

**PRIMEROS ENSAYOS DE ZONIFICACION DE LAS HELADAS EN EL  
ALTIPLANO BOLIVIANO CON EL USO DE INFRARROJO TERMICO DEL  
SATELITE NOAA-AVHRR**

**Reunión regional sobre el uso y procesamiento digital de imágenes de satélites.  
9 - 11 de diciembre de 1992  
Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" - Bogotá**

**ALLIROL G., BOSSENO R. y VACHER J.J.  
ORSTOM - SENAMHI  
CP 9214 La Paz - Bolivia**

**RESUMEN**

Las heladas en el Altiplano boliviano tienen una influencia muy severa sobre la producción agrícola. Este estudio trata de desarrollar una metodología para efectuar una zonificación de las heladas utilizando el infrarrojo de NOAA-AVHRR. Esta metodología consiste en correlacionar temperaturas mínimas del aire de las estaciones meteorológicas y temperaturas de superficie nocturna de NOAA a las 2:00 a.m.. Se obtienen buenos resultados con esta correlación, sin embargo, es necesario afinarla introduciendo otros parámetros caracterizando la naturaleza de los píxeles NOAA (Situación topográfica NDVI). Se encontrará ilustrados en el texto una zonificación regional de la imagen del mes de marzo y un estudio de la repartición de las temperaturas mínimas en la zona de Viacha.

**ABSTRACT**

In the Bolivian Altiplano, frost constitutes a major handicap for the agriculture. A better knowledge of the frost characteristics is necessary in order to control its impact on crops. The goal of this study is to develop a methodology for the zonification of frost using NOAA-AVHRR thermal infrared data. This consists in correlating minimal temperatures of the air obtained from weather station with surface temperatures from 2 a.m. NOAA, this correlation gives good results but to obtain more accurate data it needs to be improved using parameters which characterize the nature of the pixel (Topographic information, NDVI, etc.). The zonification obtained with the NOAA data from March, as well as the study of the spatial distribution of temperatures for the Viacha region are illustrated in the text.

Fonds Documentaire IRD



010025914

Fonds Documentaire IRD

Cote: Bx25914 Ex: *uniquo*

## I. INTRODUCCION

El Altiplano boliviano constituye una amplia cuenca endorreica de 180.000 km<sup>2</sup>. Dos cordilleras (Oriental y Occidental), con elevaciones de más de 6.000 m, vienen rodeando la llanura en la cual se encuentran cadenas de serranías orientadas de Noreste a Sudoeste (sentido de las cordilleras). La altura de esta llanura varía de 4.100 m al Norte hasta 3.600 m al Sur (anexo 1).

El uso de la tierra en esta llanura está ligado a las precipitaciones: las producciones agrícolas del Norte donde cae un promedio de 700 mm de lluvia por año, se caracterizan por presentar cultivos de papa, quinua, habas, cebada cambiando progresivamente hacia el Sur, con 250 mm de lluvia por año, a pastizales y estepas de thola (arbusto) y paja brava (gramínea).

En el Altiplano, el riesgo de heladas es uno de los principales factores limitantes en la producción agrícola (Le Tacon et al., 1992). La zonificación de las heladas es indispensable para la optimización de las actividades agrícolas en esta región.

En general, independientemente de la calidad de la red meteorológica regional, algunos parámetros medidos (en particular las temperaturas) son representativos solamente de algunos metros cuadrados. La interpolación lleva a una representación esquemática del clima regional y a veces a una interpretación equivocada de éste (Guyot y Seguin, 1988).

En el caso del Altiplano, la red meteorológica es insuficiente y cuenta solamente con trece estaciones para una superficie de 100.000 km<sup>2</sup>, las cuales, además, están agrupadas en la parte Norte. Es entonces ilusorio querer efectuar una zonificación precisa de las heladas en base a esta red, sabiendo que la repartición de las temperaturas mínimas es muy heterogénea en el Altiplano (Le Tacon et al., 1992).

El uso del infrarojo térmico nocturno del NOAA, con una resolución al suelo de 1 km<sup>2</sup>, debería, al proporcionar datos que cubren todo el Alplano, permitir efectuar una zonificación precisa de las heladas (Antonioletti, 1988).

Este proyecto constituye una primera tentativa de zonificación de las heladas en el Altiplano, su objetivo es desarrollar una metodología simple adaptada a los datos y medios disponibles.

Este proyecto tuvo el apoyo económico y técnico de la Cooperación Regional Francesa (Oficina de Venezuela y Chile) y del Ministerio Francés de Asuntos Extranjeros.

## II. METODOLOGIA

### 2.1. Datos IRT del Satélite NOAA-AVHRR

Los datos IRT provienen del Centro de Estudios Espaciales de Santiago de Chile (CEE), el cual, en función de sus necesidades, es decir con respecto a las temperaturas de superficie del océano, efectúa los siguientes tratamientos:

- correcciones geométricas (proyección Mercator) de los canales IRT C<sub>4</sub> y C<sub>5</sub>;
- calibración de los canales IRT C<sub>4</sub> y C<sub>5</sub> produciendo las temperaturas radiativas T<sub>4</sub> y T<sub>5</sub> las cuales, según el método split-windows, dan temperaturas de brillancia o temperaturas de superficie TS.
- $TS = K_1 T_4 + K_2 T_5 (T_4 - T_5) + K_3$   
con K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> y K<sub>3</sub> coeficientes.

Esta combinación corrige los efectos atmosféricos (Hagolle, 1991)

Estas temperaturas de superficie TS, que provienen del CEE, deberían representar temperaturas de superficie del complejo suelo/planta para cada pixel de 1 Km<sup>2</sup>.

Para ajustar estas TS nocturnas al Altiplano, es necesario compararlas a los datos de la red meteorológica existente.

Los datos NOAA se recibieron en diskettes y fueron tratados con un programa básico desarrollado por la CEE que funciona sobre PC standard.

### 2.2. Datos Meteorológicos

De las trece estaciones meteorológicas ubicadas principalmente en la parte Norte del Altiplano, las estaciones de Copacabana, Huarina y Collana están instaladas en sitios no representativos del clima local. Patacamaya y Viacha están equipadas con estaciones automáticas.

Los parámetros meteorológicos más fiables de las estaciones son:

Temperaturas mínimas (T<sub>n</sub>), Temperaturas medias (T<sub>m</sub>), Temperaturas máximas (T<sub>x</sub>) tomadas a 1,50 m de la superficie del suelo y precipitaciones (P).

Los datos referentes a la humedad del aire y a los vientos no son muy fiables.

El presente estudio de las heladas fue basado en T<sub>n</sub>.

El indicio actinotérmico no ha sido considerado, dado que es raramente disponible en esta red y que además su interpretación es delicada debido a su gran variabilidad espacial (Seguin et al., 1981).

### 2.3. Relación entre la Temperatura de Superficie (TS) y Temperatura mínima (Tn)

Para los fines del trabajo ha sido necesario establecer una relación entre los datos, TS de NOAA de las 2:00 a.m. y los datos Tn del aire dados por las estaciones meteorológicas, los cuales tienen características diferentes (cuadro 1).

**Cuadro #° 1: Características de los datos**

	Estación	NOAA
Parámetros	Tn	TS
Hora	± 6 a.m.	± 2 a.m.
Representatividad espacial	± 10 m <sup>2</sup>	± 1 Km <sup>2</sup>

Para establecer esta relación, de la manera más precisa, se necesitarían otros parámetros meteorológicos, así como parámetros físicos para caracterizar el pixel (complejo suelo/planta y su estado hídrico; relieve; alturas y orientación de pendientes) (Guillot, 1981).

Los únicos parámetros fiables disponibles para este estudio han sido la Tn, las coordenadas geográficas de las estaciones y sus alturas, y el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para el uso de la tierra (Bariou et al., 1985).

### 2.4. Zonificación de las Heladas

La relación entre TS y Tn permite transformar los datos NOAA - TS en Tn y obtener de esta manera mapas de Tn con la información NOAA. Luego se definen las temperaturas mínimas límites según la sensibilidad de los principales cultivos andinos a las heladas. Estas temperaturas mínimas límites permiten una clasificación por intensidad de las zonas de heladas.

## III. RESULTADOS

### 3.1. Correlaciones efectuadas

Hemos utilizado una relación de la forma  $TS = A + Tn + B$  (Guyot y Seguin, 1988). Los datos NOAA de la noche y de la mañana no han dado resultados y han sido descartados

(cuadro # 2). La correlación entre las cuatro imágenes de la mañana demuestra la gran variabilidad de los datos (las rectas de regresión variando en función de la hora de toma) (Figura # 1). Estos datos han sido tomados después del amanecer, lo que explica esta heterogeneidad debido a la inclinación del sol y a la topografía.

La correlación entre las siete imágenes nocturnas  $TS = 0.60 T_n - 0.49$  es aceptable con un coeficiente de correlación  $R = 0.81$ , un error estándar igual a 1.804 sobre TS y un error estándar igual a 0.052 sobre B (Figura # 2)

**Cuadro # 2: Relación entre Tn (Estación) y TS (NOAA)**

Con A y B tal que  $TS = A * T_n + B$

Regresión	A	B	R	Nº Obs.
noche + mañana	+ 0.48	- 0.48	0.53	113
noche (1h - 3h)	+ 0.60	- 0.49	0.81	70
mañana 6h26	+ 0.59	- 3.03	0.73	11
mañana 6h39	+ 0.47	- 2.59	0.84	10
mañana 7h20	+ 1.50	+ 0.36	0.58	11
mañana 8h02	+ 0.28	+ 6.81	0.62	11

Esta relación ha sido mejorada tomando cada estación independientemente; los resultados son una serie de regresiones lineales  $TS = A * T_n + B$  en las cuales A y B representan factores descritos en los siguientes párrafos (Cuadro # 3).

**Cuadro # 3: Relación entre Tn (Estación) y TS (NOAA)**

Con A y B tal que  $TS = A * T_n + B$

ESTACION	A	B	R	Nº Obs.
Ayo-Ayo	0.71	+ 1.04	0.88	8
Calacoto	0.59	- 0.60	0.81	9
Charaña	0.57	- 3.14	0.96	8
Collana	0.86	- 0.88	0.79	8
Comanche	0.25	- 3.21	0.66	7
Copacabana	0.31	- 1.22	0.67	7
El Belén	0.44	+ 0.09	0.85	7
Huarina	1.25	+ 2.26	0.91	10
Oruro	0.61	- 0.38	0.92	8
Patacamaya	0.76	- 0.24	0.83	8
Viacha	0.78	+ 1.25	0.75	9

Figura # 1: Relación entre Tn (Estación) y TS (NOAA)

Regresión de la mañana

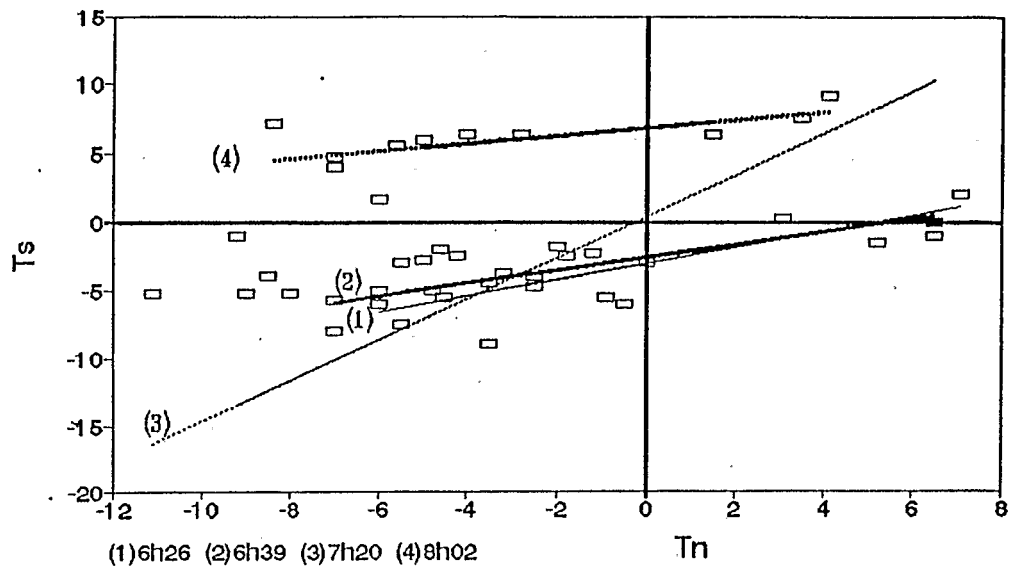
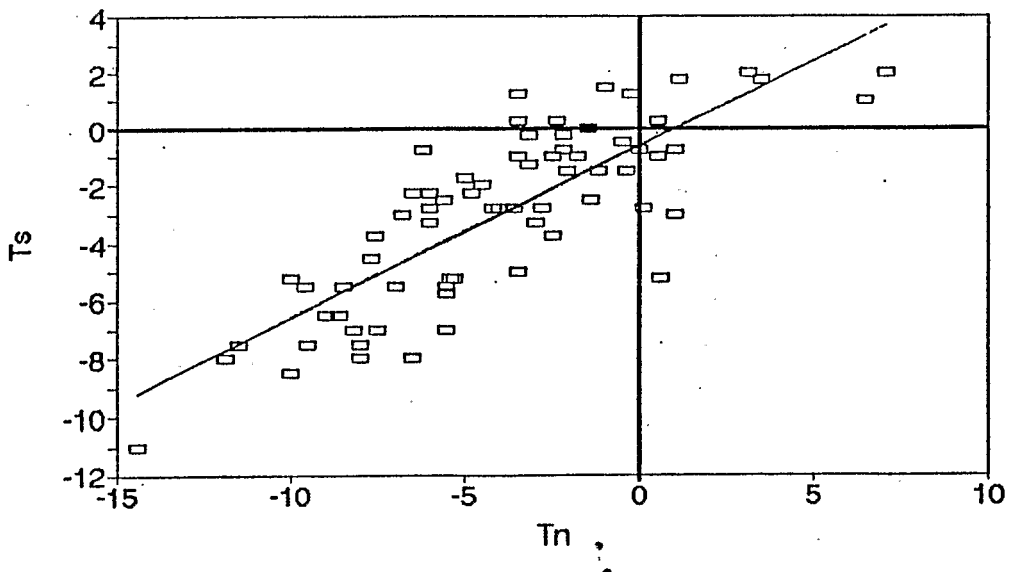


Figura # 2: Relación entre Tn (Estación) y TS (NOAA)

Regresión de la noche



La variable A parece bien correlacionada con el NDVI, que está correlacionado con la longitud y latitud de cada estación (cuadro # 4). Esto se debe a los cambios progresivos observados de Norte a Sur en el uso de la tierra. La variable B es difícilmente correlacionable, pero parece tener una relación con la altura media del pixel.

**Cuadro # 4: Relación entre A y el NDVI, la latitud y la longitud con a y b tal que  $A = a x + b$**

	a	b	R
NDVI	2,72	0,39	0,94
Latitud	-0,35	7,54	0,92
Longitud	0,70	-47,88	0,95

Ha sido posible evidenciar una relación directa entre A y las coordenadas geográficas de cada estación, así como entre A y NDVI.

$$A = 0,18 * Lat + 0,35 * Long - 20,25$$

$$A = 2,72 * NDVI + 0,39$$

Sin embargo, esta correlación tiene sus límites. El NDVI utilizado corresponde a una sola época del año (febrero - marzo), durante la cual la biomasa es máxima. Además, este NDVI abarca la parte Noroeste del Altiplano, lo que es también el caso de las trece estaciones meteorológicas utilizadas. Estas correlaciones, que funcionan bien en la parte Norte del Altiplano, tienen sus límites en el resto de la región.

### 3.2. Zonificación

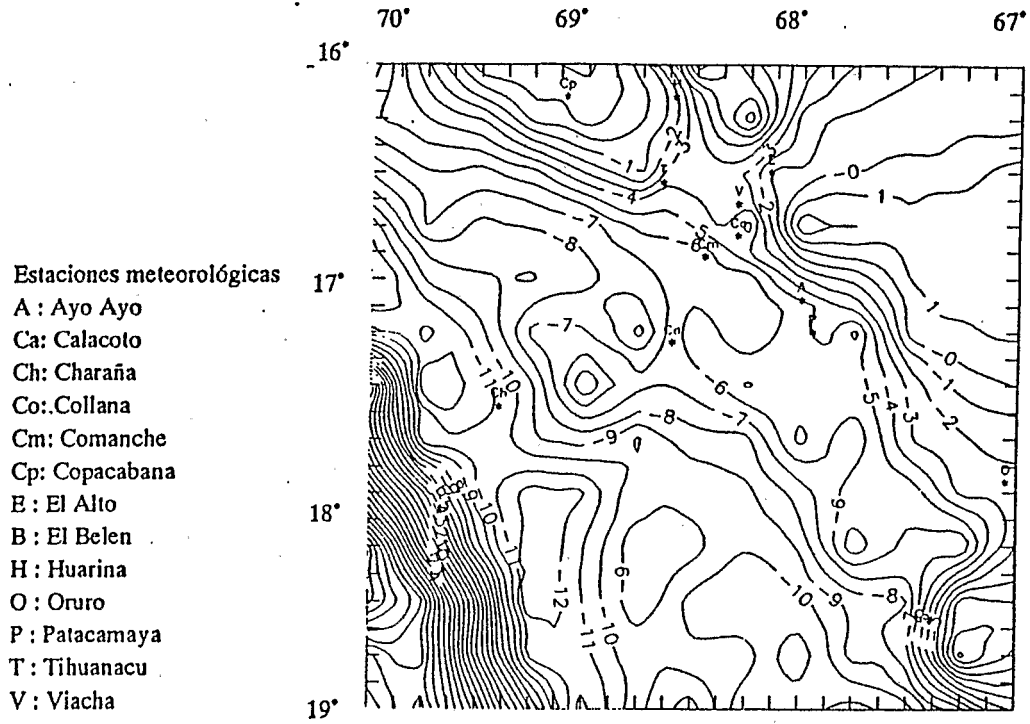
#### 3.2.1. Zonificación general

Una zonificación ha sido efectuada en base a un promedio de las siete imágenes nocturnas NOAA (Figura # 3.). Se ha utilizado la regresión de noche (Cuadro # 2); sin la introducción de datos la latitud y la longitud demuestran una mejor precisión en la zona del Altiplano general.

En esta zonificación se observa un gradiente dominante Noreste/Sudoeste (influencia del aire frío de la cordillera occidental), el cual ya había sido detectado con el análisis de datos meteorológicos de las estaciones (Vacher et al. 1991). La presente zonificación permite discriminar las zonas frías del Altiplano.

Figura # 3: Zonificación de las temperaturas mínimas en el Altiplano derivadas de las 7 imágenes nocturnas

NOAA.





### 3.2.2. Zonificación según la sensibilidad de los cultivos a las heladas

En el Altiplano, los principales cultivos son la papa dulce, papa amarga y quinua; una escala de temperaturas ha sido determinada en función de la sensibilidad de estos cultivos a las heladas (Le Tacon et al., 1992) (Cuadro # 5).

**Cuadro # 5: Sensibilidad de tres cultivos del Altiplano a las heladas**

Tn	+2	0	-2	-4	-5
Papa dulce	----->				
Papa amarga	----->				
Quinua	----->				

La zonificación, en función de la sensibilidad de los cultivos a las heladas, ha sido aplicada a la sola imagen nocturna NOAA del 13 de marzo de 1987, correspondiente al período vegetativo con lluvias y nubes, lo que explica la dificultad de obtención de datos en esta época. Con esta zonificación se pueden notar (Anexo # 2) las grandes estructuras de esta región; el Lago Titicaca, los valles subtropicales cálidos bordeando el Altiplano al Norte y al Este, y la cordillera oriental muy fría. Al Sudoeste del lago las temperaturas presentan un gradiente frío hacia la cordillera occidental. Los riesgos de helada son insignificantes en los alrededores del lago y bajos en las zonas que se prolongan hacia el Sudeste, como lo indica la zonificación general (Figura # 3).

En la zona de Copacabana se puede notar la presencia de nubes (no confundir con temperaturas de superficie frías). Esta zonificación considera únicamente una fecha y por lo tanto no es representativa de todo el período de cultivo. Sin embargo, este primer resultado permite apreciar la precisión espacial obtenida.

### 3.3. Análisis de la repartición espacial de Tn en la zona de Viacha

Un mapa de las temperaturas mínimas del aire (Tn) ha sido elaborado a escala 1:250.000 para la zona Sur de Viacha. Este mapa permite analizar los fenómenos térmicos del Altiplano (Anexo # 3).

Dos cortes perpendiculares a las estructuras de relieve ilustran la distribución de las temperaturas en relación a la ubicación topográfica. Las alturas y Tn son comparadas pixel por pixel (Figuras # 4 y 5).

Se puede notar que los relieves en el Altiplano son fríos arriba de 4.200 m; las laderas de las serranías más bajas son más cálidas que las llanuras que se prolongan a sus pies. Comparando esta vez el mapa de Tn con el mapa topográfico de esta región (Anexo # 3), se puede apreciar la extensión espacial de estos fenómenos:

Las zonas frías del oeste corresponden a los relieves más importantes.

Al Oeste de Viacha, a lo largo de las serranías que dominan las llanuras en las cuales se acumula el aire frío, se puede examinar una franja de aire cálido formado por fenómenos de inversión térmica.

El aire frío se acumula en las llanuras debido a una ligera pendiente Sudoeste de 1% que se manifiesta en el Altiplano.

Estas observaciones concuerdan con las estrategias de los agricultores, los cuales localizan sus parcelas en diferentes ubicaciones topográficas para disminuir el impacto de las heladas.

El uso de las laderas de suelos pobres pero menos expuestos a las heladas para cultivos sensibles al frío, y el uso en las llanuras de suelos más fértiles pero más expuestos a las heladas para cultivos resistentes (Brasier De Thuy y G. Guirlet, 1988).

Al Noreste de Viacha aparece un fenómeno particular: el desborde de masas de aire cálido provenientes de los valles subtropicales (Yungas) al límite de La Paz.

#### **IV. CONCLUSIONES**

Es necesario recalcar que este estudio es preliminar, sin embargo, ha permitido demostrar la posibilidad del uso del IRT de NOAA para la zonificación de las heladas en el caso del Altiplano boliviano.

La metodología empleada es sencilla y requiere poco material, podría ser mejorada para obtener resultados más precisos. Con la información T4 y T5, derivada de los canales (y no la información TS), se puede establecer una relación split - windows adaptada a las condiciones atmosféricas del Altiplano, tomando como referencia las temperaturas de las aguas del lago

Figura # 4: Distribución de Tn en relación al relieve (Corte Sur)

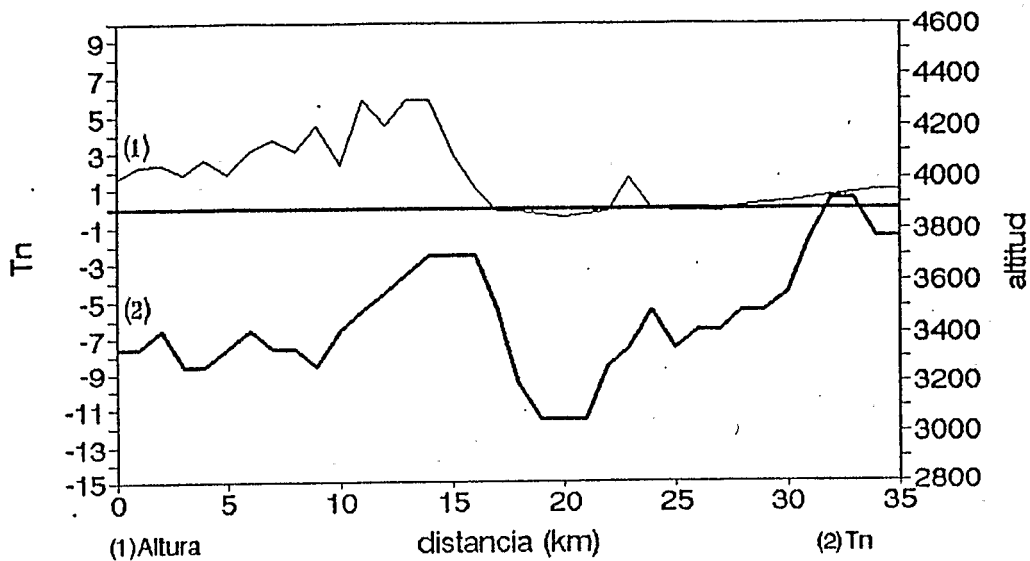
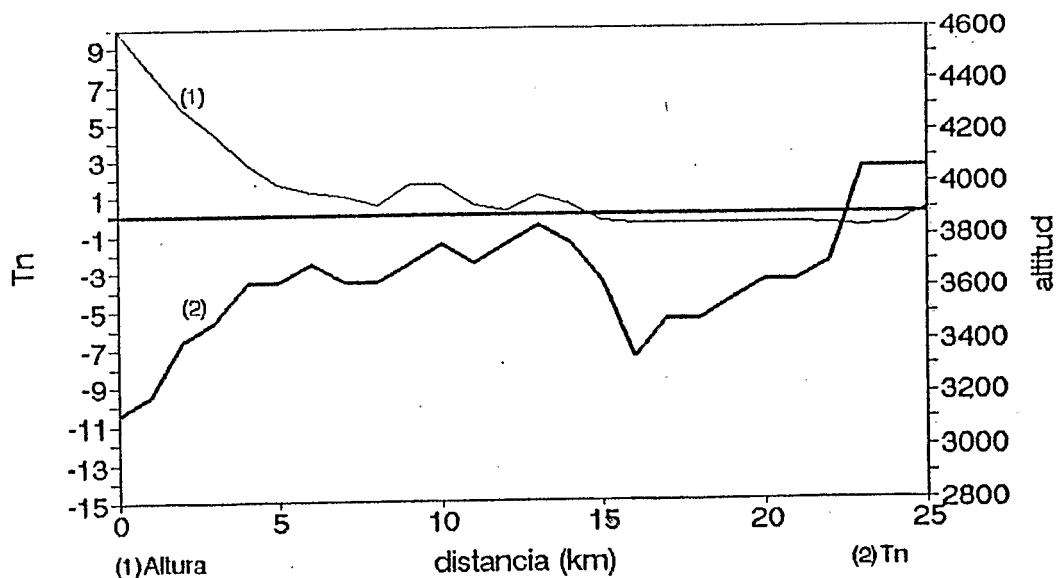


Figura # 5: Distribución de Tn en relación al relieve (Corte Norte)



Titicaca. Se considera además el efecto del ángulo de vista del pixel, efecto que no es despreciable sobre todo para los relieves.

En la etapa siguiente, se trata de mejorar la relación  $T_n/TS$  con la adquisición de otras imágenes nocturnas, específicamente imágenes de período vegetativo. En este estudio, se utilizaron siete imágenes nocturnas NOAA, una de verano (marzo) y seis de invierno.

Esta relación  $T_n/TS$  depende, sin embargo, de otros parámetros que caracterizan el pixel, que deberán ser considerados en el futuro. Estos parámetros son los siguientes:

- NDVI: La fuerte influencia del NDVI debería ser aprovechada con el uso de un mayor número de imágenes de diferentes fechas del año para seguir su evolución.

- Temperatura máxima ( $T_x$ ):

La diferencia entre  $T_x$  y  $T_n$  está considerada en numerosos modelos que caracterizan la inercia térmica del complejo suelo/planta (Casselles, 1983). Su uso podría permitir un mejor control de los problemas relacionado al intervalo entre el paso del satélite ( $TS$  a las 2:00 a.m.) y la hora de obtención de  $T_n$  en las estaciones ( $T_n$  a las 6:00 a.m.)

- Velocidad del viento:

Tomando en cuenta que la velocidad del viento interviene en la diferencia entre  $T_s$  y  $T_n$ , es necesario considerar este parámetro en la medida posible.

Estas sugerencias serán tomadas en cuenta en los nuevos estudios que se están realizando con un mayor número de imágenes NOAA y un programa (Software AGIS) de mayor potencialidad.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

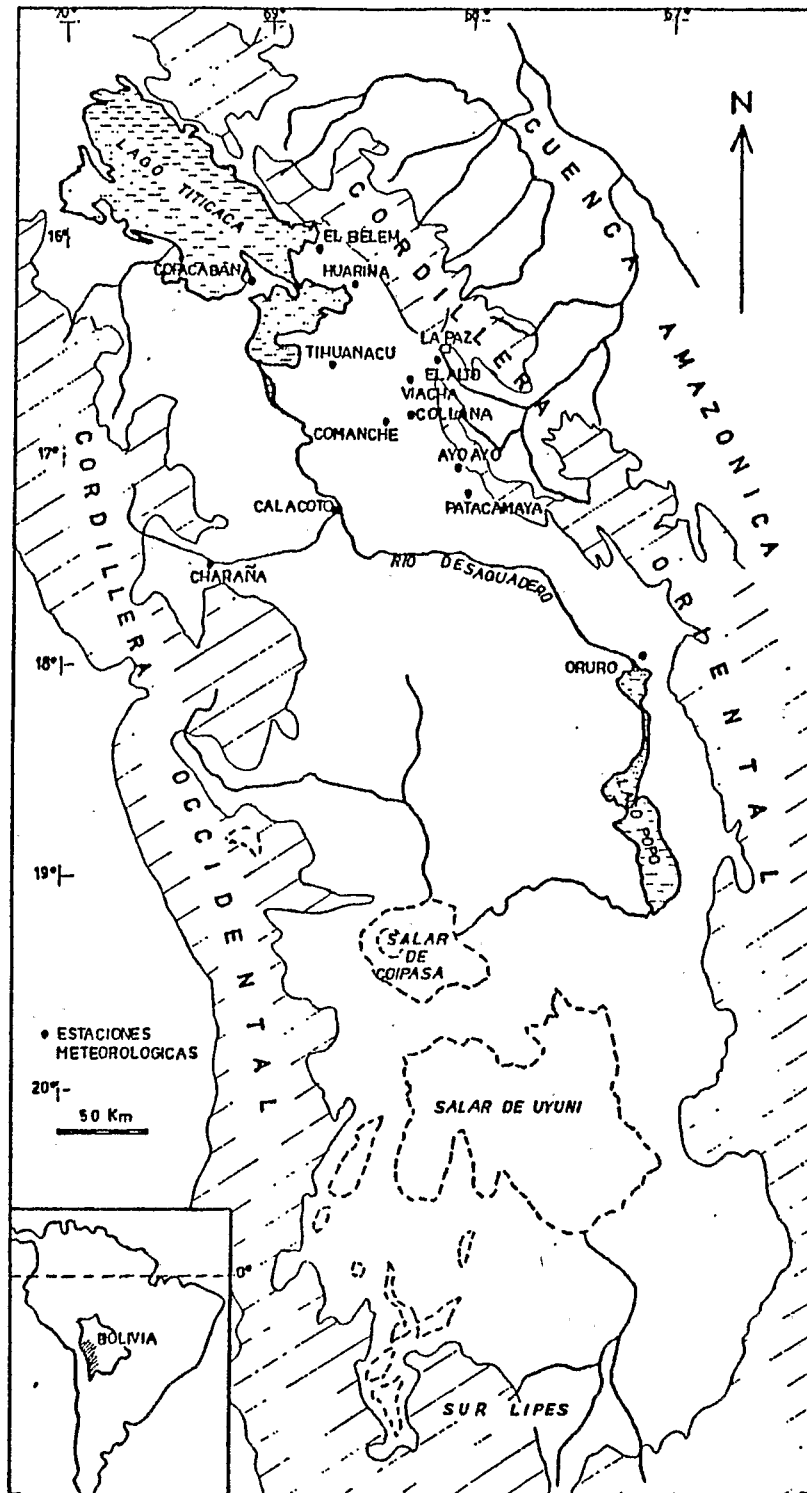
**Antonioletti R.**, 1988. Délimitation des zones de gel à l'aide de thermographies infrarouges satellitaires. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 1, 41-46.

**Bariou R., Lecamus D. y Le Henaff F.**, 1985. Dossiers de Télédétection. Indices de végétation. CRT Rennes 2, juin 1985, 121 + 29 p.

**Brasier de Thuy E. y Guirlet C.**, 1988. Stratégies paysannes face au risque climatique, ORSTOM, Agroclimatología del Altiplano Boliviano, 9,60 p.

**Caselles V., Gandia V. y Melia J.**, 1983. Application des mesures de l'infrarouge thermique à la prévision des gelées sur les agrumes. In Colloque International sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux (France), 12-16 sept. 1983, 6 p.

- Guillot B.**, 1981. Les satellites de l'environnement. Description sommaire de la série TIROS - N/NOAA-A.1. ORSTOM, Initiations-Documentations techniques 50-58 p.
- Guyot G. y Seguin B.**, 1988. Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. *Agronomie*, 1988, 8 (1), 1-13.
- Hagolle O.**, 1991. Chaîne de traitement CNES des images AVHRR-NOAA. Campagnes 1988 - 1989. Manuel de l'utilisateur. CNES note 91.006, 22 p.
- Le Tacon P., Vacher J.J., Eldin M. e Imaña E.**, 1992. Los riesgos de Helada en el Altiplano Boliviano, VII Congreso sobre los cultivos andinos. 287-292, La Paz, - Bolivia.
- Seguin B., Baeltz B., Favard J.C., Mandeville J.C. y Monget J.M.**, 1981. Signification de la thermographie I.R. par satellite en agroclimatologie dans le Sud-Est de la France. In Colloque International sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon (France), 8-11 sept. 1981, 467-476.
- Vacher J.J., Liberman M. y Brasier de Thuy E.**, 1991. Influencia del Lago Titicaca en la agricultura litoral. In *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*. ORSTOM-HISBOL, 517-530.



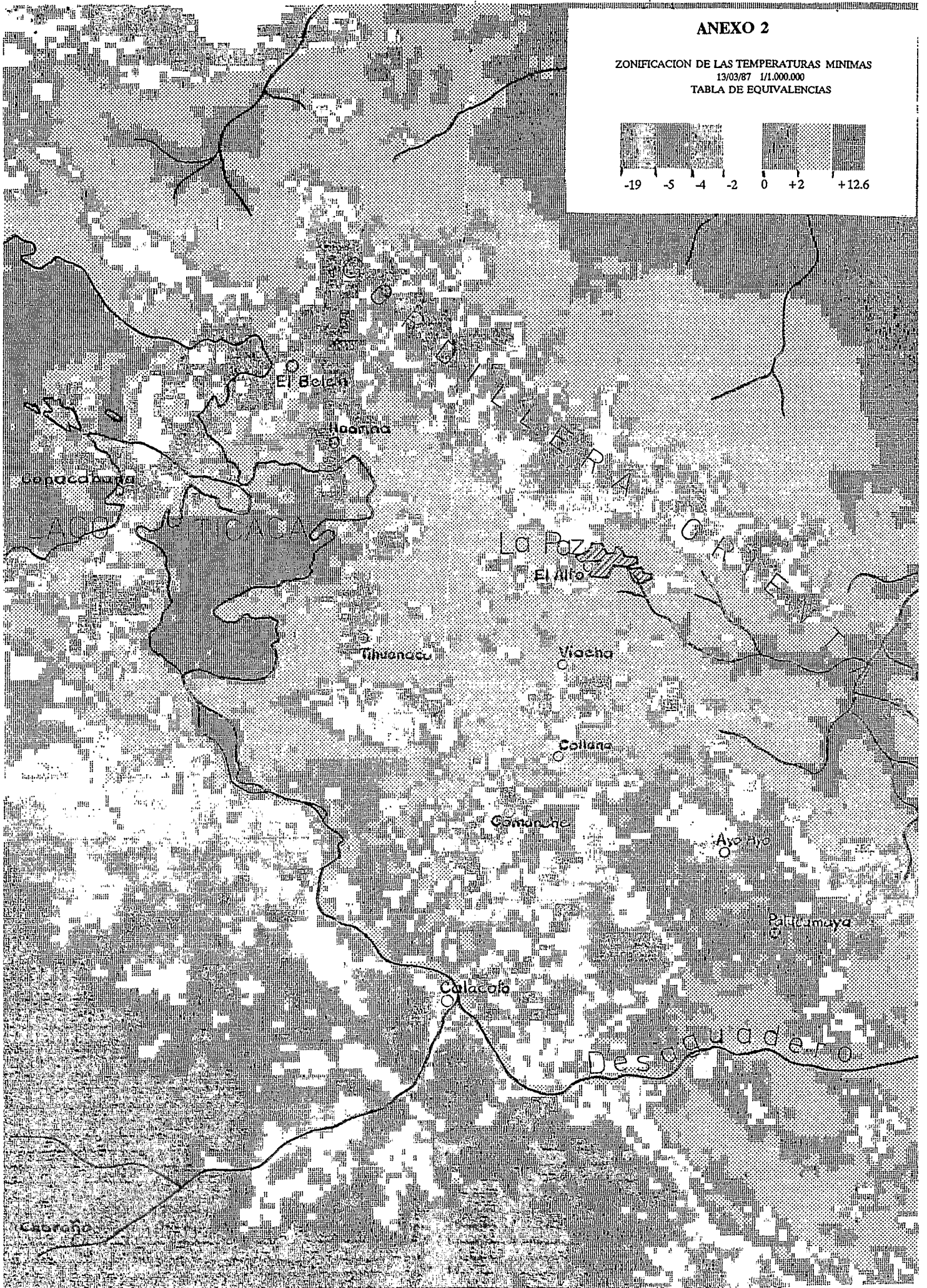
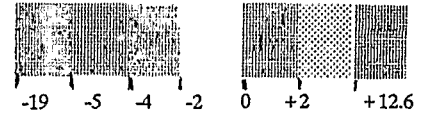
Anexo 1: Mapa de las estaciones meteorológicas estudiadas en el Altiplano boliviano.

ANEXO 2

ZONIFICACION DE LAS TEMPERATURAS MINIMAS

13/03/87 1/1.000.000

TABLA DE EQUIVALENCIAS





# ZONIFICACION DE LAS TEMPERATURAS MINIMAS DE LA ZONA DE VIACHA

22/07/89 1/250.000

## ANEXO 3

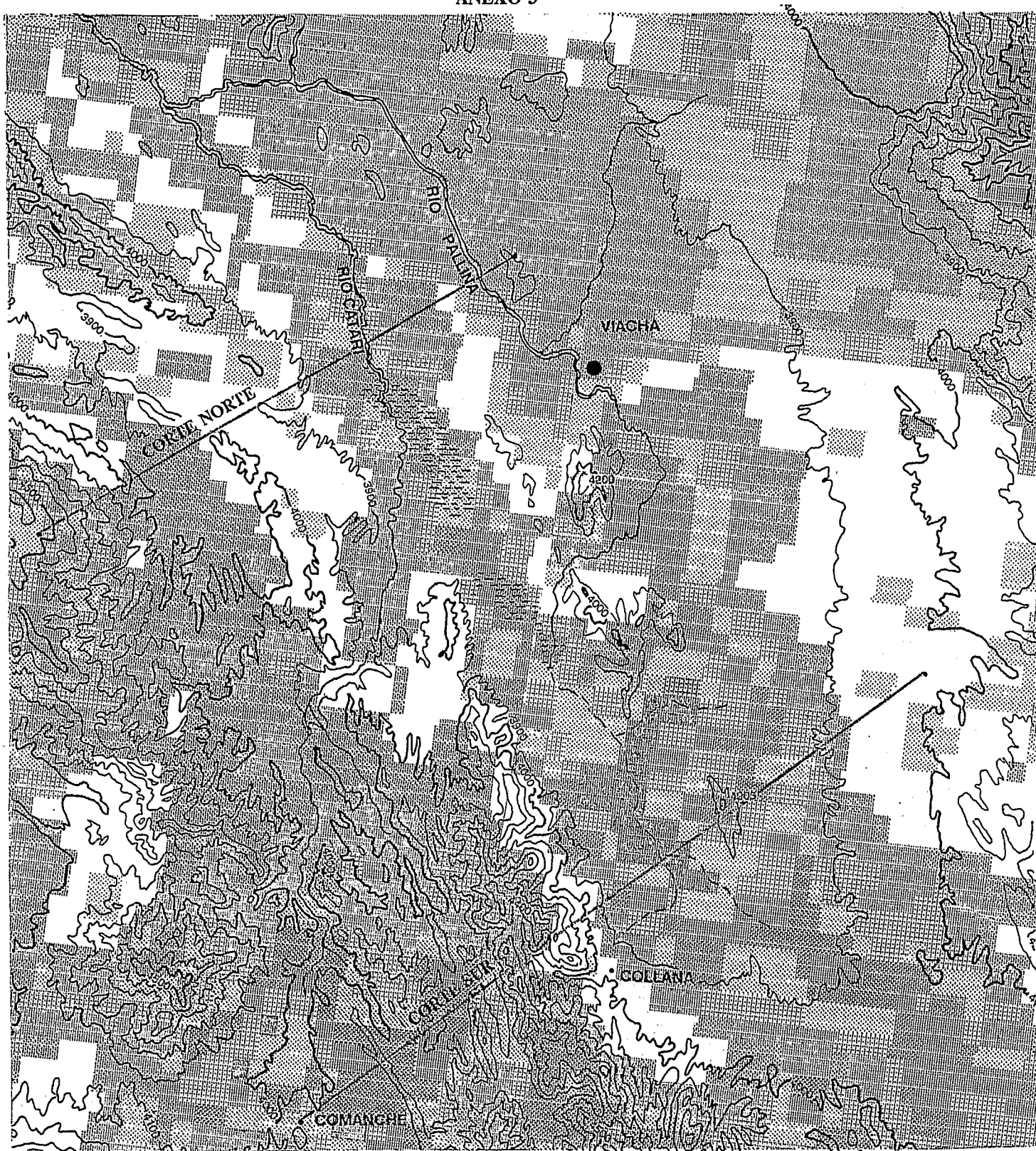
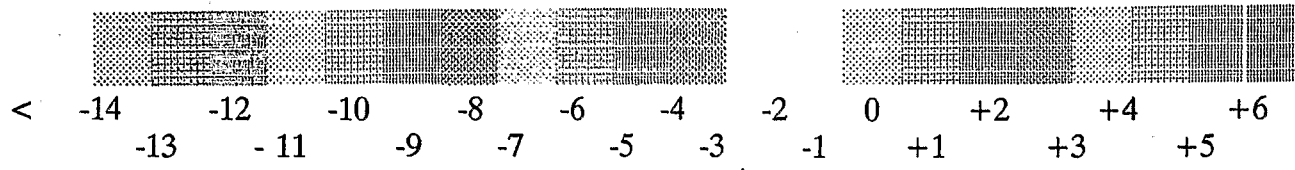


Tabla de equivalencias:



1 Pixel = 1x1 km



# ANALYSE DES RISQUES DE GELEE SUR L'ALTIPLANO BOLIVIEN

## III - Premiers essais de zonage des gelées sur l'Altiplano bolivien, à l'aide de l'infrarouge thermique du satellite NOAA-AVHRR

ALLIROL G., BOSSENO R. et VACHER J.J.

Dans cette étude sont abordées les possibilités de zonage des gelées qui, sur l'Altiplano, sont un handicap majeur pour l'agriculture. A partir de 7 images de nuit de l'I.R. thermique NOAA-AVHRR, on effectue une corrélation générale entre  $T_n$  (température minimale de l'air), et  $T_s$  (température de surface NOAA à 2 h du matin). Si cette corrélation donne un bon résultat sur l'ensemble de l'Altiplano, il est nécessaire de l'affiner à l'aide d'autres images et des données d'autres stations météorologiques. Les essais réalisés par l'introduction d'autres paramètres montrent que les données utilisées sont trop limitées au Nord de l'Altiplano. En illustration, un zonage à partir de l'image du mois de mars a été réalisé, ainsi qu'une étude de la répartition des températures sur une région représentative, Viacha.

### 1. INTRODUCTION

Le risque de gelée est un des principaux facteurs limitants de la production agricole sur l'Altiplano bolivien (1).

Une localisation précise des zones gélives devrait permettre d'orienter la recherche pour le développement agricole de cette région.

Le réseau météorologique est insuffisant ; il comprend 13 stations ayant un registre suffisant de données pour une surface de 100 000 km<sup>2</sup>. De plus, ces stations sont regroupées principalement dans le nord de l'Altiplano.

En général, quelle que soit la qualité du réseau météorologique régional, et compte tenu des hétérogénéités locales très importantes sur l'Altiplano, la plupart des paramètres mesurés par une station sont représentatifs de quelques dizaines de m<sup>2</sup>, et ne peuvent rendre compte qu'imparfaitement du climat local (2).

L'utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'I.R. thermique devrait permettre, avec une résolution au sol de 1 km<sup>2</sup>, de réaliser un zonage des gelées suffisamment précis (3).

Cette étude est un premier essai de classification des zones gélives de l'Altiplano à partir de la télédétection.

### 2. METHODOLOGIE

#### 2.1. Les données NOAA-AVHRR

Les canaux I.R. thermiques C4 et C5 fournissent après étalonnage des températures radiatives  $T_4$  et  $T_5$ . Une combinaison linéaire de ces deux températures selon la formule de Split-Windows donne la température de brillance. Cette formule corrige les effets atmosphériques, mais elle a été calée sur l'océan et n'est pas forcément adaptée à l'Altiplano. (4).

$$T_s = a_0 + a_4.T_4 + a_5.T_5$$

( $a_0 = -2.2$  ;  $a_4 = +3.6$  ;  $a_5 = -2.6$ )

Toutes ces corrections sont réalisées par le Centre d'Etudes Spatiales de Santiago du Chili (CEE).

Cette température de brillance est assimilée à la température de surface du complexe sol-plantes correspondant à la résolution du satellite, soit 1 km<sup>2</sup> environ.

2.2. Les stations météorologiques donnent la température de l'air à 1.50 m. On utilise  $T_n$ , la température minima. L'indice actinothermique n'est pas pris en compte, car il n'est que rarement disponible sur le réseau; d'autre part, il est délicat à interpréter du fait de sa grande variabilité spatiale (5).

Fonds Documentaire IRD

Cote : Bx 25914 Ex : *unite*

Tabl. 1 : caractéristiques des données

	station	NOAA
paramètre heure représentativité spatiale	Tn # 6h  qq 10m <sup>2</sup>	Ts # 2h  # 1km <sup>2</sup>

Il s'agit donc d'établir une relation entre Ts à 2 h du matin, et Tn ; leurs caractéristiques sont reportées dans le tableau 1.

### 2.3. Relation Ts = f (Tn)

Cette relation dépend : des autres paramètres météorologiques, du complexe sol/plantes et de son état hydrique, du relief (altitude, orientation des pentes) (6).

Dans cet essai, seuls sont pris en compte Tn, la latitude et la longitude des stations, le relief, et l'occupation du sol, en utilisant le N.D.V.I. (Normalised Difference Vegetation Index) (7).

### 2.4. Zonage des zones gélives

A partir de cette relation, il est possible de traduire les données NOAA (Ts) en température minima de l'air (Tn). On aboutit ainsi à une carte des Tn à partir de NOAA.

On détermine ensuite une gamme de températures minima choisies en fonction de la sensibilité au gel des principales plantes cultivées sur l'Altiplano.

Cette gamme de Tn permet une classification des zones gélives en fonction de leur intensité.

## 3. TRAVAUX REALISES

### 3.1. Description du milieu

L'Altiplano est un vaste bassin endoréique de 180000 km<sup>2</sup>. Deux cordillères (orientale et occidentale), qui culminent à plus de 6 000 m, encadrent une plaine d'où émergent des chaînes de collines orientées dans le sens des cordillères. Cette plaine a une altitude comprise entre 3 900 m au nord, et 3 600 m au sud.

L'occupation des sols de l'Altiplano présente un gradient Nord-Sud en liaison avec la pluviométrie (entre 800 mm par an au nord, et 250 mm par an au sud). Les paysages agraires du nord (pomme de

terre, quinoa, fève, orge, jachère) font progressivement place aux pâturages puis aux steppes du sud (thola, paja brava).

### 3.2. Données disponibles

Les données des satellites NOAA-AVHRR n° F, G, H sont reçues au CEE (Centro de Estudios Espaciales) de Santiago qui effectue les corrections de navigation, géométriques, atmosphériques et d'incidences solaires (4).

Dans l'infrarouge thermique, nous disposons de 7 images de nuit, et de 4 images du matin pour la zone entière.

Dans le visible, nous disposons de 2 N.D.V.I. d'après midi, uniquement pour le quart N.W. de l'Altiplano.

Tabl. 2 : images disponibles

date	paramètre zone		heure
13/03/87	Ts	entière	3:12
22/07/89	Ts	entière	2:28
24/07/89	Ts	entière	2:07
14/09/89	Ts	entière	1:30
31/08/91	Ts	entière	2:37
01/09/91	Ts	entière	2:24
13/09/91	Ts	entière	3:28
27/03/90	Ts	entière	6:39
31/08/91	Ts	entière	6:26
01/09/91	Ts	entière	7:20
13/09/91	Ts	entière	8:02
10/02/90	N.D.V.I.	1/4 N.W.	14:39
27/03/90	N.D.V.I.	1/4 N.W.	14:58

Les treize stations météorologiques sont localisées essentiellement dans la partie nord. Signalons que trois stations (Copacabana, Huarina, et Collana) sont installées sur des sites non représentatifs du climat local. Deux sites, Patacamaya et Viacha, sont équipées de stations météorologiques automatiques.

Les paramètres fiables communs à ces stations sont Tn, Tm, Tx, P ; par contre, les données concernant l'humidité de l'air et le vent nécessiteraient un contrôle de fiabilité avant d'être utilisées.

### 3.3. Corrélations réalisées

La corrélation entre  $T_n$  et  $T_s$  sur les 7 images de nuit et les quatre images du matin est très faible (tableau 3) et n'a pas été retenue.

Les quatre images du matin ont été regroupées, les corrélations montrent que la droite de régression varie rapidement en fonction de l'heure de la prise de vue (fig. 1). Ces données correspondent à des prises de vue après le lever du soleil, d'où une

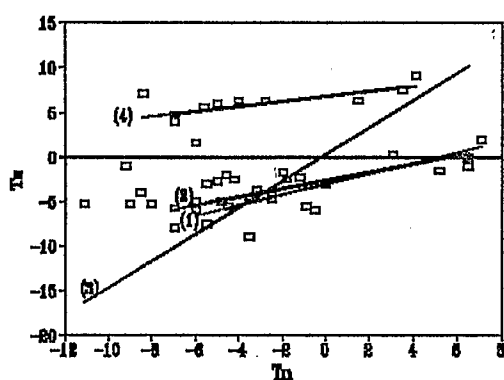
grande hétérogénéité liée à l'inclinaison du soleil et à la topographie.

La corrélation des 7 images de nuit seules, est acceptable, puisqu'on obtient un  $R^2$  de 0.66, et que la précision de la transformation de  $T_n$  en  $T_s$  est de plus ou moins  $2^\circ$  (fig. 2).

On peut affiner cette corrélation en prenant chaque station à part ; on aboutit à une série de régressions linéaires  $T_s = a * T_n + b$ , où les variables  $a$  et  $b$  sont à expliquer.

Fig. 1 : Relation entre température minima de l'air (station) et température de surface (NOAA).

Régressions du matin



(1) 6:26

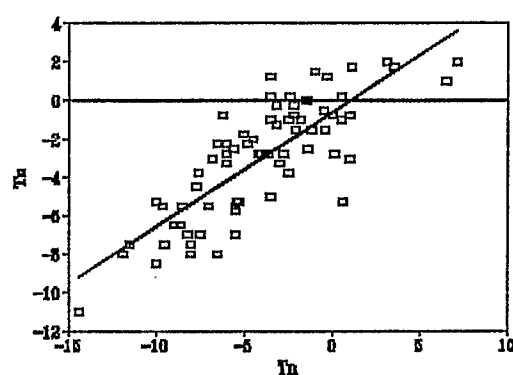
(2) 6:39

(3) 7:20

(4) 8:02

Fig. 2 : Relation entre température minima de l'air (station) et température de surface (NOAA)

Régression de nuit



Tabl. 3 : Relation entre température minima de l'air (station) et température de surface (NOAA)  
Régressions en fonction des différentes heures des images NOAA

Type de régression	A	B	$R^2$	Nb d'observations
nuit + matin	+0.48	-0.48	0.28	113
nuit (1h à 3h)	+0.60	-0.59	0.66	70
matin 6h26	+0.59	-3.03	0.54	11
matin 6h39	+0.47	-2.59	0.71	10
matin 7h20	+1.50	+0.36	0.34	11
matin 8h02	+0.28	+6.81	0.39	11

avec A et B tels que  $T_s = A * T_n + B$

Tabl. 4 : Relation entre température minima de l'air (station) et température de surface (NOAA)  
Régressions des différentes stations

station	a	b	R <sup>2</sup>	nombre d'observations
Ayo Ayo	0.71	+1.04	0.79	8
Calacoto	0.59	-0.60	0.66	9
Charaña	0.57	-3.14	0.92	8
Collana	0.86	-0.88	0.62	8
Comanche	0.25	-3.21	0.43	7
Copacabana	0.31	-1.22	0.45	7
El Belen	0.44	+0.09	0.72	7
Huarina	1.25	+2.26	0.83	10
Oruro	0.61	-0.38	0.84	8
Patacamaya	0.76	-0.24	0.69	8
Viacha	0.78	+1.25	0.56	9

avec a et b tels que  $T_s = a \cdot T_n + b$

b est difficilement corrélable, mais semble lié à l'altitude.

a semble bien corrélé avec le N.D.V.I., qui lui-même est bien corrélé avec la latitude et la longitude, ce qui est normal compte tenu du gradient nord-sud observé dans l'occupation des sols ; il existe aussi un gradient E-W, les plaines proches de la Cordillère Occidentale étant plus froides.

Tabl. 5 : Corrélations entre a, I.V. et coordonnées géographiques

y	x	Á	B	R <sup>2</sup>
a	I.V.	+2.72	+0.39	0.89
a	latitude	-0.44	+8.34	0.80
I.V.	latitude	-0.13	+2.45	0.85
I.V.	longitude	+0.26	-17.61	0.92

avec Á et B tels que  $y = \hat{A} \cdot x + B$

Il a donc été possible de mettre en évidence une relation directe entre a et les coordonnées géographiques des stations:

$$a = -0.18 \cdot \text{lat.} + 0.35 \cdot \text{long.} - 20.25$$

Cependant, cette corrélation a ses limites. Le N.D.V.I. utilisé correspond à une seule période (février-mars), où la biomasse est maximum. De plus, il ne représente que la partie N-W de l'Altiplano, tout comme les treize stations météorologiques utilisées.

Si cette corrélation ne pose pas de problèmes dans la partie N-W, par contre, elle provoque de nombreuses anomalies au sud et à l'est.

### 3.4. Zonage

#### 3.4.1. Zonage général

Le zonage a donc été réalisé à partir de la régression de nuit appliquée à la moyenne des 7 images, qui, si elle présente le même inconvénient d'avoir été calculée avec les seules stations du N-W, ne provoque pas d'anomalie majeure au sud et à l'est. On observe un gradient NE-SW dominant qui avait déjà été suggéré par l'analyse des données météorologiques des stations. On observe un autre gradient plus faible orienté suivant l'axe de l'Altiplano NW-SE (8). Ce zonage permet de discriminer les "zones froides" (fig.3).

#### 3.4.2. Zonage en fonction de la sensibilité des cultures au gel

Les cultures de bases sur l'Altiplano sont la pomme de terre douce, la pomme de terre amère et la quinoa. Les gammes de température ont donc été choisies en fonction de la sensibilité au gel de ces trois cultures (1).

Tn	+2	0	-2	-4	-5
Pomme de terre douce	—————>				
Pomme de terre amère	—————>				
Quinoa	—————>				

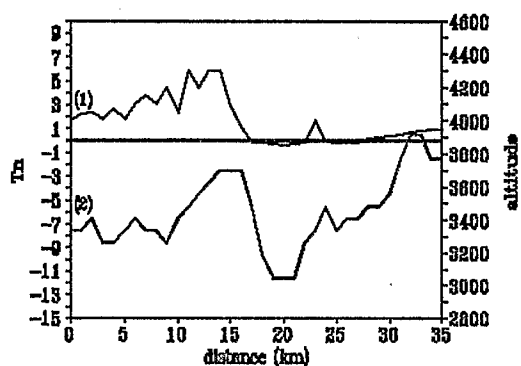
Ce zonage a été appliqué à la seule image disponible dans le cadre du cycle culturel (13 mars 87). On remarque les grandes structures de cette région, le lac Titicaca et les vallées chaudes qui bordent l'Altiplano au nord et à l'ouest, ainsi que la cordillère orientale très froide. Au S-W du lac, on note un gradient des températures qui deviennent de plus en plus froides près de la cordillère occidentale. Les risques de gel apparaissent négligeables autour du lac et moindres dans la zone qui se prolonge vers le S-E, en accord avec le zonage régional ; on remarque d'autre part une zone froide au sud de Viacha. Noter par ailleurs la présence de nuages qui perturbent l'image (presqu'île de Copacabana), et le caractère particulier de ce zonage qui ne concerne qu'une seule date, et ne peut être généralisé à l'ensemble de la période de culture. (fig. 4)

### 3.5. Analyse de la répartition spatiale des températures minima à l'échelle locale

Une carte des températures minimales  $T_n$  a été réalisée à grande échelle (1/250 000) pour la zone de Viacha, à partir de la corrélation  $T_n=f(T_s)$  issue de la régression générale. Cette carte permet d'analyser des phénomènes que l'on peut observer sur l'Altiplano. (fig. 5)

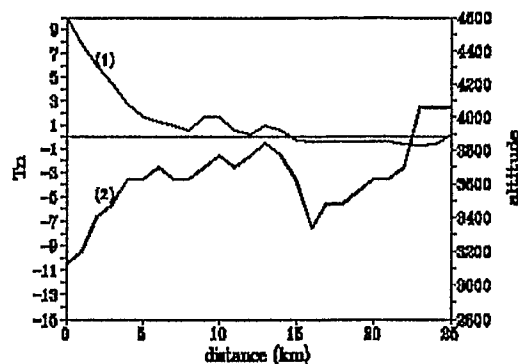
Deux coupes, perpendiculaires aux structures du relief, illustrent la répartition des températures en fonction de leur situation topographique, par la mise en correspondance des altitudes, et des températures minimales pixel par pixel. (fig. 6 et 7)

Fig. 6 : Répartition des températures minima en fonction du relief (coupe sud)



(1) Altitude  
(2) Température minima

Fig. 7 : Répartition des températures minima en fonction du relief (coupe nord)



(1) altitude  
(2) Température minima

On remarque que les reliefs sur l'Altiplano sont froids dès qu'ils dépassent 4 200 m ; par contre, les flancs des collines basses sont plus chauds, et les plaines situées aux pieds de ces collines sont nettement plus froides (mêmes zones froides que pour l'image de mars).

En comparant, cette fois, la carte des températures  $T_n$  avec la carte topographique de cette région, l'étendue spatiale de ces phénomènes apparaît (fig. 8 et 9). Les zones froides de l'ouest correspondent aux hautes collines ; la ceinture chaude, due au phénomène classique d'inversion thermique, est particulièrement marquée à l'ouest de Viacha, le long des collines. Les plaines situées au pied de ces collines accumulent les masses d'air froid, d'autant plus que l'Altiplano présente ici une légère pente (1%) vers le sud-ouest. Ces plaines sont en quelque sorte des points bas par rapport à leur environnement.

Toutes ces observations vont d'ailleurs dans le sens des stratégies des agriculteurs qui répartissent leurs parcelles en différentes situations topographiques : sols pauvres sur les pentes, mais moins gélifs, sols plus productifs dans les plaines, mais plus exposés au gel (9).

Un phénomène particulier apparaît nettement au nord-est de Viacha, sur deux images ; il semble que des masses d'air chaud, issues des vallées basses qui entaillent l'Altiplano au niveau de la Paz, débordent et s'étendent jusqu'à Viacha.

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Cette première étude sommaire montre qu'il est possible de réaliser un zonage des gelées sur l'Altiplano en utilisant l'I.R. thermique de NOAA.

L'amélioration des corrélations  $T_n/T_s$  passe avant tout par l'acquisition d'autres images NOAA de nuit, et notamment pendant la saison de culture. Nous n'avons disposé pour cette étude que de 7 images (1 de mars et 6 d'hiver).

Dans le visible, il est nécessaire aussi de disposer des N.D.V.I. correspondant aux images de nuit, et sur tout l'Altiplano.

Les  $T_s$  NOAA pourraient être améliorées en tenant compte de l'angle de visée par rapport aux surfaces captées ; ses effets ne sont pas négligeables, surtout sur les reliefs (10).

En ce qui concerne les données au sol, l'utilisation des autres paramètres disponibles sur le réseau météorologique doit permettre un affinage de ces corrélations :

- l'écart  $T_x - T_n$  entre dans de nombreux modèles pour caractériser l'inertie thermique du complexe sol/végétation (11), et devrait permettre de mieux recalibrer la  $T_s$  donnée par NOAA à 2 h, et la  $T_n$  mesurée sur les stations.

- l'humidité de l'air, la vitesse et la direction du vent sont indicateurs des masses d'air humides, qui affectent beaucoup la transmission des luminances dans le visible, et des masses d'air sec qui sont associées aux périodes de gel (12).

Mais ces paramètres peu fiables doivent être vérifiés avant utilisation.

Des études plus précises, bien que localisées, ont été commencées au niveau des deux stations automatiques (pas de temps 3h, indice actinothermique, RN, humidité,..).

Au niveau régional, il faudrait palier au manque de stations dans le sud par une recherche d'autres sources de données météorologiques.

L'utilisation des données SPOT prévue pour cette année devrait permettre une meilleure connaissance de l'occupation des sols. D'autre part, toujours à l'aide des données SPOT, un zonage des types de sols orienté vers leurs propriétés hydrodynamiques est en cours. Ces informations sur les stocks d'eau devraient permettre d'approcher leurs caractéristiques thermiques, indispensables pour l'étude de la température de surface.

Fig. 3 : zonage des températures minima sur l'Altiplano à partir des 7 images de nuit

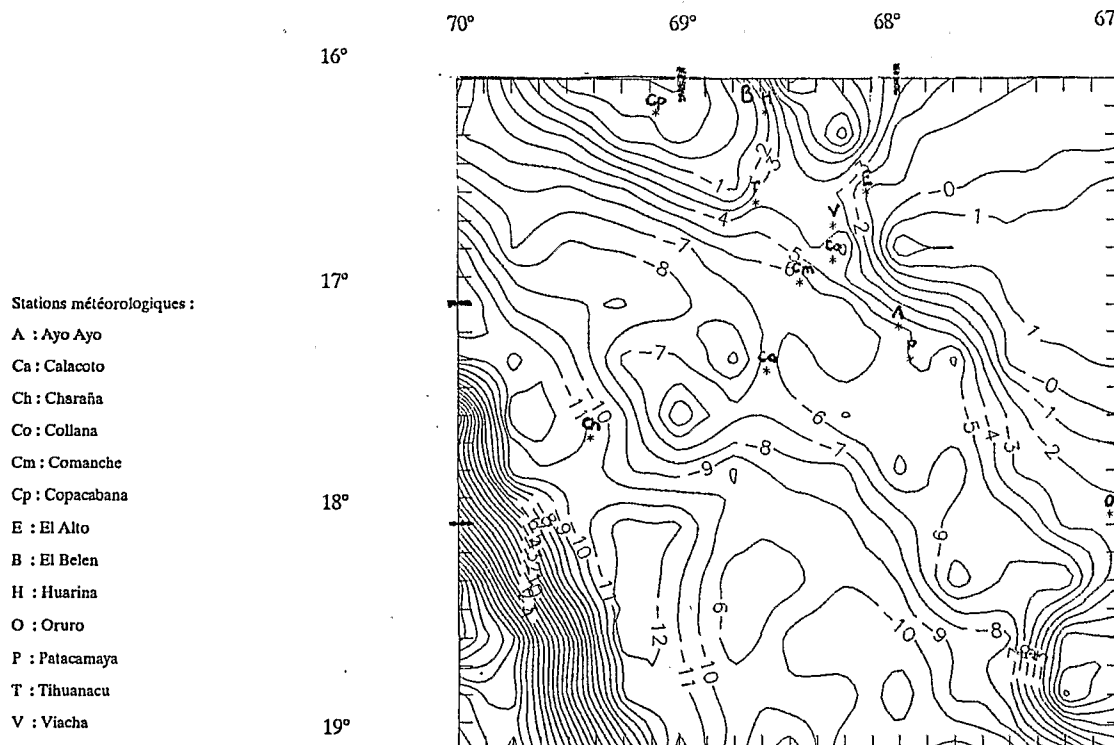




Fig. 4 : zonage des températures minima (13/03/87, 3:12)  
(éch. 1/1 000 000)

Table d'équivalence des températures :

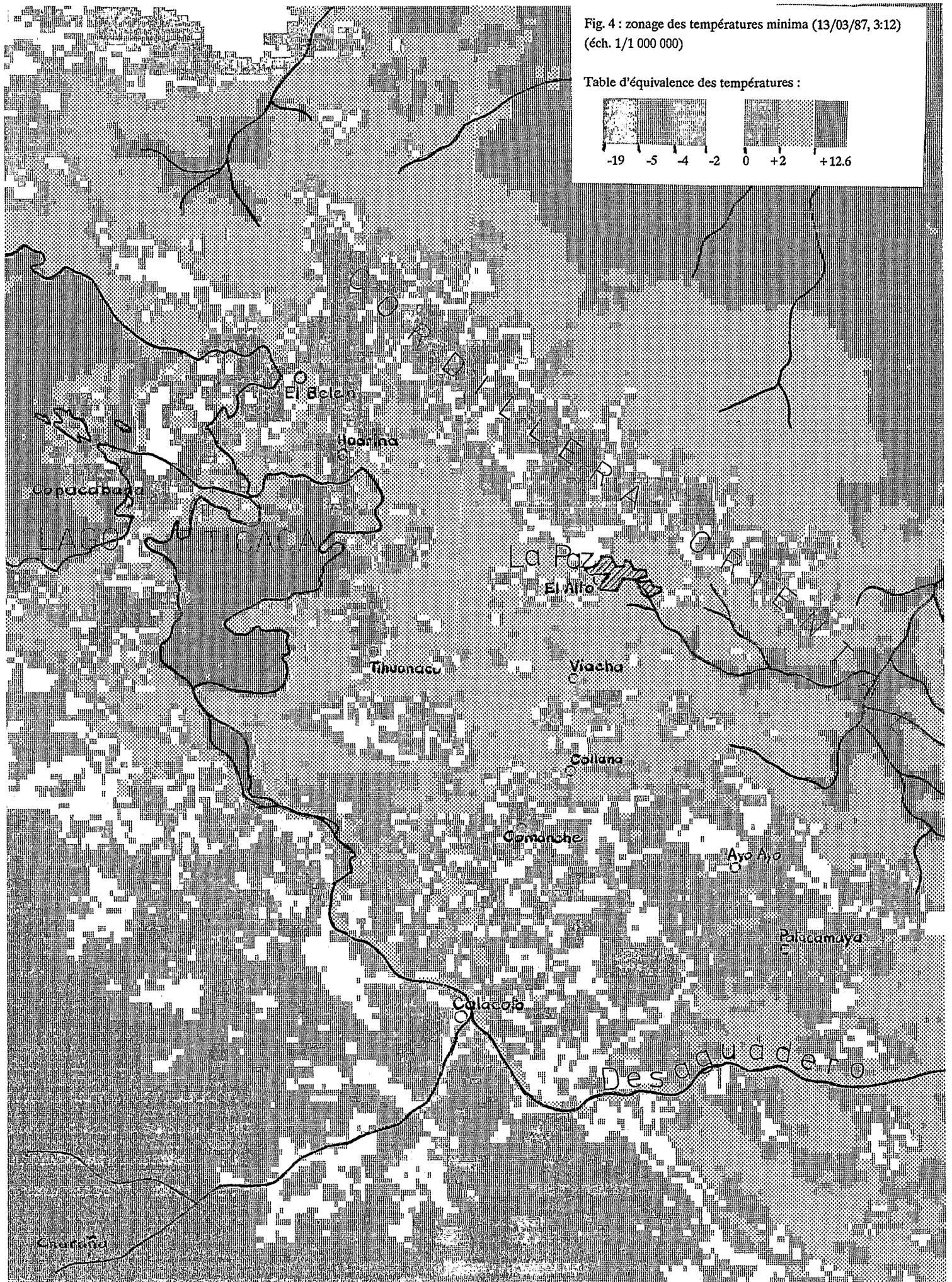
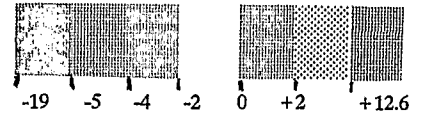


Fig. 5 : ZONAGE DES TEMPERATURES MINIMALES DE LA ZONE DE VIACHA

(22/07/89)



Table d'équivalence des températures :

<-14	-10°	-4°	+2°
-14°	-9°	-3°	+3°
-13°	-8°	-2°	+4°
-12°	-7°	-1°	+5°
-11°	-6°	0°	+6°
	-5°	+1°	



Fig. 8 : relief de la zone de Viacha

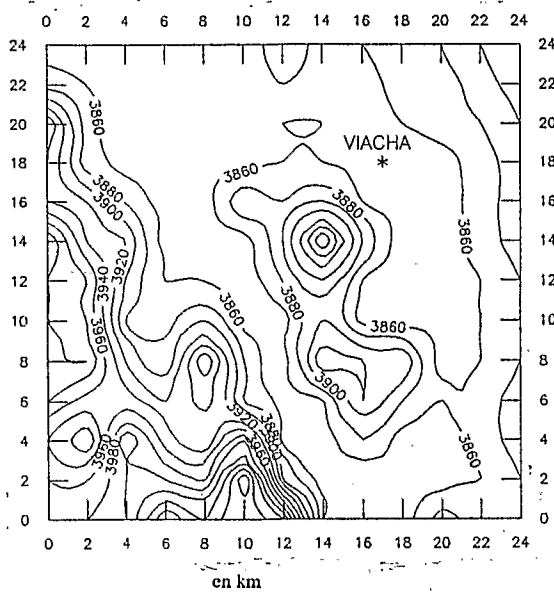
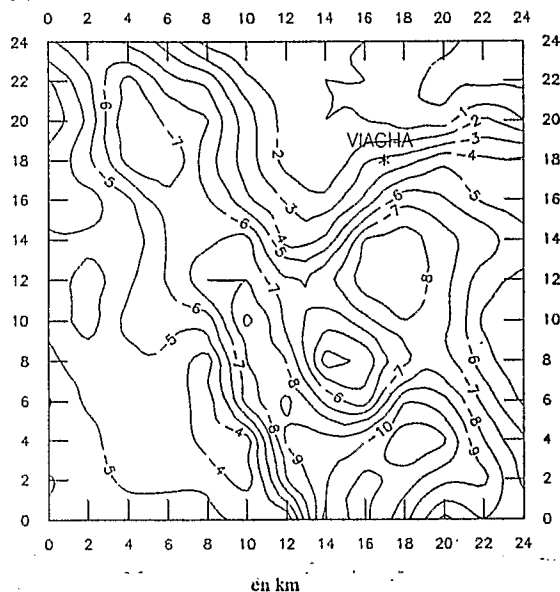


Fig. 9 : zonage des températures minima (Viacha, le 22/07/89, 2:28)



## Références bibliographiques

- (1) LE TACON Ph., VACHER J.J., ELDIN M., IMAÑA E., 1992. Los riesgos de helada en el Altiplano Boliviano. *VII° Congreso sur les cultures andines* (sous presse).
- (2) GUYOT G., SEGUIN B., 1988. Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. *Agronomie*, 1988, 8 (1), 1-13.
- (3) ANTONIOLETTI R., 1988. Délimitation des zones de gel à l'aide de thermographies infrarouges satellitaires. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 1, 41-46.
- (4) HAGOLLE O., 1991. Chaîne de traitement CNES des images AVHRR-NOAA. Campagnes 1988-1989-1990. Manuel de l'utilisateur. CNES note 91.006, 22 p.
- (5) SEGUIN B., BAELTZ B., FAVARD J.C., MANDEVILLE J.C., MONGET J.M., 1981. Signification de la thermographie I.R. par satellite en agroclimatologie dans le Sud-Est de la France. In *Colloque International sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon (France)*, 8-11 sept. 1981, 467-476.
- (6) GUILLOT B., 1981. Les satellites de l'environnement. Description sommaire de la série TIROS - N/NOAA-A.1. *ORSTOM, Initiations-Documentations techniques* 50, 58 p.
- (7) BARION R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985. Dossiers de télédétection. Indices de végétation. *CRT Rennes* 2, juin 1985, 121 + 29 p.
- (8) VACHER J.J., LIBERMAN M., DE THUY E., 1991. Influencia del Lago Titicaca en la agricultura litoral. In *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM-HISBOL*, 517-530.
- (9) DE THUY E., GUIRLET C., 1988. Stratégies paysannes face au risque climatique. *ORSTOM, Agroclimatología del Altiplano Boliviano*, 9, 60 p.
- (10) LAGOUARDE J.P., VALERY P., BELLUOMO P., SOULIER M.A., 1983. Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une méthodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies : application aux données HCMM sur le nord-est du Massif Cental. *Agronomie*, 1983, 3 (10), 1011-1018.
- (11) CASELLES V., GANDIA V., MELIA J., 1983. Application des mesures de l'infrarouge thermique à la prévision des gelées sur les agrumes. In *Colloque International sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux (France)*, 12-16 sept. 1983, 6 p.
- (12) LE TACON Ph., 1991. Les risques de gelée sur l'Altiplano Bolivien. Rapport d'étape, formation doctorale ENSSAA, 55 p.

ANNEXE 1 : Croquis de l'Altiplano bolivien. (1), altitudes supérieures à 4 500 m ; (2), altitudes comprises entre 4 000 et 4 500 m ; (3), altitudes comprises entre 3 600 m et 4 000 m. (d'après Servant M.)

