologia 346: 169-181.
- .HYBAM Hydrologie et Géochimie du bassin Amazonien, (IRD). Base de datos GETMODIS. Disponible en: <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels.php>
- Ibañez, M. S. R., Nogueira, I. S. & Maurice Bourgoin, L. 2003. Composição da Comunidade Fitoplantônica da várzea do Curuaí, Amazonas. LBA Conference, Brasília, Brasil
- Ibañez, M. S. R. 1997. Phytoplankton biomass of a central Amazonian flood-plain lake, Verhein International Verein Limnologie 26: 605-609.
- Infante, A. 1988. El plancton de las aguas continentales. Ecol. Monographs. 33. 5-13.
- Irion, G., de Mello, J. A. S. N., Morais, J., Piedade, M. T. F., Junk, W. J. & Garming, L. 2010. Development of the Amazon valley during the Middle to Late Quaternary: sedimentological and climatological observations. In: Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., Schöngart, J. & Parolin, P. (eds) Central Amazonian floodplain forests:

- ecophysiology, biodiversity and sustainable management. Springer Verlag, Berlin, pp 27- 42.
- Irion, G., Junk, W. J. & de Mello, J. A.S.N. 1997. The Large Central Amazonian River Floodplains near Manaus: Geological, Climatological, Hydrological and Geomorphological aspects. In: Junk, W. J. The Central Amazon Floodplain: Ecology of a pulsing system. Ecological Studies.vol.126. Springer Verlag, Berlin, Germany. 525 p.
- Irion, G., 1984. Sedimentation and sediments of Amazonian rivers and evolution of the Amazonian landscape since Pliocene times.In: Sioli, H. (ed) The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p. 201-214.
- Jeffrey, S. W. & Humphrey, G. F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b* and *c* in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanzen* 167:191-4.
- Jerlov, N. G. 1976. *Marine Optics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 227p.
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Schöngart, J. & Wittmann, F. 2012. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). *Wetlands Ecol. Manage* 20:461-425. DOI 10.1007/s11273-012-9268-0.
- Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Schöngart, J., Cohn-Haft, M., Adeney, M. J. & Wittmann, F. 2011. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. *Wetlands*. 31: 623-640. DOI 10.1007/s13157-011-0190-7.
- Junk, W.J. & Wantsen, K.M. 2004. The flood pulse concept: New aspects, approaches and applications - an update. In: Welcomme, R. L. Petr T (eds) *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International symposium on the management of large rivers for fisheries*, vol.2. Food and Agriculture Organization & Mekong River Commission. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Cambodia, pp 117-149
- Junk, W. J. 2002. Long-term environmental trends and the future of tropical wetlands. *Environmental Conservation* 29(4): 414-435. DOI:10.1017/S0376892902000310.
- Junk, W.J. & Piedade, M.T.F. 1997. Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants. In: Junk, W.J. (ed) *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. Ecological Studies 126, Springer Verlag, Berlin, Germany, p. 147-185.

- Junk, W.J. 1997. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: Junk, W.J. (ed) *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. Ecological Studies 126, Springer Verlag, Berlin, Germany, p. 3-17.
- Junk, W. J., Bayley, P. B. & Sparks, R. E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. p. 110-127. In: D. P. Dodge (ed.) *Proceedings of the International Large River symposium*. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106.
- Junk, W. J. 1984. Ecology of the várzea, floodplain of Amazonian white-water rivers. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p. 127-165.
- Klammer, G. 1984. The relief of the extra-Andean Amazon basin. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p. 47-83.
- Kirk, J. T. O. 1994. *Light & photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press. 2<sup>nd</sup> ed. 509 p.
- Komařek, J. and Anagnostidis, K. 2005. Cyanoprokaryota. 2 Teil/2nd part: Oscillatoriales. Gustav Fischer, Jena, pp. 1–548.
- Komařek, J. and Anagnostidis, K. 1999. Cyanoprokaryota I. Teil: Chroococcales. Gustav Fischer, Jena, pp. 1–548.
- Koponen, S. 2006. Remote sensing of water quality for Finnish lakes and coastal areas. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology. 85 p.
- Kosuth, P. 2002. A case study of floodplains dynamics: dynamics, water balance, sediment balance of the Várzea of Lago Grande de Curuai. 2<sup>nd</sup> LBA Conference, 7-10 July, Manaus, Brazil.
- Kousky, V. E. 1988. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*. Vol. 3: 217-231.
- Lamparelli, M.C. 2004. Graus de trofia em corpos d'água do Estado do São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo. 235 p.
- Lee, R. E. 2008. *Phycology* Cambridge University Press. 547 pp.
- Lewis, W. M. Jr. 1987. Tropical Limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 18, p. 159-184.

- Marengo, J. A., Tomasella, J., Soares, R. W., Alves, M. L. & Nobre, C. A. 2011. Extreme climatic events in the Amazon basin: Climatological and hydrological context of recent floods. *Theor Appl Climatol.* doi: 10.1007/s00704-011-0465-1.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, M. L., Soares, R. W. & Rodriguez, D. A. 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters.* Vol. 38, L12703, doi: 10.1029/2011GL047436.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Oyama, M.D., Sampaio De Oliveira, G., De Oliveira, R., Camargo, H., Alves, L.M., Foster Brown, I. 2008 a. The Drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, vol. 21, p.495-516.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Tomasella, J., Cardoso, M.F. & Oyama, M.D. 2008 b. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, 1773-1778. doi: 10.1098/rstb.2007.0015.
- Marengo, J.A. 2004. Interdecadal variability and trends in rainfall in the Amazon basin. *Theoretical And Applied Climatology* 78: 79-96.
- Marengo, J.A. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology* 12: 853-86
- Marrari, M., Hu, C. & Daly, K. 2006. Validation of SeaWiFS chlorophyll a concentrations in the Southern Ocean: A revisit. *Remote Sensing of Environment* 105 pp. 367-375.
- Martinez, J. M. and T. Le Toan. 2007. Mapping of flood dynamics and vegetation spatial distribution in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sensing of Environment* 108(3): 209-223.
- Martinez, J. M., Maurice-Bourgoin, L., Moreira-Turcq, P., Guyot, J. L. 2004. Use of MODIS and MERIS data for the water quality monitoring of Amazonian rivers and floodplain lakes. In: LBA Third International Conference Brasilia, Brazil.
- Martinez, J. M., Maurice-Bourgoin, L., Kosuth, P., Seyler, P., Guyot, J. L. 2003. Analysis of multitemporal MODIS and Landsat 7 images acquired over Amazonian floodplain lakes for suspended sediment concentrations retrieval In: IGARSS'03 Toulouse, France.
- Maurice-Bourgoin, L., Bonnet, M. P., Martinez, J. M., Kosuth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., Guyot, J. L., Vauchel, P., Filizola, N., Seyler, P. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 335, p. 140-156.
- Melack, J. M. & Forsberg, B. R. 2001. Biogeochemistry of Amazon floodplain lakes and associated wetlands. In: MacClain, M. E., Victoria, R. L. & Richey, J. E. (Eds.)

- The Biogeochemistry of the Amazon Basin. Oxford University Press, New York, p. 235-274.
- Melack, J. M. & Fischer, T. R., 1990. Comparative limnology of tropical floodplain lakes with an emphasis on the central Amazon. *Acta Limnologica Brasiliensia* 3, 1-48.
- Melack, J. M. 1984. Amazon floodplain lakes: Shape, fetch and stratification. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* Vol. 22, p 1278-1282.
- Melo, S., Huszar, V.L.M., Roland, F., Esteves, F.A. & Bozelli, R. 2004. Phytoplankton diel variation and vertical distribution in two Amazonian floodplain lakes (Batata Lake and Mussurá Lake, Pará-Brasil) with different mixing regimes. *Amazoniana*. XVIII 1/2: 1-10.
- Meneses, P. R. & Netto, J. S. M. 2001. Sensoriamento Remoto – reflectância dos alvos naturais. Brasília, Ed. UNB.
- Mercante, C. T. J., Tucci-Moura, A. 1999. Comparação entre os índices de Carlson e de Carlson modificado aplicados a dois ambientes aquáticos subtropicais, São Paulo, SP. *Acta Limnológica Brasiliensia*, 11, p. 1-14.
- Mertes, L. A. K., Dunne, T., Martinelli, L. A. 1996. A Channel-floodplain geomorphology of the Solimões-Amazon River, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*. vol. 108. nº 9. p. 1089-1107.
- Mobley, C. D. 1999. Estimation of the remote sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics* 38(36):7442-7455.
- Moizo Marrubio, P. 2004. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje. *GeoFocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, nº 4, p. 1-24. ISSN: 1578-5157.
- Molinier, M., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G. & Guimarães V De Oliveira, E. 2002. Hydrological variability in the Amazon drainage basin and African tropical basins. *Hidrol Process*. Doi:10.1002/hyp.7400.
- Molinier, M., Guyot, J. L., de Oliveira, E & Guimarães, V. 1996. Les regimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. *L'hydrologie tropicale: de science et outil pour Le developpement*. Paris. Mai 1995. IAHS. Series of Proceedings and Reports, 238, pp. 209-222. Oxford, UK: IAHS Publication.
- Moreira, L. S.; Moreira-Turcq, P. F.; Cordeiro, R. C. & Turcq, B. J. 2009. Reconstituição paleoambiental do Lago Santa Nina, Várzea do Lago Grande de Curuaí, Pará, Brasil. *Acta Amazonica*. 39 (3) 609-616.

- Moreira-Turq, P., Bonnet, M.P., Amorim, M., Bernardes, M., Lagane, C., Maurice, L., Perez, M. & Seyler, P. 2013. Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 27, 119-130, doi:10.1002/gbc.20022,2013
- Moreira-Turcq, P., Barroux, G., Bernardes, M., Bonnet, M-P., Maurice Bourgoïn, L., Perez, M., Seyler, P. 2005. Dynamics of organic carbon between the Amazon River and the floodplain lakes. In: Heathwaite, L., Webb, B., Rosenberry, D., Weaver, D., Hayachi, M. (eds). *Dynamics and Biogeochemistry of River Corridors and Wetlands*. v. 294. IAHS-Publ., p. 19-22.
- Moreira-Turq, P., Jouanneau, J. M., Seyler, P., Weber, O., Guyot, J. L. 2004. Carbon sedimentation at Lago Grande de Curuaí, a floodplain lake in the low Amazon region: insights into sedimentation rates. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* v. 214, p. 27-40.
- Moreira-Turcq, P., Seyler, P., Guyot, J.L. & Etcheber, H. 2003. Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. *Hydrological Processes*. vol.17 p. 1329-1344
- Morel, A. 1980. In water and remote measurements of ocean color. *Boundary Layer Meteorology*, 18, 177-201.
- Morel, A. & Prieur, L. 1977. Analysis of variation in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22:709-722.
- Murça Pires, J. 1984. The Amazonian Forest. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. *Monographiae Biologicae*. Junk, Dordrecht, p. 581-602.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) MODIS web site. Disponible en: (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>) Acceso en: 18/10/2010.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) MODIS specifications web site. Disponible en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> Acceso en: 18/10/2010.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) MODIS products web site. Disponible en: [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table) Acceso en: 18/10/2010.
- Naval, L. P., Silva, C. D. F. & Souza, M. A. A. 2004. Comportamento dos índices do estado trófico de Carlson (IET) e modificado (IETm) no reservatório da UHE Luis Eduardo Magalhães, Tocantins-Brasil. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 29, 2004 San Juan, Puerto Rico. Anais san juan: AIDIS 2004.

- Neiff, J. J., Casco, S. L. & Poi de Neiff, A. 2008. Response of *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) to water level fluctuations in two lakes with different connectivity in the Paraná River floodplain. *Revista de Biología Tropical* 56(2): 613-623.
- Neiff, J. J. 2004. Bosques fluviales de la Cuenca del Paraná. En: M. F. Arturi, J. L. Frangi y J. F. Goya (Eds.), *Ecología y Manejo de Bosques de la Argentina* (en prensa), pp 1-27.
- Neiff, J. J. & Poi de Neiff, A. 2003. Connectivity processes as a basis for the management of aquatic plants. In: Thomaz, S. M. & Bini, L. M. (eds.) *Ecología e Manejo de Macrófitas Acuáticas*. Eduem, Maringá, Paraná, Brazil. p. 39-58.
- Neiff, J. J. 1999. El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. pp. 97-145. En: Malvarez, A. I. & P. Kandus (eds.): *Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos*. ORCYT-MAB (UNESCO) 224 p.
- Neiff, J. J. 1990. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia* 15(6):424-441.
- Nogueira, I. S., Nabout, J. C., Rodrigues, M. S. & Bourgoïn, L. M. 2010. Determinants of beta diversity: the relative importance of environmental and spatial processes in structuring phytoplankton communities in an Amazonian floodplain. *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 22, nº 3, p. 247-256. Doi: 10.4322/actalb.02203001.
- Nogueira, N. M. C., Barbieri, R., Costa Neto, J. P. & Rocha, O. 2005. Composition and temporal changes of phytoplankton community in Lake Quebra-Pote, MA, Brazil. *Acta Limnol. Bras.* 17(4) 419-431.
- Nogueira N. M. C. 2003. Estrutura da comunidade fitoplanctônica, em cinco lagos marginais do rio Turiaçu, (Maranhão, Brazil) e sua relação com o pulso de inundação. Universidade de San Carlos, São Paulo. (Tese de Doutorado) 122 pp.
- Nogueira, N. M. C. & Ramirez, R. J. J. 1998. Variação mensal da condição trófica do Lago das Garças (São Paulo, SP, Brasil). *Acta Limnologica Brasiliensia*. Vol.10(2). 21-34 p.
- Novo, E. L. M. M., Barbosa, C. C. F., Freitas, R. M., Shimabukuro, Y. E., Melack, J. M., Pereira-Filho, W. 2006. Seasonal changes in chlorophyll distribution in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Jap. J. Lim.* 7, 153-161.
- Novo, E. L. M. M., Barbosa, C. C. F., Freitas, R. M., Melack, J. M., Shimabukuro, Y. E., Pereira-Filho, W. 2005. Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuai em resposta ao pulso de inundação do rio Amazonas a partir de imagens MODIS. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, INPE*. 3175-3182.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. 1982. *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control*. Paris. 155 p.

- Padisák, J. 2005 Phytoplankton. In: The lakes handbook Limnology and Limnetic ecology vol. 1. O`Sullivan, P. E. And Reynolds, C. S. (eds) Blackwell Publishing. 251 - 308 p.
- Paerl, H. W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters. *Limnol. Oceanogr.* 33:823-847.
- Peña-Martínez, R., Ruiz-Verdú, A. & Dominguez-Gomez, J. A. 2004. CEDEX Proposal for CHRIS/PROBA activities in 2004 on validation of MERIS models. Proc.Of the 2<sup>nd</sup> CHRIS/Proba. Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy 28-30 April (ESA SP-578, July 2004).
- Pérez Pérez, M. A. 2008. Biogeoquímica da Várzea do Lago Grande de Curuaí, Ríó Amazonas, Pará, Brasil: Caracterização, origem, ciclagem e destino do material orgânico e inorgânico. 274 p. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Pessoa-Aragão, L. 1984. Contribuição ao estudo da biologia de Aruanã, *osteoglossum bicirrhosum* Vandelli, 1829, del lago Janauaçã - Estado de Amazonas, Brasil. I- Desenvolvimento y alimentación larval (osteichthys - osteoglossiformes). *Ciën. Agron.*, 15 (1/2): p. 7-17.
- Piedade, M. T. F., Ferreira, C. S. & Franco, A. C. 2010. Estrategias reproductivas de la vegetación y sus respuestas al pulso de la inundación en las zonas inundables de la Amazonía Central. *Ecosistemas* 19(1): 52-66. Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=629> Acceso en: Agosto/2011.
- Pizzolon, L. 1996. Importancia de las Cianobacterias como factor de toxicidad en aguas continentales. *Interciencia.* 21(6): 239-245. Disponible: <http://www.interciencia.org.ve>
- Platnick, S., King, M. D., Ackerman, S. A., Menzel, W. P., Baum, B. A., Riédi, J. C. & Frey, R. A. 2003. The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, nº 2.459-473.
- ProVarzea/IBAMA 2007. Atlas da Várzea Amazonia Brasil. Attema Design Editorial. 136 p. Disponible en: <http://www.ibama.gov.br/provarzea> Acceso en: 9/11/2010.
- ProVárzea, 2007. O Setor Pesqueiro na Amazônia: Situação Atual e Tendências. Edições IBAMA. 120 p. Manaus, AM. Disponible en:[www.ibama.gov.br/provarzea](http://www.ibama.gov.br/provarzea) Acceso en: 7/11/2010.
- ProVarzea/IBAMA 2005. Diversidade Socioambiental nas Várzeas dos rios Amazonas e Solimões: Perspectivas para o desenvolvimento da sustentabilidade. Edições IBAMA. 420 p. Disponible en:[www.ibama.gov.br/provarzea](http://www.ibama.gov.br/provarzea) Acceso en: 6/11/2010.

- Putzer, H. 1984. The geological evolution of the Amazon basin and its mineral resources. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p.15-46.
- Putz, R. & Junk, W. J. 1997. Phytoplankton and Periphyton in: *The Central Amazon Floodplain Ecology of a Pulsing System*. Ecological Studies Vol. 126 W. J. Junk (Ed.). 207- 219 p.
- Rai, H. & Hill, G. 1984. Primary production in the Amazonian Aquatic Ecosystem. In: Sioli, H. *The Amazon: limnology and landscape ecology of mighty Tropical River and its basin*. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p. 311-335.
- Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge. 524 pp.
- Ribeiro, L. H. L., Brandimarte, A. L. & Kishi, R. T. 2005. Formation of the Salto Caxias Reservoir (PR) – an approach on the eutrophication process. *Acta Limnol. Bras.* 17(2): 155-165.
- Ronchail, J., Cochonneau, G., Molinier, M., Guyot, J. L., Gorette de Miranda Chaves, A., Guimarães, V. & De Oliveira, E. 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic oceans. *International Journal of Climatology*. 22:1663-1686.
- Rosot, N. C. 2001. Integração de imagens de sensores de microondas e ópticos para fins de mapeamento e classificação de reflorestamentos no sul do Brasil. Florianópolis, 2001. 190 p. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Rudorff, C. M., Novo, E. M. L. M., & Galvão, L. S. 2006. Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon floodplain Waters using EO-1 Hyperion. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2006, Denver, USA. Proceedings...IEEE International*.
- Salas, H. J. & Martino, P. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 2009 14:85-101. Doi: 10.1111/j.1440-1770.2009.00393.
- Salas, H. J & Martino, P. 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Wat. Res.* Vol. 25. N° 3 pp. 341-350.
- Salati, E. & Marques, J. 1984. Climatology of the Amazon region. In: Sioli, H. *The Amazon: limnology and landscape ecology of mighty Tropical River and its basin*. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p. 85-126.

- Sartório, C. E. T. 2011. Avaliação do grau de trofia e da qualidade da água de um braço do reservatório de Itaipu-Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pos-Graduação em Energia. Universidade Federal do ABC. Santo André, São Paulo.
- Sayuri, F., Watanabe, F. S. Y., Imai, N. N., Barbosa, C. C. F. & de Araujo, A. P. 2010. Avaliação do comportamento espectral da água: Estudo de caso do alto curso do rio Paraná (Presidente Epitácio – SP). III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife – PE, 27-30 de Julho de 2010. P 001 -008.
- Schalles, J. F., Gitelson, A. A., Yacobi, Y. Z. & Kroenke, A. E. 1998. Estimation of chlorophyll *a* from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake. *J. Phycol.* 34, p. 383-390.
- Schmidt, G. W. 1973. Primary production of phytoplankton in the three types of Amazonian Waters. II. The limnology of tropical flood-plain lake in Central Amazonia (Lago do Castanho). *Amazoniana*, Kiel, v. 4, nº 2, p. 139-203.
- Schöngart, J., Junk, W. J. 2007. Forecasting the flood-pulse in Central Amazonia by ENSO-indices. *Journal of Hydrology*, v. 335, p.124– 132.
- Schowengerdt, R. A. 2007. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3<sup>o</sup> edition. Academic Press. 515 p.
- Seeligmann, C. T., Mirande, V., Tracanna, B. C., Silva, C., Aulet, O., Cecilia, M. & Binsztein, N. 2008. Phytoplankton-linked viable non-culturable *Vibrio cholerae* O1 (VNC) from rivers in Tucumán, Argentina. *Journal of Plankton Research*. v. 30 n. 4, p. 367-377.
- Serrano M. L., Camacho, A., Pedrós, E. V. & Peña, R. 1997. Estudio por teledetección de la evolución del estado trófico de tres embalses del ámbito de la confederación hidrográfica del Júcar en el periodo estival de 1994 y 1995. *Limnetica* 13(1): 5-14.
- Sioli, H. 1975. Amazon tributaries and drainage basins. In: Hasler, A. D. Ed. *Couplings of land and water systems*, Springer-Verlag. New York.
- Sioli, H. 1984. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. *Monographiae Biologicae*. Junk, Dordrecht, p. 127-165.
- Strickland, J. D. & Parsons, T. R. 1972. In *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. 2<sup>nd</sup> edn. *Bulletin of Fisheries Research Board of Canada*, Canada; 167.

- Toledo, Jr., A.P. 1990. Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais. São Paulo, CETESB, 12 p. (Relatorio Interno).
- Tomasella, J. & Marengo, J. A. 2011. A seca de 2010 na Amazonia. OecoAmazoniaArtigos. Disponible: <http://oecoamazonia.com/br/artigos/9-artigos/128>.
- Tomasella, J., Borma, L. S., Marengo, J. A., Rodriguez, D. A., Cuartas, L. A., Nobre, C. A. & Prado, M. C. R. 2011. The droughts of 1996-1997 and 2004-2005 in Amazonia: hidrological response in the river main-stem. *Hidrological Processes*. 25, 1228-1242. DOI: 10.1002/hyp.7889.
- Thomaz, S. M., Bini, L. M. & Bozelli, R. L. 2007. Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. *Hydrobiologia* 579:1-13. DOI 10.1007/s10750-006-0285-y
- Tundisi, J. G. & Matsumura-Tundisi, T. 1992. Eutrophication of lakes and reservoirs: a comparative analysis, case studies, perspectives. In: Cordeiri-Marino, M., Azevedo, M. T. P., Sant`Anna, C. L., Tomita, N. Y. & Plastino, E. M. (eds,) *Algae and environment a general approach*. Sociedade Brasileira de Ficologia, São Paulo. 131p.
- Tremberth, K. E. 1997. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol.78, N°12. p. 2771-2777.
- TRIOS *optical* web site. Disponible en: [www.trios.de](http://www.trios.de) Acceso en: Octubre/2010.
- Tyler, A. N., Svab, E., Preston, T., Présing, M. & Kovács, W.A. 2006. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modeling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 27, nº 8, pp. 1521-1537.
- Uberkovich, G. 1984. Phytoplankton. In: Sioli, H. (ed) *The Amazon – Limnology and ladscape ecology of amighty tropical river and its basin*. *Monographiae Biologicae*. Junk, Dordrecht, p. 295-310.
- Ward, J. V. & Tockner, K. 2001. Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology. *Freshwater Biology*. 46, 807-819.
- Ward, J. V. & Stanford, J. A. 1995 a. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 10, 159-168.
- Wetzel, R. G. 1983. *Limnology*. 2<sup>nd</sup>ed. Philadelphia: Saunders College Publishing. 743p.
- Williams, D. D. 1987. *The Ecology of Temporary Waters*. London & Sydney, Croom Helm Timber Press.



