

# PROYECTO SISHILAD

## AREA DE EDAFOLOGIA



### RESUMEN DE RESULTADOS

04/1996 - 05/1997

### y RECOMENDACIONES, Tomo I

**Responsable de la Area :**

Ing. Jean-Louis JANEAU

**INSTITUCIONES :**

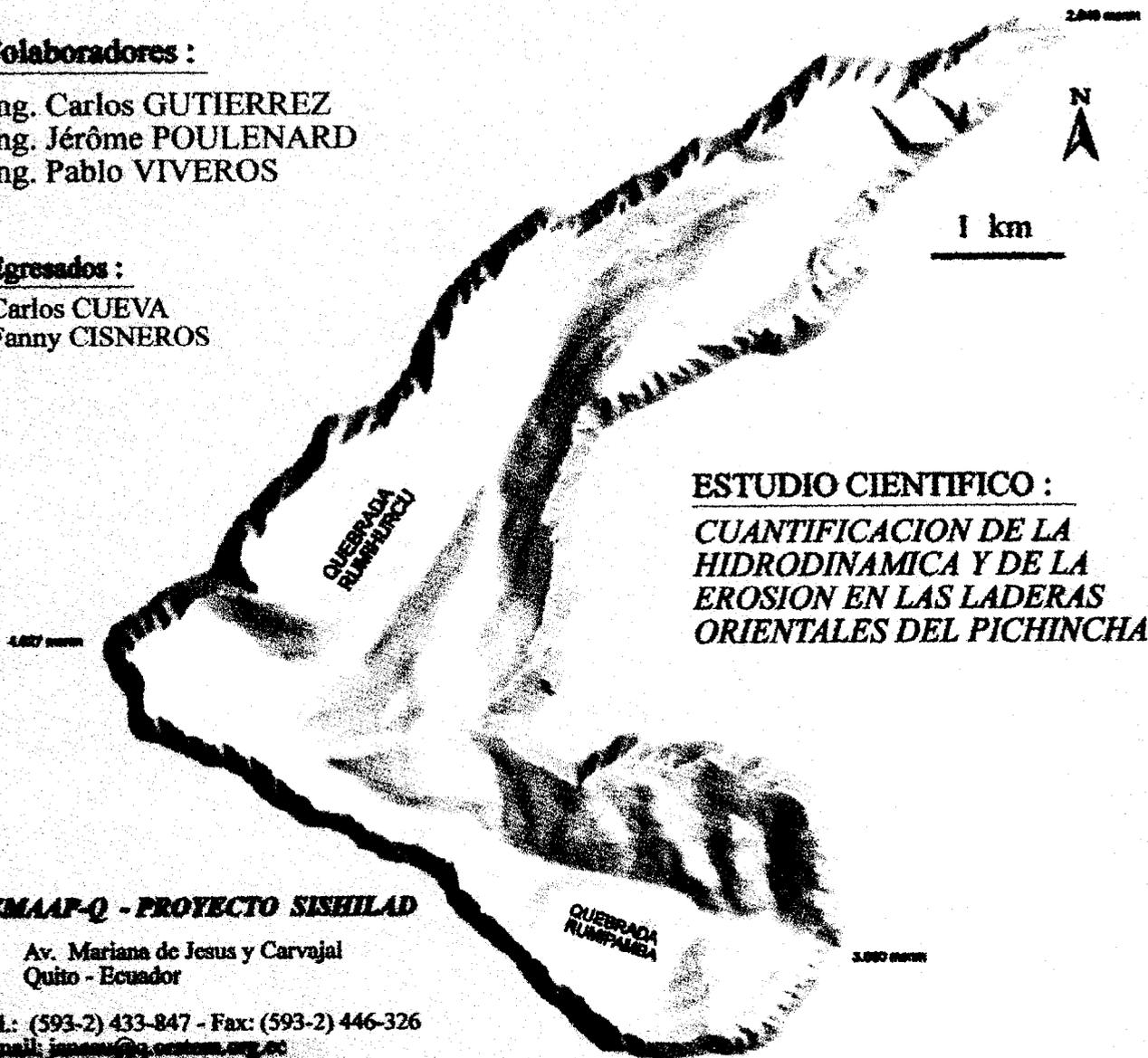
EMAAP-Q - INAMHI - ORSTOM

**Colaboradores :**

Ing. Carlos GUTIERREZ  
Ing. Jérôme POULENARD  
Ing. Pablo VIVEROS

**Egresados :**

Carlos CUEVA  
Fanny CISNEROS



**ESTUDIO CIENTIFICO :**

**CUANTIFICACION DE LA  
HIDRODINAMICA Y DE LA  
EROSION EN LAS LADERAS  
ORIENTALES DEL PICHINCHA**

**EMAAP-Q - PROYECTO SISHILAD**

Av. Mariana de Jesus y Carvajal  
Quito - Ecuador

Tel.: (593-2) 433-847 - Fax: (593-2) 446-326  
e-mail: janeau@q.orstom.org.ec



## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	2
2. CARTOGRAFIA DE LOS SUELOS Y DEFINICION DE SUS CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS Y MINERALOGICAS.....	4
3. CUANTIFICACION DE LA HIDRODINAMICA EN LOS SUELOS DE LAS LADERAS MEDIANTE SIMULACIONES FISICAS DE LLUVIAS EN PARCELAS DE UN METRO CUADRADO.....	7
3.1 Zona de Páramo y matorral (69,9 % de la superficie de la cuenca).....	7
3.1.1 Sectores con alta pendiente.....	7
3.1.2 Sectores planos o semi-planos.....	7
3.2 Zonas cubiertas con pasto (6,1 % de la superficie de la cuenca).....	8
3.3 Zona de cultivos (10,4 % de la superficie de la cuenca).....	9
3.4 Zona de bosque (5,9 % de la superficie de la cuenca).....	9
3.4.1 Suelo desnudo, con cenizas producto de quemas.....	9
3.4.2 Suelo con cobertura vegetal natural.....	9
3.5 Clasificación de las unidades cartográficas en función de su hidrodinámica y su sensibilidad al transporte de sólidos.....	10
4. MODELACION MATEMATICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES FISICAS DE LLUVIA.....	12
5. CARACTERIZACION DE LA EROSION Y LA ESCORRENTÍA EN TRES PARCELAS DE 250 m <sup>2</sup> .....	13
6. CARTOGRAFIA DEL USO DEL SUELO Y ESTUDIO DE LA CAPTACION DEL AGUA POR PARTE DE LA VEGETACION Y SU CONDUCCION HACIA EL INTERIOR DEL SUELO.....	15
6.1 Cartografía del uso del suelo.....	15
6.2 Captación de la lluvia por parte de la vegetación.....	16
7. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURACION Y DINAMICA DEL ESPACIO EN LA CUENCA.....	18
8. RECOMENDACIONES PARA LA PROTECCION DEL ECOSISTEMA.....	19
8.1 Zona del Páramo.....	19
8.2 Zonas de pasto.....	19
8.3 Zona de cultivos.....	19
8.4 Zona de bosque.....	19

# PRIMEROS RESULTADOS Y RECOMENDACIONES DEL AREA DE EDAFOLOGIA

## Tomo I

Septiembre de 1997

### 1. INTRODUCCION

El presente documento resume las conclusiones y recomendaciones que se pueden formular a la luz de los primeros resultados obtenidos por el área de Edafología en colaboración con el área de Hidrología del Proyecto SISHILAD y especialistas geógrafos. Estos resultados fueron obtenidos principalmente entre marzo de 1996 y mayo de 1997. No obstante, los trabajos se desarrollaron a partir de los trabajos de Janeau et al. 1996, 1997, Leroux y Janeau 1996 y de Perrin et al. 1995, 1996.

Los estudios fueron realizados en la cuenca hidrográfica de la Qbra. Rumihurcu, que fue seleccionada por su representatividad de las Laderas Orientales del volcán Pichincha y se ubica junto a la ciudad de Quito. Los resultados de tales estudios están descritos con detalle en el documento elaborado por Janeau et al. en mayo de 1997, Tomo II.

Todas las investigaciones del área de Edafología están interrelacionadas para obtener una visión global del comportamiento de los suelos frente a la lluvia, a la escorrentía, a la erosión y a la fuerte antropización que tiene lugar en las quebradas orientales del Pichincha.

Es así como el estudio de las características intrínsecas de los suelos, de su distribución y estratigrafía, todo ello combinado con simulaciones experimentales de lluvia en parcelas de un metro cuadrado, ha permitido determinar las características hidrodinámicas del sector y estimar el transporte de sólidos generados por lluvias en cuatro unidades cartográficas no urbanizadas (entre los 3100 y 4100 msnm) de las Laderas. Esa investigación *in situ* de la hidrodinámica fue complementada con análisis matemáticos que permiten dar una interpretación física a los resultados obtenidos en las simulaciones de lluvia.

A fin de caracterizar la escorrentía se estudió experimentalmente su comportamiento en diversas condiciones de uso de suelo, y especialmente diferentes tipos de vegetación. La distribución altitudinal, espacial y las características propias de cada planta, permitieron apreciar y cuantificar la gran influencia ejercida por la vegetación en la formación de la escorrentía así como en la protección del ecosistema, considerando sus niveles de degradación.

También se han estudiado los procesos que acompañan a los cambios en el uso del suelo; para ello se han tomado datos de campo a lo largo y ancho de transectos representativos. Además, se emplearon recursos tales como GPS, fotografías aéreas, encuestas socio - geográficas, etc., todo ello para elucidar cuáles son las acciones antrópicas que pueden afectar el medio ambiente y generar mayores riesgos para el ecosistema de las quebradas y sus habitantes. Este trabajo está resumido en el mapa de "Uso Actual del Suelo" que permitiría extrapolar los datos de una cuenca hidrográfica a otras zonas de las Laderas del Pichincha por medio de un Sistema de Información Geográfico. Ese análisis de la estructura geográfica y de

la dinámica de los cambios en la cuenca Rumihurcu permite apreciar los riesgos vinculados con una fuerte antropización y define diversas medidas que deberían adoptarse para mitigar los peligros.

De este modo las investigaciones edafológicas proporcionan índices cualitativos y cuantitativos de los suelos así como otra información requerida para la simulación de crecidas con el modelo matemático MERCEDES.

El significado e importancia de los índices obtenidos depende mucho de la escala a la cual se realizan los estudios ( $1\text{m}^2$ ,  $250\text{m}^2$  y la cuenca de  $10.5\text{km}^2$ ) y de la superficie ocupada por cada unidad cartográfica. Así por ejemplo si se llegase a modificar el páramo de tal manera que se afecte su comportamiento ante las precipitaciones atmosféricas y la escorrentía, se podrían provocar fuertes alteraciones en las crecidas y en los volúmenes aprovechables de agua, ya que hasta la fecha actual allí no se generan grandes crecidas a pesar de que el páramo ocupa la mayor extensión de la cuenca. Si por otra parte se cambia el uso actual del suelo en la parte inferior de la cuenca, aún cuando sea en una pequeña proporción (tala de bosque, construcción de viviendas, etc.) con seguridad se generarán deslizamientos, se incrementará la magnitud de las crecidas y aumentará el riesgo debido a la formación de los flujos de lodo. Todo ello está vinculado al uso del suelo y su interacción con las fuertes precipitaciones.

Los estudios efectuados sobre la hidrodinámica en las Laderas del Pichincha tienen también un significado que rebasa los objetivos perseguidos por una aplicación inmediata, ya que han planteado problemas de índole teórica. Como ejemplo se puede citar el crecimiento permanente de la infiltración a pesar de que las lluvias simuladas son muy elevadas en cantidad e intensidad. Ello nos ha obligado a plantear hipótesis y teorías que expliquen las causas de los resultados obtenidos. Caso como el indicado constituyen una prueba adicional de que la conservación y aprovechamiento de recursos naturales como el agua y los suelos, no pueden desarrollarse debidamente si no se dispone de amplias investigaciones que den luces sobre las peculiaridades de cada región físico - geográfica.

## 2. CARTOGRAFIA DE LOS SUELOS Y DEFINICION DE SUS CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS Y MINERALOGICAS.

**Jérôme POULENARD, Jean-Louis JANEAU.**

El Pichincha es un volcán cuya actividad intensa y frecuente constituye un freno para el desarrollo de los suelos. Su última erupción es todavía muy reciente como para permitir que haya tiempo suficiente para que se produzca una alteración de los minerales primarios y una síntesis significativa de minerales secundarios. Desde hace unos 10.000 años, el intervalo de tiempo comprendido entre erupciones sucesivas parece ser muy corto para que los depósitos piroclásticos tengan una evolución completa hasta llegar al estado ándico propiamente dicho. La presencia de un horizonte enterrado con propiedades ándicas de primera categoría, según la identificación de los Andisuelos propuesta por la Soil Taxonomy, y que corresponde a un período de estabilidad del volcán, testifica el hecho de que el tiempo es allí un factor limitante. El tiempo necesario para una andosolización completa es mayor al tiempo promedio entre erupciones que no supera los 700 años.

Las condiciones existentes en la parte alta de la cuenca, al ser más favorables para la alteración (mayor humedad, diferente tipo de vegetación, mayor frío y menor actividad biológica, etc.), han dado lugar a una primera evolución de los suelos hasta llegar al estado vítrico de los Andisuelos. En la parte inferior de la cuenca, por el contrario, las condiciones reinantes han constituido un freno suplementario para la evolución, y los suelos se encuentran casi en su mismo estado original de piroclastos. Allí no se han producido ni síntesis de alófono, así como ninguna arcillización importante.

Por lo indicado en la cuenca hidrográfica de la Qda. Rumihurcu se pueden distinguir dos tipos de suelos de acuerdo a la clasificación de la Soil Taxonomy. Allí, la cobertura edafológica presenta una clara secuencia de alteraciones y evolución más o menos avanzadas en dependencia de la posición altitudinal que ocupe. En la actualidad no existen procesos edafogénicos en competencia que generen tipos muy diferentes de suelos. Se observa solamente una secuencia de suelos que es producto de la diferenciación en las condiciones climáticas y de la velocidad con la que se efectúa un mismo proceso: la andosolización en sus primeras etapas.

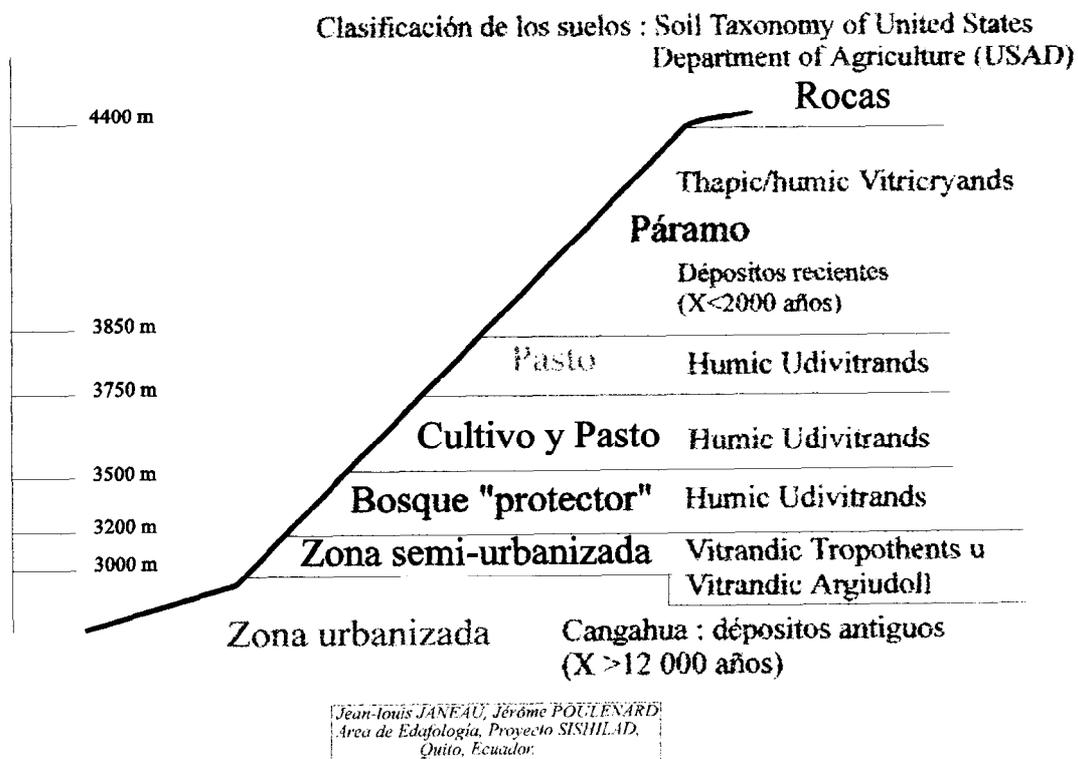
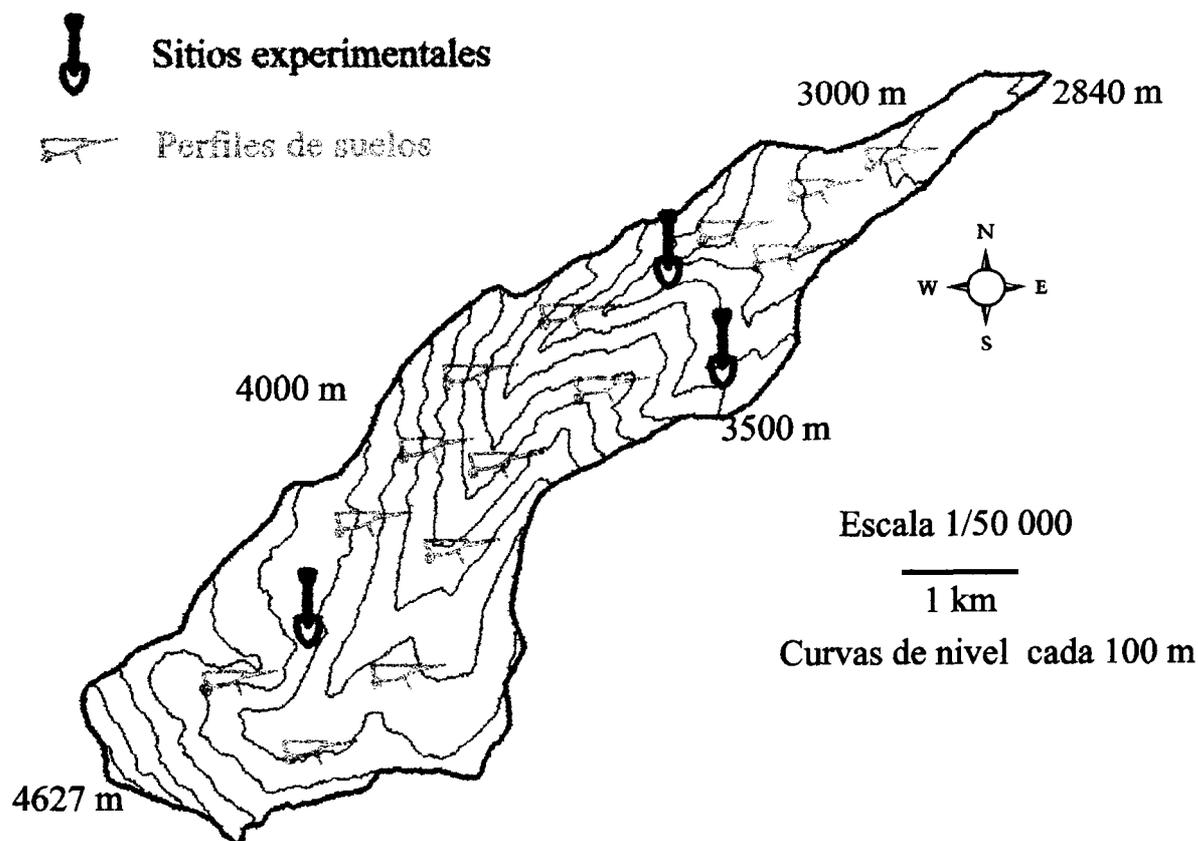
El trabajo desarrollado sobre la cartografía de los suelos en la cuenca de la Qda. Rumihurcu, ha permitido definir leyes sobre la distribución toposecuencial (en el espacio) y cronosecuencial (en el tiempo) de los suelos, **figura 1**. A pesar de lo alcanzado se deben realizar mayores trabajos sobre la distribución espacial de los tipos de suelos en función de la morfología del lugar. Algunas zonas, especialmente aquellas que tienen grandes pendientes, deben ser estudiadas en mayor detalle; además, se necesita comprobar la aplicabilidad de esas leyes en otras cuencas hidrográficas del Pichincha.

La sucesión de capas con diferentes grados de porosidad, debidos tanto al tamaño de los aglomerados como a su organización, representa un papel importante en los movimientos del agua, ya que pueden dar lugar a drenajes laterales. Además de ello, esa sucesión de capas, por simples diferencias relativas en su organización poral, puede favorecer la saturación de una u otra capa y, en consecuencia, provocar un cambio desde un estado sólido a un estado plástico - líquido. Una estratigrafía como la aquí indicada, al combinarse con la poca

cohesividad existente entre las capas, puede constituir un factor mucho más decisivo para los movimientos masivos de suelos que las propiedades debidos a los componentes alofánicos.

Si en este medio de origen eruptivo como lo es el existente en las Laderas, la granulometría de las diversas capas no tuviese mayor interés para la comprensión de la génesis y evolución de los suelos, se debe analizarla de todos modos (y detalladamente) para satisfacer las necesidades del Proyecto SISHILAD ya que permite evaluar cuán posible es una reorientación en la dirección los flujos de agua, así como estimar la susceptibilidad que tendrían los suelos para deslizarse.

Reconociendo los aportes que puede dar un mapa clásico de suelos, así como las contribuciones de trabajos anteriores sobre la edafología del Pichincha, se puede constatar que anteriormente no había información edafológica suficiente para complementar los estudios hidrológicos y geotécnicos en las Laderas. Por ello es evidente que se debe obtener cartografía detallada sobre la estratigrafía de cada zona y las posibilidades de cambio en los movimientos del agua. Este trabajo lo hemos realizado en gran parte, pero es indispensable ampliar las investigaciones en la parte media de las cuencas hidrográficas, ya que allí no se dispone de elementos suficientes para comprender la interacción entre el suelo y el agua. Esos futuros trabajos, al complementar lo ya ejecutado, ampliarán el ámbito geográfico donde se aplicarán las investigaciones hechas en el Pichincha.



**Figura 1 :** Clasificación de los suelos de una topo-crono-secuencia en la cuenca de la Qda. Rumihurcu.

### 3. CUANTIFICACION DE LA HIDRODINAMICA EN LOS SUELOS DE LAS LADERAS MEDIANTE SIMULACIONES FISICAS DE LLUVIAS EN PARCELAS DE UN METRO CUADRADO.

Pablo VIVEROS, Jean-Louis JANEAU.

Los experimentos de simulación de lluvia realizados en parcelas de un metro cuadrado de área, han permitido determinar las características hidrodinámicas y estimar el transporte de sólido de materiales superficiales generados por lluvias en cuatro unidades cartográficas no urbanizadas (que se ubican entre los 3.100 y 4.100 msnm) de una cuenca representativa de las Laderas del Pichincha, **figura 2**. Los resultados obtenidos se deben emplear con precaución ya que corresponden a parcelas elementales de  $1\text{m}^2$  y no pueden ser extrapolados de un modo sencillo a toda una cuenca de  $10.5\text{ km}^2$ . El procedimiento de experimentación y las estrictas condiciones con la cual se realizaron los trabajos permiten hacer comparaciones entre sitios representativos de cada unidad cartográfica.

#### 3.1 Zona de Páramo y matorral (69,9 % de la superficie de la cuenca)

##### 3.1.1 Sectores con alta pendiente

En el páramo, puede observarse que las pendientes fuertes del terreno (25-50 %) ejercen su influencia en el desarrollo de la escorrentía, influencia que de todos modos es inferior a la que tienen las características intrínsecas de los suelos y la cobertura vegetal. Estos factores tienen un papel preponderante en los procesos de infiltración que se producen en ese medio ambiente.

La densidad de la cobertura vegetal natural y el fuerte material radicular del páramo, impiden todo efecto debido al impacto de las gotas de lluvia (efecto *splash*), con drástica disminución o anulación de la energía cinética de las gotas, y en consecuencia, no dan lugar a una compactación de la superficie de los suelos (siempre y cuando no exista sobrepastoreo). La densidad de la vegetación ha sido estimada aproximadamente en una planta (mata) por metro cuadrado, aún cuando esa planta siempre está rodeada por vegetación de menor altura la misma que presenta una menor resistencia al flujo superficial (respecto a la que resistencia presentada por la planta de mayor tamaño). Ese efecto provocado por la vegetación de menor tamaño por hoy no puede ser estudiado ya que el simulador de lluvia no está adaptado para ello.

El potencial de infiltración en el páramo es fuerte. La mínima intensidad de lluvia que da lugar a una escorrentía significativa (no intermitente) es de 27,7 mm/h. Si bien el tiempo de imbibición (pérdidas iniciales) es relativamente largo, una vez que la escorrentía se ha iniciado, ésta alcanza valores altos debido posiblemente a la saturación con agua que se produce en las raíces y su entorno (material radicular). También influye la existencia de caminos preferenciales para la circulación del agua, los cuales se ubican entre las matas de paja.

##### 3.1.2 Sectores planos o semi-planos

En los sectores planos, con pendientes del orden del 9 %, los suelos permiten una infiltración inicial (pérdidas iniciales) que es inferior a la registrada en sectores con mayor pendiente. Esta diferencia se explica por la composición de los perfiles: capa de arena franca en los primeros

50 cm, seguida luego por otra capa de textura (granulometría) franco - limosa que desciende hasta los 100 cm y es más impermeable. La escorrentía se inicia a partir de los 25,4 mm/h de intensidad de lluvia.

Los flujos laterales de agua se desarrollan en las capas de lápilli de pómez en función de las pendientes que éstas tienen y que son diferentes respecto a la pendiente del terreno por cuanto las capas de lápilli de pómez están mucho más enterradas (la descripción del perfil consta en el anexo 2). Estas circunstancias determinan que la circulación lateral del agua no sea tan fuerte como sucede en la superficie del terreno y provocan una acumulación de agua en el perfil de suelo.

Las zonas con microdepresiones en su relieve, debido al clima imperante en las zonas altas y a las características del perfil (más arcilloso) así como a la posición topográfica de esas zonas, dan lugar a la formación de charcos de agua y pueden causar escorrentías significativas cuando a continuación se producen lluvias intensas.

El Páramo debido a características tales como su gran extensión (60 % de la cuenca), su posición geográfica, sus particularidades climáticas (mayor lamina de precipitación anual con menor intensidad, así como una evaporación inferior respecto a la existente en la parte baja de las Laderas) y su comportamiento hidrodinámico (mayor infiltración bajo lluvias simuladas con un período de retorno superior a 10 años), constituye un gran reservorio natural de agua en la cuenca hidrográfica. Este hecho es demostrado adicionalmente por el flujo permanente de agua en los cauces y por la presencia de pantanos en el transcurso de todo el año. En relación con lo aquí indicado cabe mencionar el estudio de RISSER, V. y GALLEGOS, D. (Area de Geotecnia del P. Sishilad), donde se señala la presencia de una capa de agua en el estrato de roca (andesita) que se encuentra por debajo de las formaciones superficiales.

Todos estos datos confirman la gran capacidad de infiltración que poseen los andosoles del páramo siempre y cuando las intensidades de lluvias sean bajas, lo cual sucede en forma predominante allá en las alturas. No obstante, si se combinan factores tales como: fuertes pendientes, presencia de granizo y nieve así como heladas con temperaturas inferiores a 0° C, el suelo puede impermeabilizarse de manera temporal. Si a estas condiciones se agregan lluvias de alta intensidad se podría producir una elevada escorrentía especialmente sobre las especies que separan a una planta de otra (inter-matas de vegetación).

Esa alta escorrentía puede incrementarse más si el hombre degrada el páramo mediante quemas continuas, ya que ellas reducen el tamaño de las plantas de paja (*Stipa ichu*). Tales acciones desprotegen el suelo puesto que permiten la formación de canales entre las plantas y hacen posible el arrastre del suelo por parte de la lluvia.

### **3.2 Zonas cubiertas con pasto (6,1 % de la superficie de la cuenca)**

El pasto facilita una buena infiltración cuando las intensidades de la lluvia son bajas, pero puede permitir una gran escorrentía si se presentan aguaceros de fuerte intensidad. Allí a partir de los 30,8 mm/h de intensidad se produce ya una escorrentía significativa.

La zona ocupada por pastos naturales soporta problemas relacionados con el sobrepastoreo y

las quemas a las que es sometido el matorral natural, lo cual hacen para ampliar la superficie con capas herbáceas y alimentar al ganado. Esta zona parece ser la más susceptible a la expansión por la facilidad con que se producen las quemas.

### **3.3 Zona de cultivos (10,4 % de la superficie de la cuenca)**

Los experimentos efectuados en el sector dedicado a los cultivos agrícolas se ha observado una particularidad que demuestra la importancia que tiene la cobertura vegetal en los procesos de secamiento del suelo, los movimientos internos del agua y el transporte de sólidos.

Los experimentos realizados en temporada seca, cuando la evaporación del agua del suelo es elevada, demostraron claramente que en todas las parcelas la primera lluvia simulada (con intensidades variables) genera escorrentía superficial que transporta una elevada proporción de materiales sólidos.

El hecho de que se haya producido escorrentía superficial demuestra que hemos superado la capacidad de infiltración, lo cual es explicado por la presencia de aire en los microporos que impide temporalmente la circulación del agua en el interior del suelo. Ello sucede hasta cuando el peso de agua supera la presión del aire contenido en los poros.

En uno de los sitios de experimentación (parcela P<sub>4</sub>), el tiempo de imbibición es cada vez más corto y la lámina de escorrentía crece en cada lluvia subsecuente, lo cual demuestra la importancia que tienen la cobertura vegetal y las formas empleadas en el labrado de la tierra sobre la hidrodinámica del suelo (aumento de la porosidad).

A pesar de lo indicado, la zona de cultivos no tendría mayor problema en lo referente a la escorrentía por cuanto todas las parcelas, inclusive las carentes de vegetación, tienen un poder de infiltración muy elevado si la superficie ha sido labrada.

### **3.4 Zona de bosque (5,9 % de la superficie de la cuenca)**

El bosque de eucalipto, cuando ha sido talado, registra el más alto coeficiente de escorrentía de todo cuanto se ha obtenido en el presente estudio. También se observa la mayor extracción de sedimentos, especialmente cuando el suelo carece de cobertura herbácea o arbórea.

#### ***3.4.1 Suelo desnudo, con cenizas producto de quemas***

Cuando el suelo está desnudo, la escorrentía es mayor ya que sobre la superficie se forman costras de erosión. Allí, la estructura superficial del suelo se compacta por la ausencia de raíces de vegetación baja (herbácea) y por el trabajo de los leñadores. Por ello al tener una intensidad de 13 mm/h de intensidad de lluvia, se produce una escorrentía importante y la cantidad de sedimentos transportados alcanza los valores más elevados.

#### ***3.4.2 Suelo con cobertura vegetal natural***

Si el bosque posee un estrato herbáceo bajo (con una cobertura cercana al 50 %), el suelo tiene una mejor infiltración, más aún si la cobertura es una combinación de árboles y de hierbas.

### **3.5 Clasificación de las unidades cartográficas en función de su hidrodinámica y su sensibilidad al transporte de sólidos.**

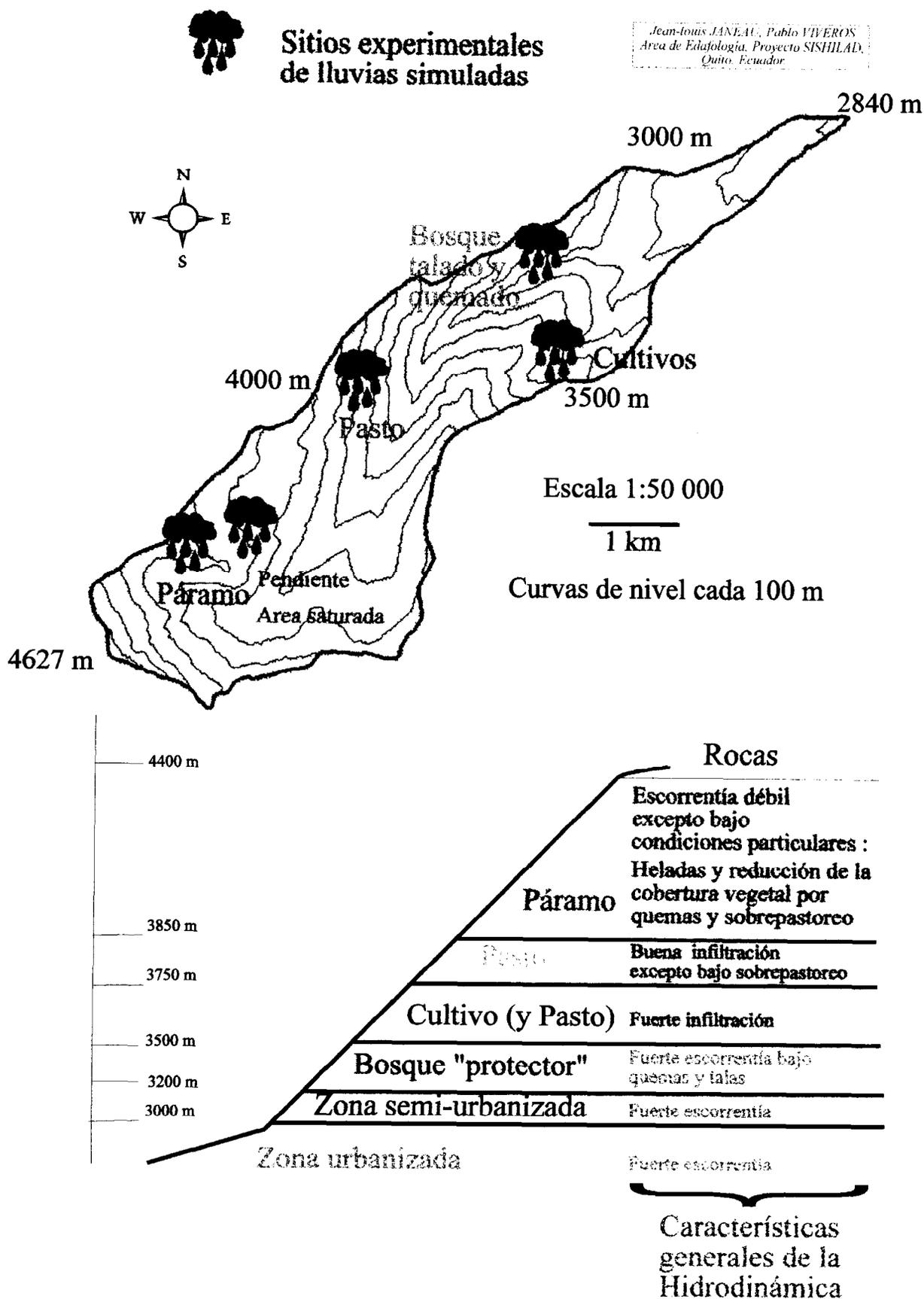
En base a los resultados sobre la hidrodinámica y el transporte sólido, obtenidos mediante los ensayos de simulación de lluvias anteriormente descritos, se puede plantear la siguiente clasificación de las unidades cartográficas :

En la parte alta de la cuenca hidrográfica el páramo posee una fuerte infiltración, excepto en condiciones particulares tales como suelo impermeabilizado por heladas y/o granizo, quemas que generan costras de superficie y cuando las lluvias presentan intensidades excepcionales.

La zona de pastos tiene una mayor capacidad de infiltración, pero su sensibilidad a los fuertes aguaceros es importante y puede en este caso generar un escurrimiento significativo.

En la zona de cultivos también existe una elevada infiltración, aún cuando el suelo está desnudo, ya que si está labrado conserva una porosidad superficial e interna muy importante.

Y finalmente, la zona cubierta por el bosque es la mayor proveedora de escorrentía superficial si el suelo esta destruido por efecto de un mal uso (quemadas y tala del bosque).



**Figura 2:** Clasificación de las unidades cartográficas en función de su comportamiento hidrodinámico.

#### **4. MODELACION MATEMATICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES FISICAS DE LLUVIA.**

**Edgar AYABACA, Jean-Louis JANEAU**

Las simulaciones de lluvias efectuadas en las Laderas del Pichincha han demostrado experimentalmente que allí la infiltración del agua no necesariamente decrece en el tiempo sino que por el contrario puede aumentar a medida que transcurre la lluvia. Estos resultados están en contradicción con lo usualmente aceptado y que se describe con las conocidas fórmulas de Horton, Kostiakov y Green-Ampt por ejemplo, las cuales indican que la tasa de infiltración debe reducirse a medida que se desarrolla la lluvia. La razón por la cual se produce ese comportamiento "anómalo" de la infiltración en las Laderas podría explicarse por la alta porosidad de sus suelos volcánicos y formaciones naturales (capas subyacentes de lúpili de pómez), aún cuando también puede ser provocada por el hecho de que espacios libres en el interior del suelo (ductos abiertos por raíces, gusanos, roedores, etc.) pueden mantener el movimiento de aire, gases y vapores que excluyan la influencia de la presión hidrostática. En tales circunstancias, y al carecer de un procedimiento teórico que permita calcular ese tipo de infiltración, hubo la necesidad de formular una nueva hipótesis y su respectivo modelo matemático que permitan interpretar los resultados obtenidos en las simulaciones de lluvia.

El modelo propuesto se fundamenta en dos principios básicos: la conservación de la cantidad de agua precipitada (ley de la continuidad) y la infiltración libre en forma semejante a la definida por Vedernikov (filtración desde canales que atraviesan suelos altamente permeables). En consecuencia con ello se ha asumido que la infiltración es proporcional al espesor de la lámina de agua que se encuentra sobre el terreno. El modelo obtenido (que contiene cinco parámetros) presenta una excelente concordancia con los resultados experimentales (ver tomo N° 2) y por estar resuelto en términos analíticos permite calcular otros índices que no han sido medidos experimentalmente. Entre tales índices cabe mencionar, la relación entre el caudal máximo y la intensidad de la lluvia, la mínima intensidad de lluvia que puede generar escorrentía superficial, la velocidad del flujo superficial, etc. Otra particularidad del modelo consiste en que permite calcular no sólo del hidrograma de la crecida, sino también todo el desarrollo de la infiltración en el transcurso del tiempo.

El modelo propuesto debe ser ampliado de tal manera que incluya la fase de imbibición y que considere el tránsito de la escorrentía a largo de una pendiente, lo cual es una de las tareas inmediatas del P. SISHILAD. Además, se necesita establecer la relación que existe entre los parámetros calibrados del modelo y las características del terreno (porosidad, granulometría, pendiente, humedad del suelo, cobertura vegetal, usos, etc.). Ello permitirá extrapolar los resultados de las mediciones a otros sectores de las Laderas donde no se han efectuado simulaciones de lluvia.

Los cálculos realizados con el modelo demuestran su alta flexibilidad, lo cual implica también el riesgo de que se adapte a problemas locales del sitio de experimentación (fugas de agua, etc.), así como a posibles fallas en las mediciones o ejecución de las investigaciones. Para evitar tales peligros se debe velar por la representatividad de los sitios de simulación, minimizar las fallas "técnicas" (debidas al equipo simulador de lluvias). Finalmente cabe subrayar que las conclusiones que se pueden hacer sobre la base de los resultados obtenidos, tienen validez únicamente para aquel rango de intensidades con las cuales se han efectuado las experimentaciones. Sobre este aspecto se puede indicar que para las aplicaciones inmediatas que persigue el proyecto SISHILAD los resultados son suficientes ya que las máximas intensidades de lluvia con las cuales se han efectuado los experimentos, corresponden a períodos de retorno superiores a los 100 años.

## 5. CARACTERIZACION DE LA EROSION Y LA ESCORRENTÍA EN TRES PARCELAS DE 250 m<sup>2</sup>

Carlos GUTIERREZ, Carlos CUEVA, Jean-Louis JANEAU

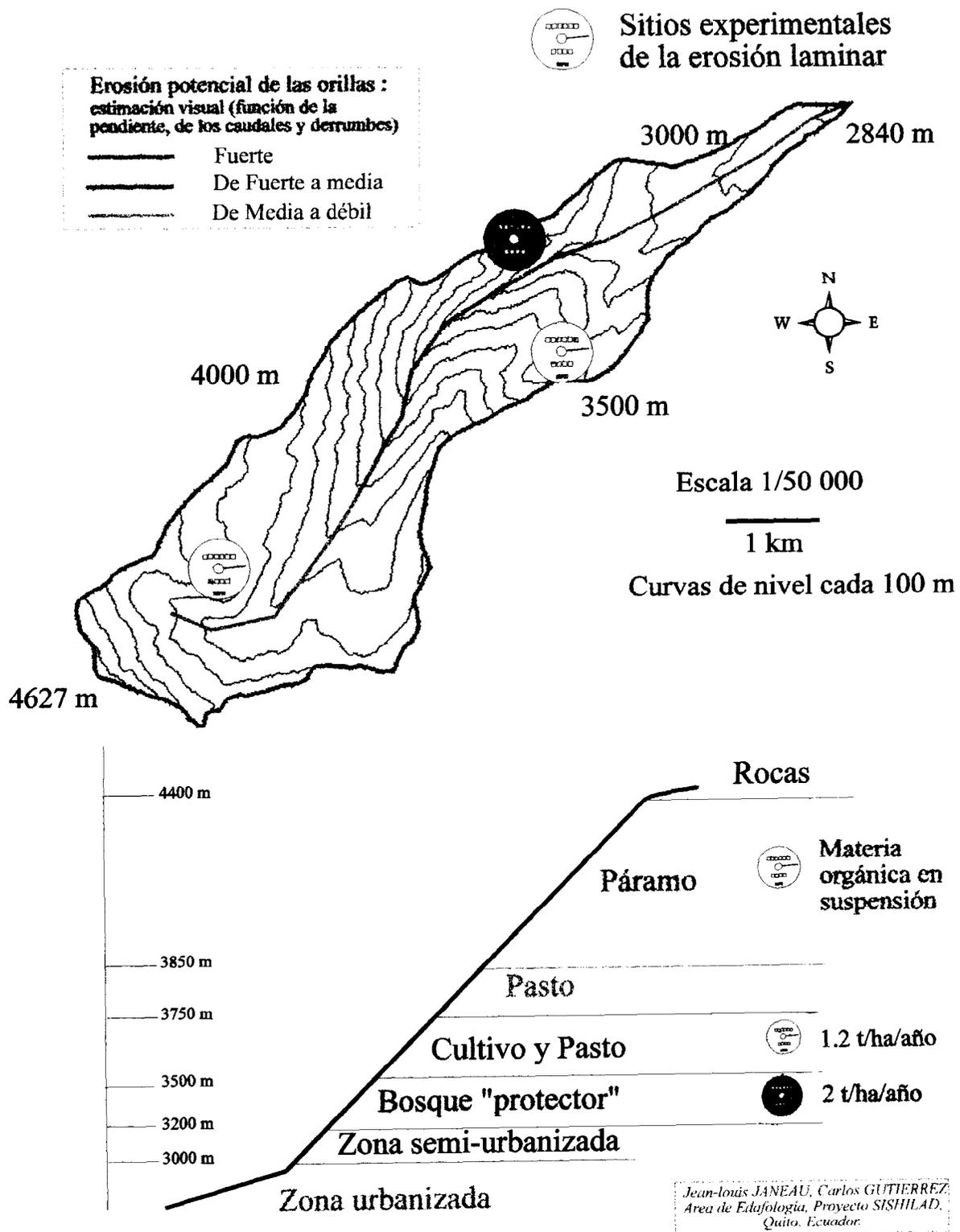
Con la finalidad de estudiar los procesos de la formación de la escorrentía superficial, así como de la erosión de los suelos en una escala intermedia, el P. SISHILAD instaló tres parcelas experimentales de 250 m<sup>2</sup> cada una. Esas parcelas están ubicadas en zonas representativas de las Laderas en aspecto tales como uso del suelo y la cobertura vegetal, **figura 3**; además, las pendientes de esos terrenos están en un rango que va del 50 al 60 %. El tamaño de las parcelas es semejante al que poseen los campesinos del sector y proporcionan información sobre la reacción del suelo ante las lluvias, considerando también que la vegetación desempeña un papel importante en la conservación del suelo y la formación de la escorrentía.

La primera de las parcelas, ubicada en el sector del páramo y cubierta de pajonales, ha demostrado en la mayoría de los casos que la escorrentía superficial es casi insignificante, lo cual concuerda con lo obtenido mediante las simulaciones de lluvia en las parcelas de 1 m<sup>2</sup> y con las mediciones hechas por el área de hidrología. No obstante se han observado casos aislados cuando la escorrentía superficial ha sido muy elevada si se la compara con las respectivas precipitaciones. Entre las causas que podrían explicar estas “anomalías” se puede mencionar la posible congelación de la superficie del suelo, la exfiltración de aguas provenientes de terrenos ubicados en cotas más elevadas, la condensación de la humedad del aire, etc. Las siguientes investigaciones a realizarse en ese lugar procurarán esclarecer las verdaderas causas.

La parcela ubicada en el sector de Rumiloma, donde el terreno ha sido arado, ha permitido constatar en la mayoría de los casos que al producirse una lluvia la erosión es directamente proporcional a la precipitación. No obstante se han producido algunos eventos lluviosos cuando se han registrado relaciones inversas, las mismas que podrían ser explicadas por el hecho de que la escorrentía observada fue pequeña y por efecto de la actividad agrícola: remoción de tierra, rebrote de maleza y otros aportes realizados por el agricultor.

Los resultados obtenidos en la parcela que se encuentra en el “bosque quemado”, han estado acordes con los cambios que sufrió el terreno durante el período de observaciones. En inicio el suelo estuvo pisoteado por la gente que trabajaba en la extracción de la madera, luego de transcurrido un tiempo se produjo el rebrote de la vegetación que empezó a proteger el suelo y redujo la erosión. Ello ha hecho que la erosión tenga una relación inversa con la magnitud de la escorrentía. En los siguientes estudios se analizarán la incidencia que pueden tener varias lluvias consecutivas, la humedad antecedente del suelo y otros aspectos adicionales.

Debido a que las dos últimas parcelas descritas, son pequeñas en proporción a toda la cuenca hidrográfica, no es conveniente formular conclusiones cuantitativas directas ya que inducirían a errores por el cambio de escala. No obstante, las mediciones efectuadas dan tasas de erosión y escorrentía relativamente débiles frente a datos obtenidos por diferentes autores (México, 1991, Roose 1993) ya que sólo se han registrado unas 2 toneladas por año y por hectárea para la zona del bosque quemado, así como 1,2 toneladas para el área con cultivos.



**Figura 3:** Medición de la erosión en función de las unidades cartográficas.

## 6. CARTOGRAFIA DEL USO DEL SUELO Y ESTUDIO DE LA CAPTACION DEL AGUA POR PARTE DE LA VEGETACION Y SU CONDUCCION HACIA EL INTERIOR DEL SUELO

Fanny CISNEROS, Jean-Louis JANEAU, Alexis SIERRA

### 6.1 Cartografía del uso del suelo

Los trabajos efectuados para establecer el mapa del uso actual del suelo en la cuenca hidrográfica de la Qda. Rumihurcu, definieron cuáles son las principales unidades cartográficas allí existentes. Esas unidades fueron establecidas en función de la gradiente altitudinal debida al clima (que predetermina la adaptación de los vegetales al medio ambiente) y por la fuerte influencia antrópica que afecta a ese ecosistema, ubicado tan cerca de la ciudad capital.

En consecuencia, la cuenca estudiada es un mosaico heterogéneo por el amplio número de unidades cartográficas que contiene, pero que al mismo tiempo posee cierta uniformidad por la existencia de la gradiente altitudinal antes indicada. Los trabajos cartográficos sobre la Quebrada Rumihurcu permitieron también destacar los principales impactos de origen antrópico que se observan en las zonas establecidas, todo lo cual se enumera a continuación:

#### **Páramo: zonas de pastoreo y zonas cubiertas de matorral (4.300-3.700 msnm)**

- Sobrepastoreo
- Quemadas del pajonal e incendios forestales incontrolados
- Senderos y caminos trazados sin planificación alguna
- Desvío de vertientes y conducción de agua por lugares inadecuados
- Linderación de terreno mediante zanjas

#### **Zonas ocupadas por cultivos y bosques (3.700- 3.200 msnm)**

- Invasiones periódicas
- Deforestación con diversos fines (construcción y obtención de materia prima para las ladrilleras)
- Sistemas agrícolas inapropiados para el medio.
- Senderos y caminos trazados sin planificación alguna

#### **Zonas semi - urbanizadas (3.200-3.000 msnm)**

- Invasiones periódicas
- Contaminación ambiental y presencia de basura que es arrojada de forma indiscriminada, especialmente en las quebradas
- Existencia de ladrilleras que eliminan la capa superficial de suelo y llegan hasta el sustrato
- Construcción de líneas de transmisión eléctrica que se ubican al borde de las quebradas

#### **Zona urbanizada (3.000-2.800 msnm)**

- Contaminación ambiental y presencia de basura que es arrojada, especialmente en las quebradas;
- Construcción de líneas de transmisión eléctrica, ubicadas al borde de las quebradas;
- Puentes con estructuras insuficientes.

A partir de estos factores se puede deducir cuáles son **los mayores riesgos potenciales**

que existen en la cuenca de la Qda. Rumihurcu, y que en su gran mayoría se encuentran también en las otras cuencas orientales del Pichincha :

- Reducción o pérdida de la capacidad de reserva de agua en el páramo;
- Impermeabilización de la superficie del suelo y destrucción del papel regulador que juegan las especies vegetales (diferentes en cada piso altitudinal) en la magnitud de la escorrentía;
- Erosión de las orillas de los ríos y posibles obstrucciones del cauce que provocarían flujos de materiales (lodos, escombros, vegetación, rocas, piedras, etc.);
- Derrumbes y deslizamientos en las zonas con fuertes pendientes, donde el espesor de los suelos es pequeño.

## 6.2 Captación de la lluvia por parte de la vegetación

Cada planta que crece sobre la superficie del terreno ejerce un papel regulador en el efecto que las lluvias provocan sobre los suelos. Las hojas y ramas de las plantas interceptan las gotas de lluvia y las captan para conducir las hacia los sectores del suelo donde se anidan sus raíces. Ese poder de **captación de la lluvia y su conducción al pie de los vegetales** es muy variable a lo largo de una toposecuencia, pero es muy similar a lo ancho de cada unidad cartográfica. Así por ejemplo se tiene que en el páramo, las dos especies que ocupan la mayor área tienen un poder de captación y conducción muy elevado ya que poseen una alta biomasa aérea. Las plantas pequeñas que viven al pie (como la orejuela, el agrostema y la achicoria) de plantas mayores, debido a la gran cantidad de raicillas completan la infiltración del agua que se escurre por entre la paja de páramo *Stipa ichu* y el chocho *Lupinus pubescens*.

En la zona de Pastos, el poder de captación de las tres especies predominantes: chocho *Lupinus pubescens*, colca *Miconia quitensis* y romerillo *Hypericum laricifolium* se ubica en un rango medio cuando la intensidad de la lluvia es igual a los 27 mm/h; mientras que para una lluvia de 70 mm/h se sale de ese rango, exceptuando a la colca que capta iguales cantidades de agua independientemente de la magnitud que tenga la intensidad de la lluvia.

En la zona de bosques, las especies tienen una alta capacidad de captación de lluvia en las dos intensidades de lluvia antes indicadas. Entre esas plantas se destaca el eucalipto *Eucalyptus globulus* por cuanto provoca una infiltración preferencial en el pie del tronco con lo cual recarga el suelo con agua. Este hecho ratifica lo escrito en la bibliografía, donde se describe al eucalipto como una verdadera bomba de succión de agua. Luego se ubican el chasazo *Liabum nonense* y la chilca *Braccharis polyhanta*

En la unidad denominada Cultivos, la papa *Solanum* y el maíz *Zea mays* tienen un bajo poder de captación debido a la morfología y sensibilidad de las plantas respecto a la intensidad de la lluvia. Además, en la base de estas especies no existe cobertura vegetal que facilite una mayor infiltración, ya que generalmente el suelo ha sido labrado para favorecer los cultivos. No obstante se debe indicar que las plantas en grupo, a nivel de toda la parcela, registran una captación mayor que la obtenida con un individuo aislado, lo cual depende de la mayor o menor densidad con la cual han sido sembradas las plantas. Ello implica la necesidad de establecer una densidad óptima para la protección de las laderas.

Se puede esbozar una clasificación de la resistencia de las plantas a la intensidad de la lluvia ya que existen vegetales que no son afectados por la energía cinética de la lluvia gracias a la morfología propia de su especie. Así se puede observar que las plantas sensibles a las

lluvias fuertes se ubican principalmente en parte alta de la cuenca donde las lluvias son de larga duración pero de baja intensidad.

En la presente investigación se han estudiado algunas especies considerando de modo especial su morfología. En función del estado fenológico en el cual las plantas se encuentren, se puede obtener resultados diferentes; empero para un mismo volumen dado de las plantas, los resultados deben ser similares.

El agrupamiento vegetal también juega un papel diferente, pero sin duda, si un vegetal capta un volumen dado, la multiplicación de estos vegetales bajo intensidades frecuentes de lluvia debe ejercer un papel importante en la infiltración de la lluvia. Una excepción se tendría cuando se produzcan aguaceros muy fuertes que doblan las ramas y darían lugar a un "mulch" (capa de material vegetal). Ello puede provocar una escorrentía superficial siempre y cuando la densidad de la vegetación sea alta, tales condiciones pueden cumplirse de modo especial en las poáceas que están expuestas al encamado (caída de las mieses) por la energía cinética y el peso del agua.

## 7. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURACION Y DINAMICA DEL ESPACIO EN LA CUENCA.

**Alexis SIERRA, Pascale METZGER, Jean-Louis JANEAU, Fanny CISNEROS.**

¿En qué consiste la contribución que proporciona el análisis de la estructura geográfica y la dinámica de ocupación en la cuenca de la Qda. Rumihurcu?. Esa contribución consiste ante todo y sobre todo en que se estudia un proceso de urbanización que se inscribe por completo en la dinámica general del crecimiento espacial de Quito. Sin embargo, el incremento poblacional y la rapidez de los procesos que allí se desarrollan son muy superiores a los observados a nivel de la ciudad en su conjunto.

En efecto, al igual que otras cuencas hidrográficas, el sector de la Qda. Rumihurcu se ubica en la periferia de la ciudad. Consecuentemente, la dinámica de este espacio es independiente de cualquier limitación vinculada a factores topográficos, a la utilización del suelo o la existencia de riesgo. De igual manera es indiferente a las normas de uso del suelo que ha establecido la planificación municipal. Está marcada, en cambio, por las condiciones del mercado del suelo urbano (localización general sumamente favorable, reducción de la rentabilidad de actividades diferentes a las urbanas, oferta y demanda de suelos), por los mecanismos espaciales tradicionales de la urbanización (ubicación preferencial a lo largo de las vías) y por el papel que desempeñan los circuitos de información.

En este contexto general y por la propia dinámica urbana, se puede afirmar la existencia de una creciente vulnerabilidad frente a peligros morfoclimáticos (deslizamientos, flujos de lodo). En efecto, el crecimiento urbano no controlado se desarrolla de modo privilegiado en un espacio donde existen peligros naturales, evidenciados por hidrólogos y edafólogos.

De manera más puntual, el mapa de síntesis revela claramente la existencia de líneas y puntos críticos en lugares tales como quebradas, vías, puentes o ladrilleras. Así, se identificó la vulnerabilidad del acceso a ciertos sectores de la cuenca: fragilidad de pasos obligados como el puente principal, mal estado de las calles, situación y dirección de las vías.

Estos puntos y líneas críticos son sitios de riesgo actual como el puente y deben ser objeto de una política emergente. Otros, por el contrario, son lugares cuya dinámica en curso va a acentuar la vulnerabilidad — es el caso de las ladrilleras — y, por lo tanto, deben imperativamente ser considerados en una planificación urbana a mediano plazo.

Así, el espacio de riesgo estudiado tiene sus matices. Su análisis revela cuáles son los sectores expuestos a peligros en mayor o menor grado, todo lo cual implica diferentes tipos de reacciones políticas: definir las áreas vulnerables cuya ocupación debe ser controlada (los bosques), establecer las líneas a ser vigiladas permanentemente (quebradas, rellenos, vías), determinar los puntos críticos que se deben arreglar con urgencia (puentes, descargas no controladas) o que deben tomarse en cuenta desde una óptica de planificación (futuro de las ladrilleras).

Bajo este ángulo, se puede entrever hasta qué punto los aspectos jurídicos e institucionales son factores esenciales de vulnerabilidad : falta de precisión en las competencias (mantenimiento de las quebradas, manejo del espacio protegido), multiplicidad de actores, ilegalidad de «asentamientos», heterogeneidad de los estatutos, lógicas clientelistas, etc., son otros tantos elementos que limitan el alcance de toda política de prevención de los riesgos y comprometen la eficacia de eventuales operaciones de auxilio.

## **8. RECOMENDACIONES PARA LA PROTECCION DEL ECOSISTEMA**

**Jean-Louis JANEAU**

Luego de haber definido las características principales de los suelos y sus usos, hemos estudiado su comportamiento hidrodinámico y la capacidad de la escorrentía para transportar sólidos. De ese estudio científico experimental se desprenden las primeras recomendaciones para la gestión del medio ambiente que proteja al ecosistema incluyendo el hombre y sus recursos hídricas, **figura 4**.

### **8.1 Zona del Páramo**

La degradación del páramo provocada por el sobrepastoreo y las quemas, que se realizan para obtener un rebrote de alimento para el ganado pero que dejan desprotegida a la superficie, constituye un grave problema que influyen en la hidrodinámica y en el ecosistema del Pichincha en sus faldas orientales.

Es primordial un buen manejo de esa zona y lo más adecuado sería conservar al páramo en su estado natural, así como disminuir la actividad antrópica. En caso contrario se tendrían amplias áreas generadoras de grandes crecidas cuando se produzcan lluvias excepcionales. Además de ello, el páramo perderá su papel de reservorio natural de agua.

### **8.2 Zonas de pasto**

Este sector constituye una zona de riesgo, por la expansión de los potreros y áreas de cultivos mediante la quema de la vegetación existente. Se recomienda, reordenar el uso de la tierra, de tal manera que concuerde con las condiciones del sector y se incluyan métodos de conservación de suelos, sistemas silvopastoriles y el manejo racional de los potreros evitando las quemas en los matorrales naturales.

### **8.3 Zona de cultivos**

Esta zona si bien no presenta mayores problemas en cuanto a la escorrentía superficial por tener una buena capacidad de infiltración, está sometida a la presión de una antropización anárquica que impermeabiliza poco a poco el terreno por el avance de la urbanización. Ello provoca una tendencia a la destrucción de los matorrales en los alrededores, por lo cual se constituye en el principal factor de riesgo. Se recomienda la adopción de medidas que impidan las invasiones y se mantenga como un sector agrícola.

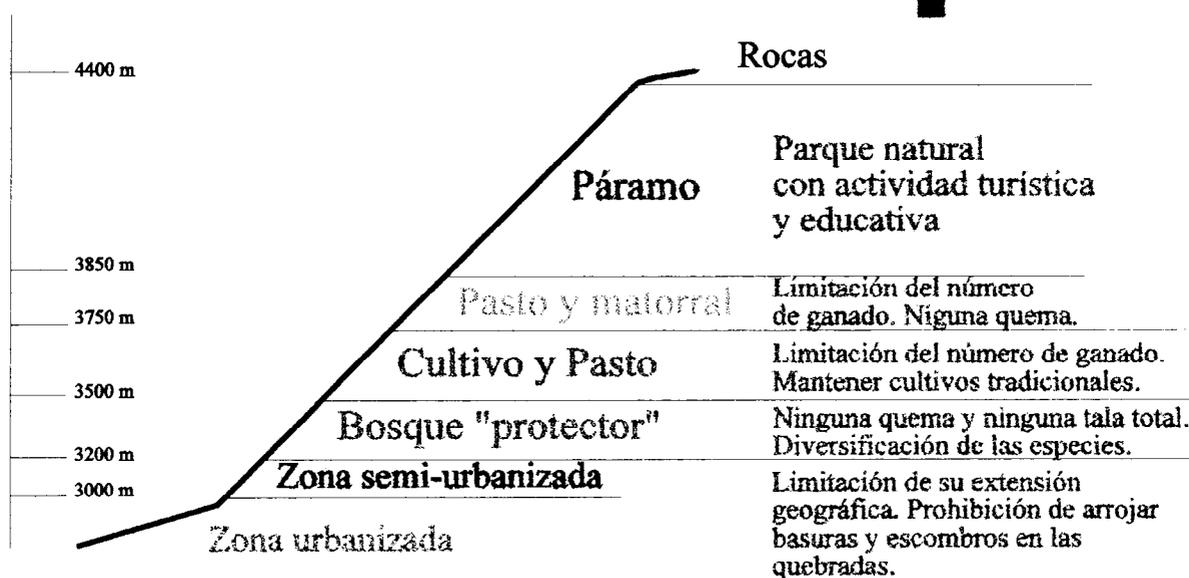
### **8.4 Zona de bosque**

Debido a que este sector es sumamente frágil por estar sometido a quemas y talas de árboles para ampliar las áreas cultivadas, y porque también soporta la presión del avance urbano, se recomienda mantener esta zona lo más intacta posible, procurando una explotación racional del recurso forestal allí existente. Se podría también reemplazar de manera programada ese bosque monoespecífico con un sistema compuesto por vegetación más diversificada (sistemas silvopastoriles).

<b>Unidades Cartográficas</b>	<b>Peligros</b>
Páramo	Quemas y sobrepastoreo
Pasto y matorral	Sobrepastoreo
Cultivo y Pasto	Técnicas agronómicas inapropiadas y sobrepastoreo
Bosque "protector"	Quemas y talas
Zona semi-urbanizada	Escombros y basuras

**Regla general :  
MODERAR LA ACTIVIDAD ANTROPICA**

4627 m = Rucu Pichincha



*Jean-louis JANEAU,  
Área de Edafología, Proyecto SISHILAD,  
Quito, Ecuador.*

**Figura 4 :** Recomendaciones para un buen manejo de las cuencas ubicadas en los flancos orientales del Pichincha.

## BIBLIOGRAFIA

JANEAU J.L., GUTIERREZ C., 04/1996. Proyecto SISHILAD, área de edafología. Informe de actividades del 1 de octubre de 1995 al 15 de marzo de 1996. 40p., 7 tab., 7 fig., 2 mapas, 2 planos, fotos.

JANEAU J.L., GUTIERREZ C., 05/1997. Proyecto SISHILAD, área de edafología. Primeros Resultados e Informe de Actividades del 15 de marzo de 1996 al 15 de mayo de 1997. Tomo II. 22p., 1 mapa A0, 1 plan. fotos. In press.

LEROUX Y., JANEAU J.L., 1996. Influencia de las costras de superficie sobre la hidrodinámica. III séminaire international des sols indurés : Quito, Equateur, décembre 96

Manual de conservación del suelo y del agua, 1991. Colegio de Postgraduados de Chapingo, México, P3-24.

PERRIN J.L., AYABACA E., GUTIERREZ C., CRUZ F., CANTENS T., HOORELBECKE R., FOURNIER R., RAMIREZ J., 1995. Hidrología urbana y periurbana de la zona metropolitana de Quito. Presentación del proyecto SISHILAD: SISTEMA de pronóstico Hidrológico de las LADERAS del Pichincha. Coloquio "Aguas Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales", La Paz, Bolivia, 13-16/06/95 (Poster).

PERRIN J.L., FOURNIER R., HOORELBECKE R., 01/1996 *Installation d'un réseau de mesures hydro-météorologiques. Bassins versants de la Rumihurcu et de la Rumipamba.*

PERRIN J.L., ROSERO S., CARRERA L., 01/1996. *Inventaire des données pluviographiques et limnographiques du projet acuífero de Quito (1981-1985). Rapport multigráfico en français et en espagnol. Orstom Equateur.*

ROOSE E. et al., 1993. *Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol XXVIII, n.2, 1993.*

## AGRADECIMIENTOS

Al terminar este resumen se deja especial constancia de reconocimiento por parte del responsable de la Area de Edafología a las entidades que auspician nuestras investigaciones: EMAAP-Quito, INAMHI y ORSTOM, así como a los estudiantes becarios y los ayudantes de campo que laboran en el proyecto SISHILAD. Se expresa también un reconocimiento particular al Dr. E. Ayabaca e Ing. R. Salvador de la EMAAP-Q, al Ing. C. Gutiérrez y al Ing. G. Gómez del INAMHI, a los doctores J.L. Perrin, J. Collinet, C. Bouvier, C. Valentin del ORSTOM, E. Mendoza y C. Muñoz del laboratorio del INIAP, así como a los colegas del proyecto por las recomendaciones y el apoyo que han brindado durante la realización del presente trabajo.