

Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande

FERNANDA J GASPARI[✉] & JUAN E BRUNO[†]

Grupo de Manejo de Cuencas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Univ. Nac. de La Plata, ARGENTINA

RESUMEN. Se realizó un diagnóstico de degradación ambiental en la cuenca del arroyo Napostá Grande, del sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires, con el objetivo de identificar los factores de erosión hídrica que producen degradación ambiental. El diagnóstico de la situación actual de la cuenca se realizó sobre la base de: (a) una evaluación cualitativa, por un relevamiento a campo con apoyo de imágenes satelitales y fotografías aéreas, de aspectos tales como drenaje, clima, paisaje, suelo, geología, vegetación y uso actual del suelo, y (b) un diagnóstico cuantitativo basado en la aplicación del modelo hidrológico HYMO 10, calculando los caudales líquidos para una tormenta típica de la zona de estudio y la estimación de los arrastres sólidos mediante el método *USLE* (ecuación universal de pérdida de suelos) y su extensión a cuencas hidrográficas de pequeñas dimensiones (*MUSLE*; modificación de la ecuación universal de pérdida de suelos). La correlación entre los diagnósticos cualitativo y cuantitativo permitió identificar sitios donde la degradación por erosión hídrica incide sobre la sustentabilidad del sistema. La determinación de la pérdida de suelo superficial, influenciada por la escasa cobertura vegetal, permitió verificar un mal uso del suelo y de la pendiente, fomentando una potencial devaluación económica y productiva del suelo y del agua.

ABSTRACT. **Diagnosis of environmental degradation for hydric erosion in the Napostá Grande stream's basin.** We carried out an environmental degradation diagnosis in the Napostá Grande stream's basin, Ventania system, province of Buenos Aires, to identify water erosion factors that result in environmental degradation. We based our diagnosis of the present situation of the basin on: (a) a qualitative assessment in the field, supported by satellite images and aerial photographs, of drainage, climate, landscape, soil, geology, vegetation and current land use, and (b) a quantitative diagnosis based on the application of the hydrological model HYMO 10, calculating water flows for a typical storm in the study area, and solid discharge estimates with the *USLE* (universal soils loss equation) method and its extension to small basins (*MUSLE*; modification of the universal soils loss equation). The correlation between the qualitative and quantitative diagnoses allowed the identification of sites where degradation by water erosion affected the sustainability of the system. The determination of the loss of superficial soil, influenced by the scarce vegetation cover, indicated an improper use of lands and slopes, fostering a potential economic and productive downgrading of soil and water.

✉ Grupo de Manejo de Cuencas, Fac. Cs. Agrarias y Forestales, Univ. Nac. de La Plata. Diag 113 y 118, 1900 La Plata, Buenos Aires. corrector@ceres.agro.unlp.edu.ar

† Fallecido el 9 de octubre de 2001.

Recibido: 10 octubre 2001; Revisado: 11 abril 2002
Aceptado: 17 abril 2002

INTRODUCCIÓN

La acción de la población humana a lo largo del tiempo y del espacio ha ido alterando el ambiente, produciendo fragmentación de hábitats y su consecuente pérdida de biodiversidad. El estudio de los factores naturales y humanos que actúan sobre las características hidrológicas de los cursos de agua superficiales y sobre las posibilidades de aprovechamiento de los mismos es una necesidad en el manejo integral de una cuenca hidrográfica. Dicho estudio permite identificar situaciones de déficit y/o excesos de agua, erosión hídrica superficial, sedimentación y denudación de la cubierta vegetal. Por medio de pautas de gestión y toma de decisiones sobre el uso de los recursos naturales en dichas situaciones, se induciría a la sustentabilidad del ambiente.

El presente trabajo identifica zonas de riesgo de erosión hídrica superficial mediante el diagnóstico cualitativo y cuantitativo del estado actual de los recursos naturales del área de estudio. El objetivo consiste en identificar los factores involucrados y representarlos en un mapa de degradación ambiental.

MÉTODOS

El diagnóstico se llevó a cabo en la alta cuenca del arroyo Napostá Grande, sistema serrano de Ventania (provincia de Buenos Aires, Argentina). Esta cuenca surca las dos terceras partes del partido de Tornquist, en sentido norte-sur, y desemboca en el partido de Bahía Blanca, cubriendo una superficie de 410.25 km².

La estimación de la degradación ambiental por erosión hídrica superficial se llevó a cabo en forma cualitativa mediante un relevamiento de campo (con apoyo de imágenes satelitales y fotografías aéreas) de aspectos tales

como drenaje, clima, rasgos destacados del paisaje, suelo, geología, vegetación y uso actual del suelo, y mediante la determinación cuantitativa de la pérdida de suelo usando la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE; Wischmeier & Smith 1978). También se aplicó el método modificado de la ecuación universal de pérdida de suelos (MUSLE) para determinar cuantitativamente los sedimentos emitidos en la cuenca para un aguacero específico (Mintegui Aguirre & López Unzú 1990). El diagnóstico se representó cartográficamente utilizando como herramienta de procesamiento al sistema de información geográfica Idrisi 32.

La valoración descriptiva del diagnóstico cualitativo fue convalidada con la estimación cuantitativa de la erosión hídrica detallada al nivel de la subcuenca del arroyo Napostá Grande. Esta última permitió ajustar la incidencia de la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica con la elaboración de la cartografía de zonificación de la degradación ambiental.

Diagnóstico cualitativo

La evaluación cualitativa de la cuenca del arroyo Napostá Grande permitió la confección de una base de datos cualitativa digital y de un modelo cartográfico. El procesamiento de dicha información cartográfica, usando el sistema de información geográfica, permitió la realización de los mapas secundarios y, finalmente, del mapa de diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica superficial, a una escala 1: 10000, los cuales se implementarían como eventuales indicativos de una propuesta de ordenamiento territorial.

Características climáticas. El cordón serrano de la provincia de Buenos Aires presenta clima Subhúmedo mesotermal. El sistema orográfico de Ventania tiene un efecto de enfriamiento regional,

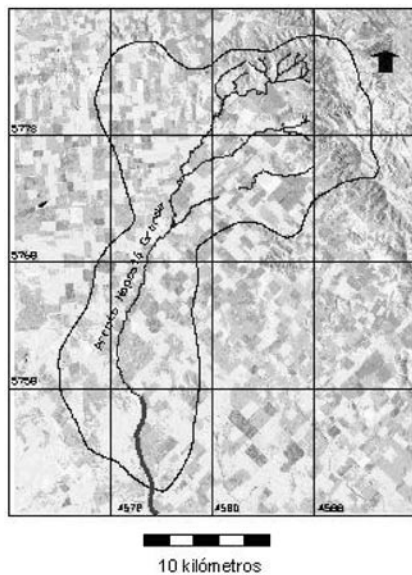


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Napostá Grande. Imagen satelital LANDSAT 226/86.

Figure 1. Location of the Napostá Grande stream's basin. Satellite image LANDSAT 226/86

presentando la zona inviernos más crudos y heladas más tardías que las llanuras circundantes. Durante todo el año predominan los vientos del norte, siguiendo en importancia los vientos sur, noroeste y oeste (Ruggiero & Conti 1988).

Se ha observado una humidificación del clima, con un incremento promedio de 200 mm si se compara el ciclo 1911-1970 con el ciclo 1971-1984. Además, la ausencia de valores de precipitación mínima inferiores al promedio del siglo ha conducido a una saturación del suelo y a un ascenso de la napa freática, prolongando los lapsos de concentración en los sectores deprimidos y de máximo riesgo de anegamiento (Domínguez & Carballo 1988). El exceso de escurrimiento superficial, la intensa evapotranspiración y, por consiguiente, los vientos desecantes, hacen que los suelos solo mantengan un valor de 25% de capacidad de campo, con sequías en los meses de verano. Los registros

climáticos en la sierra muestran un gradiente térmico de 6.9°C cada 1000 m y la existencia de mesoclimas serranos.

El diagnóstico cualitativo climático se completó con un detallado análisis en dos estaciones meteorológicas instaladas en predios dentro de la cuenca. Los registros pluviométricos mensuales tienen un elevado grado de representatividad para la zona de estudio. Los mismos se recolectaron durante un período de 31 años (1963-1994), correspondiendo el ubicado al norte a Estancia Manitoba (38°07'S; 62°05'O) y el ubicado al sur a Estancia La Navidad (38°23'S; 62°10'O), con un promedio anual de 826.78 mm y 737.65 mm, respectivamente.

Paisaje. Se diferenciaron tres tipos de asociaciones dependientes de las grandes unidades de paisaje: área serrana, área periserrana y área de derrame. Esta distribución coincide con la cartografía de dominios edáficos elaborada por INTA-Castelar (1989). Dentro del área serrana y periserrana, la mayor superficie corresponde a la llanura norventánica, formada por un depósito loessico superficial somero de menos de 1 m, de textura arenosa fina, en discontinuidad erosiva con planchones de tosca de 1-2 m de espesor. El área de sierras (más de 16% de pendiente) y pedemonte (5-16% de pendiente) se caracteriza por presentar cuencas de recepción interserranas de alto gradiente y de valles extraserranos bien encauzados que recorren la llanura norventánica con pendientes frontales que limitan al área de derrame. El alto estructural conforma el positivo bonaerense y, en conjunto, corresponde al sistema de montañas de pliegues medios a bajos, de tectónica compleja, sin fallas de importancia y que ha sufrido etapas erosivas, presentando en la orografía actual alineamientos subparalelos con dirección general noroeste-sudeste y disposición de suave arco convexo al norte. La morfogénesis

actual presenta abras características, resultantes del entallamiento fluvial, que han evolucionado cortando los ejes orográficos (Dymas, datos no publ.). Además, presenta niveles de aplanamiento en altura, interpretados como relictos de planicies de erosión antiguas en materiales paleozoicos, asociados a relieves muy escarpados (Harrington 1946, 1947). El área de derrame coincide con suelos bajos y con pendientes menores de 5%, donde predominan los relieves subnormales y suavemente cóncavos.

Suelos. Las unidades cartográficas de la cuenca pertenecen a los dominios edáficos 1, 2 y 3, de acuerdo con el mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires (INTA-Castelar 1989). Los suelos están desarrollados sobre material loessico que ha cubierto totalmente el faldeo de las sierras. Este sedimento se encuentra generalmente apoyado sobre una costra calcárea de distribución regional. La granulometría y naturaleza del sedimento loessico son muy homogéneas en todo el ámbito del dominio; sin embargo, en unidades adyacentes a otras subregiones geomorfológicas algunos suelos han evolucionado sobre sedimentos arenosos, también apoyado sobre tosca.

En las altas cumbres se desarrolla un Hapludol lítico franco fino en asociación con roca (1a), indicando poca profundidad, como factor limitante. En las pendientes y entre lomas los suelos dominantes son Argiudoles típicos fase inclinada; en las partes distales del pedemonte, donde el relieve se atenúa, predominan Argiudoles típicos de familia fina, someros, en asociación con Hapludol petrocálcico (2c). En las vías de escurrimiento que nacen en los faldeos se desarrollan Haplustoles típicos, énticos (3b) y líticos (3c), y en asociación con Argiustol típico (3a). La edafización se produjo en el loess y en ningún caso hubo alteración de las rocas subyacentes.

Éstas solo tienen importancia por ser el límite físico inferior del suelo.

Descripción geológica. Las sierras australes de Buenos Aires se hallan constituidas por rocas paleozoicas, excepto por pequeños afloramientos de granitos milonitizados y de pórfidos cuarcíticos. La cobertura sedimentaria del área de estudio corresponde a la Formación Pampeano, la cual se encuentra ampliamente distribuida en toda la región en posición aflorante o muy cercana a la superficie (Tricart 1973). La unidad estratigráfica en que se desarrolla la cuenca estudiada se denomina Serie de Ventania. Los grupos que se encuentran en la cuenca son Trocadero, Mascota, Bravard, Napostá, Providencia, La Lola y formaciones del Pleistoceno y Holoceno (Harrington 1946, 1947).

Los estudios desarrollados en la zona relacionan parámetros que permiten cuantificar caudales fluviales, precipitación, descarga subterránea,

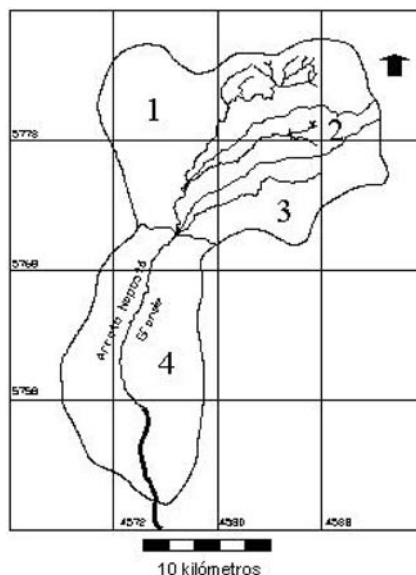


Figura 2. Mapa de drenaje y Unidades de Manejo y Gestión (UMG) de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande.

Figure 2. Drainage map and Management and Administration Units (UMG) in the Napostá Grande stream's upper basin.

escurrimiento subterráneo regional y volumen infiltrado. En la desembocadura de la cuenca y en el relleno sedimentario que se extiende al pie de las sierras se encuentra un nivel acuífero a profundidad variable en función de la topografía. Su existencia está vinculada a la geología, pues el tipo de roca sobre la que escurren los arroyos determina el tipo de material que forma el cono aluvial y éste determina la medida en que el agua puede ser llevada a niveles subterráneos y allí almacenada. Toda infiltración ocurre dentro de los límites de la cuenca, por lo que se puede concluir que la cuenca topográfica coincide con la cuenca hidrográfica. El tramo superior serrano y temporario de los arroyos se caracteriza por presentar piletas rocosas a veces profundas, que permanecen con agua durante la época de sequía (Sala et al. 1983; Custodio & Llamas 1996).

Vegetación. Desde el punto de vista fitogeográfico, la cuenca se halla incluida en la Región Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Austral. El tipo de vegetación natural es una estepa graminosa, representada por el pastizal (Frangi & Bottino 1995).

En la zona de las lomadas suaves se presenta un tipo de vegetación esteparia constituida por hierbas perennes xerófilas, entre las que predominan varias especies del género *Stipa*, como *S. brachychaeta*, *S. dusenii* y *S. trichotoma*. Entre sus matas prosperan plantas invasoras como *Centaurea calcitrapa*, *Cynara cardunculus*, *Medicago hispida* y *Trifolium repens*. También conforman esta asociación especies como *Convolvulus arvensis*, *Heliotropium amplexicaule*, *Asclepias mellodora* y *Salpichroa organifolia*. La vegetación en los cursos permanentes y temporarios, desde sus nacientes hasta la confluencia (torrentes y manantiales), es higrófila; está representada por *Senecio bonariensis*, *Juncus microcephalus*, *Scirpus riparius*, *Cortadera*

dioica, *Blechnum chilense*, *Melica macra*, *Glyceria multiflora*, *Polypogon elegantus* y *Paspalum quadrifarium*. Entre las hierbas que conforman el pastizal en las sierras, se encuentran *Discaria longispina*, *Eupatorium commersoni*, *Baccharis articulata*, *Baccharis crispa* y *Senecio ventanensis*. En las laderas altas predominan las gramíneas como *Melica brasiliana*, *Stipa pampeana* y *Phalaris angusta*, que se presentan en manchones aislados debido a los numerosos y extensos afloramientos rocosos presentes. En las laderas bajas las gramíneas se asocian con *Piptochaetium* sp. La vegetación de las cimas de los cerros es muy pobre, de porte bajo y con pocos representantes, entre ellos *Plantago bismarckii* y algunos líquenes como *Usnea hiceronymi*. La vegetación arbustiva de esta zona la conforman las especies *Grindelia buphtalmoides* y *Berberis ruscifolia*. La vegetación nativa ha sido completamente modificada como consecuencia de la explotación agropecuaria. Debido a estas actividades

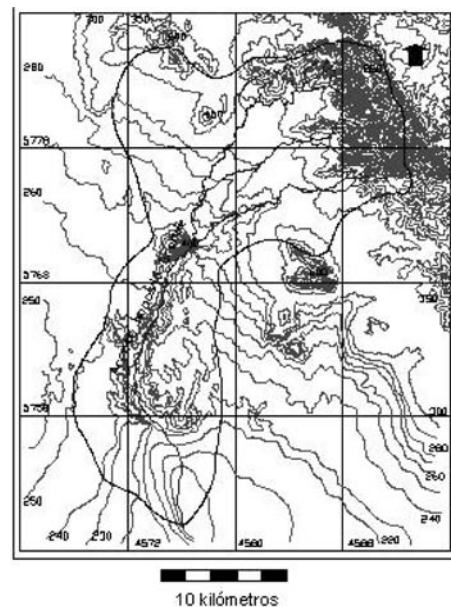


Figura 3. Mapa topográfico de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande. Equidistancia: 10 m.

Figure 3. Topographic map of the Napostá Grande stream's upper basin. Equidistance: 10 m.

se introdujeron especies que se implantan en sitios de pastizal y de altura (*Triticum secale*, *Triticum hordeum*, *Trifolium repens*, *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata* y *Festuca alta*).

La distribución de las especies arbóreas es escasa y está localizada en cascadas de estancias, representada como cortinas y montes (de reparo, de abrigo y ribereños). Las especies aclimatadas de coníferas son *Pinus halepensis*, *Pinus radiata*, *Cedrus deodara*, *Cedrus atlántica*, *Cupressus lusitánica* y *Juniperus communis*. Entre las especies latifoliadas se encuentran *Robinia pseudoacacia*, *Salix* sp., *Ulmus pumila*, *Populus alba*, *Populus nigra*, *Eucalyptus viminalis* y *Celtis australis*.

Diagnóstico cuantitativo

La cuenca se dividió en cuatro subcuencas identificadas como Unidades de Manejo y Gestión (UMG) y definidas por las características hidrológicas y topográficas (Mintegui Aguirre & López Unzu 1990). A partir de datos de campo se determinó el número hidrológico ponderado por superficie de cada UMG. El diagnóstico cuantitativo se inició por la aplicación del modelo hidrológico HYMO 10 (Fernández et al. 1984) para estimar el caudal líquido y evaluar el fenómeno torrencial en cada UMG para un aguacero de 132 mm de 8 h de duración, de un ciclo de 30 años y representativo de la región. Posteriormente se estimó el caudal sólido con el método *USLE* y se utilizó su extensión a cuencas hidrográficas de pequeñas dimensiones (*MUSLE*) para determinar la cantidad de sedimentos emitidos en la cuenca. Las etapas del diagnóstico cuantitativo se describen a continuación.

Descripción del trabajo de campo. Las UMG de la cuenca del arroyo Napostá permitieron unificar y limitar el escurrimiento superficial. Dichas unidades fueron relevadas a campo sobre diferentes aspectos temáticos

(e.g., vegetación, drenaje, suelo, geología, relieve, exposición de ladera y socio-económico), los cuales fueron ingresados en la base de datos digital. Posteriormente se realizó un análisis de las características morfológicas de cada UMG a través de la determinación de superficie (km²), desnivel altitudinal (m), forma, pendiente (%) y longitud del curso de agua (m). Mediante imágenes satelitales Landsat 5 TM 225-086 (años 1994 y 1998) y fotografías aéreas (1995), se realizó un reconocimiento de la vegetación y del uso del suelo, de la hidrografía y de características topográficas del paisaje, corroborando la base de datos creada a partir de datos del sitio.

Número hidrológico. El Servicio de Conservación de Suelos de Estados

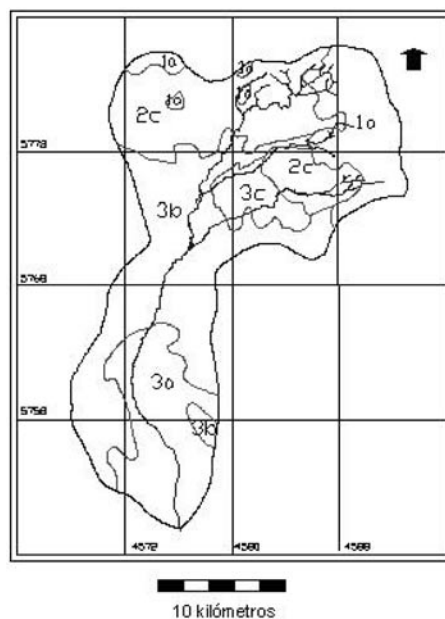


Figura 4. Mapa de suelos de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande. 1a: Hapludol lítico franco fino en asociación con roca; 2c: Argiudoles fase inclinada y Argiudoles de familia fina, someros, en asociación con Hapludol petrocálcico; 3a: Haplustoles en asociación con Argiustol; 3b: Haplustoles énticos; 3c: Haplustoles líticos.

Figure 4. Soil map of the Napostá Grande stream's upper basin. See codes in the legend above.

Unidos estableció una clasificación de los complejos hidrológicos suelo-vegetación a los que asignó una condición de infiltración. Ésta define el comportamiento de la cuenca con relación a un aguacero y su capacidad de producir escorrentía (Mintegui Aguirre & López Unzú 1990; López Cadenas de Llano 1998). El diagnóstico cualitativo por medio de la cartografía de suelos y de cobertura vegetal caracterizó la condición de infiltración y el Número Hidrológico, considerando valores ponderados para cada UMG.

Modelo hidrológico. El modelo HYMO 10 es un modelo matemático de lluvia-escorrentía para cálculos hidrológicos de crecientes en cuencas pluviales. Permite el estudio racional y eficiente de la hidrología de cuencas sin registros de aforo por medio de la simulación del sistema hidrológico ante el fenómeno lluvia-escorrentía (Fernández et al. 1984; Mintegui Aguirre y López Unzú 1990). El HYMO 10 calcula los hidrogramas de escurrimiento suponiendo la linearización del proceso físico real (i.e., mediante el método del hidrograma unitario), realiza el cálculo de curvas de aforo mediante la ecuación de Manning y el avance de crecida en arroyos y ríos según las características morfológicas de la cuenca. También determina la escorrentía de cada UMG (en mm y en hm^3), el caudal pico (m^3/s), el tiempo al pico del hidrograma (h) y el hidrograma unitario.

Ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Para la estimación de caudales sólidos se utilizó la ecuación de Wischmeier y Smith (Wischmeier & Smith 1978; Vich 1989; Mintegui Aguirre & López Unzú 1990, López Cadenas de Llano 1998), cuya expresión es: $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$, donde A son las pérdidas de suelo por erosión hídrica superficial ($\text{tn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$), R es el índice de erosión pluvial ($\text{J} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), K es el índice de erosionabilidad del suelo ($\text{tn} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), L es la longitud de pendiente, S es el gradiente de pendiente, C es la ordenación de cultivos y P las prácticas de cultivo. Los cuatro últimos parámetros son adimensionales. La determinación de cada una de estas variables fue obtenida a partir de datos tomados a campo y de su procesamiento por medio del sistema de información geográfica para cada UMG.

Ecuación universal de pérdidas de suelo modificada (MUSLE). Para determinar la cantidad de sedimentos emitidos en las subcuencas hidrográficas (Mintegui Aguirre & López Unzú 1990) se utilizó la siguiente expresión: $Y = 11.8 \times (Q \times q)^{0.56} \times K \times L \times S \times C \times P$, donde Y corresponde a los sedimentos emitidos por una tormenta aislada (tn), Q es el volumen de escorrentía (m^3) y q es el caudal instantáneo máximo (m^3/seg). Los dos últimos parámetros provienen de los resultados obtenidos en la aplicación del modelo HYMO 10.

Tabla 1. Superficie (km^2), número hidrológico, pendiente (%) y longitud del curso (km) de cada Unidad de Manejo y Gestión (UMG) de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande.

Table 1. Surface (km^2), hydrological number, slope (%) and length of the stream (km) of each Management and Administration Unit (UMG) in the Napostá Grande stream's upper basin.

| UMG | Superficie | Número hidrológico | Pendiente | Longitud |
|-----|------------|--------------------|-----------|----------|
| 1 | 90.31 | 79 | 11.8 | 20.54 |
| 2 | 39.25 | 73 | 13.7 | 17.06 |
| 3 | 43.81 | 71 | 21.8 | 17.54 |
| 4 | 236.88 | 68 | 5.0 | 22.57 |

RESULTADOS

El arroyo Napostá Grande nace sobre el cerro homónimo, en la zona media del cordón serrano de Ventania. El plegamiento es muy intenso hacia la alta cuenca (UMG 1 y UMG 2), presentando un relieve formado por crestas agudas. La cuenca de recepción de los tributarios al pasar a la garganta forma profundos cañadones que limitan cerros de elevaciones considerables con relación a los lechos; tal característica está vinculada al marcado control estructural que ha impedido la divagación de los cursos iniciales de agua, integrando de esta manera cursos receptores que han socavado las areniscas compactas que descienden del cordón de sierras y vuelcan sus aguas en el tercio superior del curso. Esta topografía abrupta obstaculiza en gran medida el recorrido de la cuenca.

En la parte baja de la cuenca (UMG 3 y UMG 4), el relieve muestra lomadas chatas y tendidas en transición gradual a la llanura que circunda el paisaje serrano; no obstante, presenta pendientes pronunciadas sobre las márgenes del arroyo, que sumadas a la influencia de fuertes vientos y al carácter arenoso del suelo, estimula la presencia de erosión superficial hídrica y eólica. Esto se ve acentuado por el laboreo primario que se realiza en estas tierras que se dedican a la agricultura, ya que la convergencia de este factor fisiográfico y la mayor profundidad del suelo permite la instalación de cultivos.

El método de diagnóstico de degradación ambiental aplicado permitió obtener valores cualitativos y cuantitativos de erosión hídrica superficial de la cuenca del arroyo Napostá Grande. El análisis ajusta los procedimientos cualitativo y cuantitativo en forma verosímil y precisa desde el punto de vista analítico. En la elaboración del trabajo, se confeccionó un modelo cartográfico cuyo procesamiento

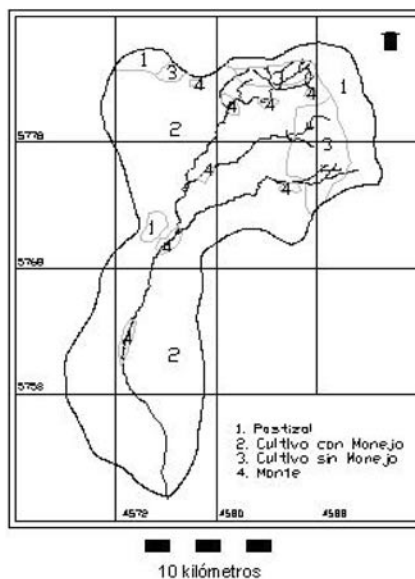


Figura 5. Mapa de vegetación y de uso del suelo de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande. 1: pastizal natural; 2: cultivo con manejo agrícola; 3: cultivo sin manejo agrícola; 4: monte forestal.

Figure 5. Vegetation and soil use map of the Napostá Grande stream's upper basin. See number codes in the legend above.

se realizó con el sistema de información geográfica, con una secuencia de mapas de distinto orden.

Mapas básicos de primer orden

Drenaje. Identificación de los cursos de agua que forman parte de la red de drenaje del área de estudio a partir de datos tomados a campo, de una imagen satelital Landsat 5 TM 226/86 y de cartografía topográfica del Instituto Geográfico Militar (1970).

Unidades de Manejo. Se realizó una identificación y demarcación de cada UMG a partir de las divisorias de agua superficiales (Figuras 1 y 2).

Topográfico. Digitalización de las curvas de nivel de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (1970). Por medio de un procesamiento digital posterior se obtuvieron los mapas de pendiente y exposición de ladera.

Edáfico. Reconocimiento de los cinco tipos de suelos descriptos cualitativamente según el dominio edáfico (Figura 4).

Geológico. Identificación de los grupos Trocadero, Mascota, Bravard, Napostá, Providencia, La Lola y formaciones del Pleistoceno y Holoceno según detalle cualitativo.

Vegetación y uso del suelo. Observación e identificación de las clases de mayor interés a partir de la caracterización cualitativa a campo y por reconocimiento en fotografías aéreas e imágenes satelitales (Figuras 1 y 5). Las clases fueron: pastizal natural (que ocupa el 12% de la cuenca); zonas de cultivo con prácticas de manejo agrícola (64%); zonas con manejo silvícola y pastoril, sin manejo agrícola (11%) y montes forestales (13%).

Mapas de segundo orden

Grupo hidrológico. Obtenido por la superposición cartográfica de los mapas geológico y edáfico, identificando el tipo de infiltración que presenta la cuenca.

Número hidrológico. Procesado por álgebra de los mapas de vegetación y uso del suelo y el de infiltración, conformado por una matriz de superposición.

Mapas de tercer orden

Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica. Resultado final del modelo cartográfico, surge de la transposición del mapa de número hidrológico y el de pendiente, aplicando el sistema de información geográfica. La clasificación cruzada de esta cartografía generó una tabla de datos agrupados en 10 clases donde se asignaron los valores de erosionabilidad del suelo. Las categorías, denominadas como alta y baja a partir de su tendencia a la pérdida de suelo, fueron subdivididas cada una en cinco subcategorías: (1) muy alta, (2) alta, (3) moderadamente alta, (4) medianamente

alta, (5) débilmente alta, (6) débilmente baja, (7) medianamente baja, (8) moderadamente baja, (9) baja, y (10) muy baja (Figura 6).

A partir de este modelo cartográfico se identificaron sitios con erosión hídrica alta (UMG 1, UMG 2 y UMG 3), debido a las pendientes abruptas del terreno y a la presencia de material erosionable sobre las llanuras que ascienden por sobre las laderas de la sierra. En esta zona hay sitios donde se están implementando medidas de conservación y protección del suelo, destacándose los cultivos en terrazas y cortinas forestales de salicáceas y pináceas. Debido a esta protección, la categoría alta se representa en su rango mínimo. En la cuenca inferior (UMG4), los suelos son muy sueltos y hay fuertes vientos, lo cual provoca erosión eólica

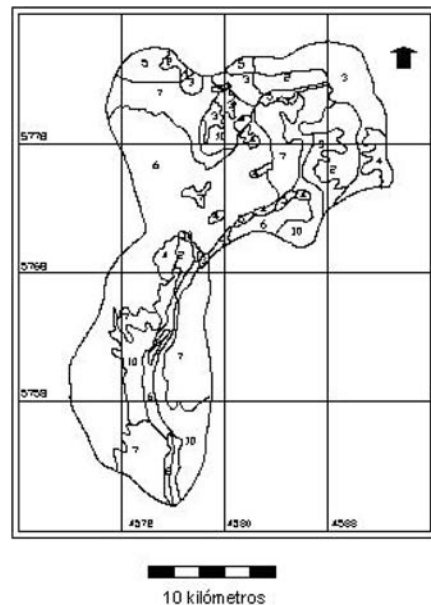


Figura 6. Mapa de diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande. 1: muy alta; 2: alta; 3: moderadamente alta; 4: medianamente alta; 5: débilmente alta; 6: débilmente baja; 7: medianamente baja; 8: moderadamente baja; 9: baja; 10: muy baja.

Figure 6. Diagnosis map of environmental degradation for hydric erosion of the Napostá Grande stream's upper basin. See number codes in the legend above.

Tabla 2. Valores de erosionabilidad del suelo (K ; $\text{tn.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), del producto de la longitud de pendiente (L) y el gradiente de pendiente (S), de ordenación de cultivos (C), de prácticas de cultivo (P), de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial (A ; $\text{tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$), y nivel de erosión hídrica de cada Unidad de Manejo y Gestión (UMG) de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande.

Table 2. Soil erodibility (K ; $\text{tn.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), product of slope length (L) and slope steepness (S), cover management (C), support practice (P), soil loss by superficial hydric erosion (A ; $\text{tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$), and hydric erosion level of each Management and Administration Unit (UMG) in the Napostá Grande stream's upper basin.

| UMG | K | $L \times S$ | C | P | A | Erosión hídrica |
|-----|------|--------------|------|------|-------|-----------------|
| 1 | 0.43 | 0.92 | 0.20 | 0.63 | 15.30 | Moderada |
| 2 | 0.50 | 0.87 | 0.19 | 0.79 | 20.05 | Moderada |
| 3 | 0.42 | 0.74 | 0.21 | 0.92 | 18.43 | Moderada |
| 4 | 0.40 | 0.58 | 0.25 | 0.51 | 9.08 | Ligera |

que representa el problema más grave, dejando en segundo plano a la erosión hídrica. Esta última se manifiesta en un nivel bajo en forma puntual por la existencia de cárcavas y regueros sobre los barrancos, y en forma zonal por la aplicación de medidas conservacionistas sobre el manejo agrícola del suelo, representadas en el número hidrológico y en el mapa de vegetación y uso del suelo (Tabla 1 y Figura 5).

La determinación cuantitativa de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial se determinó con la *USLE* para la cuenca y para cada UMG, en forma comparable y verificable con la cartografía digital (Tabla 2). El factor de índice de erosión pluvial (R) se consideró en forma regional para toda la cuenca ($307 \text{ J.cm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), según la estimación realizada por Rojas & Conde (1985). El valor de K se determinó a partir de cartografía, muestras de suelo y de datos tomados a campo. Los factores L , S , C y P fueron obtenidos a partir de la procesamiento digital de la base de datos cartográfica. El resultado final de pérdida de suelo superficial (A) representa las superficies afectadas por diferentes grados de erosión. Se estableció un barremo definiendo cuatro niveles: (1) $< 10 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, que indica un grado de erosión hídrica ligera; (2) $10-50$

$\text{tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, erosión con una incidencia moderada sobre el sitio; (3) $50-200 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, pérdida de suelo superficial alta; y (4) $> 200 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, erosión muy alta (Tabla 2).

Los resultados obtenidos presentan una evaluación de la pérdida de suelo superficial (ponderada por superficie) de tipo moderado en las subcuencas altas (UMG 1, UMG 2 y UMG 3). Esto indica y corrobora que el índice de protección del suelo, que es ajustado según la vegetación presente en el lugar (cultivo, pastizal y monte) y por el gradiente y longitud de la pendiente, es un factor de elevada incidencia sobre la erosión. Al aumentar la pendiente del terreno hasta un límite superior a 18% , el índice de protección del suelo disminuye, induciendo a incrementar el fenómeno de erosión superficial y consecuente pérdida de suelo arable (FAO-PNUMA-UNESCO 1981). La presencia de monte favorece la retención del suelo, dato reflejado en forma puntual en la UMG 1. En la subcuenca baja (UMG 4) se establece un nivel de erosión ligera, debido a la baja pendiente y a las características edáficas y geomorfológicas más tolerantes (Tabla 2 y Figuras 3 y 4).

La aplicación del modelo HYMO 10 permitió la determinación del caudal de escurrimiento y el caudal líquido pico

Tabla 3. Caudales de escurrimiento (q ; m^3) y líquido (Q ; m^3/seg), cantidad de sedimentos emitidos para un aguacero concreto (Y ; tn) y profundidad de suelo perdido (y ; mm/ha) de cada Unidad de Manejo y Gestión (UMG) de la alta cuenca del arroyo Napostá Grande.

Table 3. Glide (q ; m^3) and liquid (Q ; m^3/seg) flows, quantity of silts emitted for a concrete cloudburst (Y ; tn), and depth of lost soil (y ; mm/ha) of each Management and Administration Unit (UMG) in the Napostá Grande stream's upper basin.

| UMG | q | Q | Y | y |
|-----|----------|-------|---------|--------|
| 1 | 19506.96 | 115.2 | 2120.45 | 0.0196 |
| 2 | 5769.75 | 58.9 | 964.42 | 0.0205 |
| 3 | 5563.87 | 47.8 | 564.19 | 0.0107 |
| 4 | 23924.88 | 37.9 | 756.96 | 0.0027 |

sobre los cursos principales. La emisión de sedimentos totales caracteriza la cantidad de toneladas de suelo transportadas fuera de la cuenca y los milímetros de suelo perdidos por hectárea bajo la ocurrencia de una tormenta torrencial, como la aplicada en el presente trabajo. Como se advierte en la Tabla 3, el caudal líquido en la UMG 1 supera por el doble al de la UMG 2 y la UMG 3, y triplica al de la UMG 4, estableciéndose una alta correlación con la insuficiente cobertura vegetal y altas pendientes, que provocan un aumento de volumen y velocidad del caudal líquido y, por consiguiente, un progresivo transporte de sedimentos y erosión hídrica superficial (Figura 6).

De acuerdo a López Cadenas de Llano (1998) y a Mintegui Aguirre & López Unzú (1990), la evaluación de tolerancias de pérdidas de suelos para situaciones de cultivos en zonas fértiles y suelos profundos depende de las características del perfil edáfico superior por unidad de tiempo. Para suelos agrícolas, profundos y de textura media (como la cuenca estudiada), las pérdidas admisibles máximas se dan en valores de $12.5 \text{ tn} \cdot \text{ha} \cdot \text{año}^{-1}$. Estos datos son obtenidos cuantitativamente con la *USLE*, revelando que la UMG 4 integra este rango de tolerancia y el resto de la

cuenca está en condiciones críticas con relación a la tolerancia agrícola (Figuras 5 y 6 y Tabla 3), fundamentalmente por la vegetación, el uso del suelo y las características topográficas extremas.

DISCUSIÓN

La aplicación del método para el diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica superficial con el sistema de información geográfica en cuencas hidrográficas permitió identificar sitios de la cuenca donde se deben implementar medidas de rehabilitación y ordenación. Las mismas estarían dirigidas a objetivos concretos como la restauración de terrenos agrícolas degradados, la repoblación forestal y las prácticas adecuadas de cultivo, así como a la adopción de medidas biológicas para conservar los ecosistemas, la recuperación de la cubierta vegetal y el aprovechamiento racional de la tierra, considerando la influencia del núcleo urbano, de las zonas de recreación y de las vías de comunicación.

Las herramientas disponibles actualmente (sistema de información geográfica, imágenes satelitales, fotografías aéreas, procesadores de información) y la cartografía base contribuyen a la precisión del diagnóstico. Las técnicas cualitativas y cuantitativas son complementarias en la definición de parámetros y en la aplicación de un método para el relevamiento y procesamiento digital. La vinculación de ambas técnicas es beneficiosa para un correcto diagnóstico y para un potencial plan de manejo, de recuperación y de protección de cuencas hidrográficas.

Los datos de pérdidas del perfil superior calculados en este estudio se deben a una tormenta concreta de una duración de 8 h (HYMO 10, MUSLE), la cual puede extrapolarse a otras de igual duración y diferente intensidad. Los

resultados corresponden a un momento puntual (tormenta pico de un período de 31 años), cuando se estiman en forma provisional y potencial los indicadores de erosión hídrica superficial. La identificación de sitios particulares en donde el valor de tolerancia a la pérdida de suelo es superado permite inferir la importancia de la implementación de medidas de conservación del suelo y de manejo del recurso hídrico en forma conjunta, debido principalmente a las características topográficas y de vegetación y uso del suelo. La aplicación de este método (MUSLE y sistema de información geográfica) requiere de un control y de un seguimiento temporal de los diferentes parámetros que implica.

BIBLIOGRAFÍA

- CUSTODIO, E & MR LLAMAS. 1996. *Hidrología subterránea*. Ed. Omega. Barcelona.
- DOMÍNGUEZ, O & E CARBALLO. 1988. *Inundaciones en la provincia de Buenos Aires*. Publicaciones de FECIC 326-351. FECIC. Buenos Aires.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1981. *Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO, PNUMA y UNESCO. Roma.
- FERNÁNDEZ, PC; JA MAZA & LA FORNERO. 1984. *Modelo HYMO 10*. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, Centro Regional Andino. Mendoza.
- FRANGI, J & O BOTTINO. 1995. Comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata* 71:93-133.
- HARRINGTON, H. 1946. *Carta Geológica-Económica de la República Argentina. Sierra de la Ventana - Provincia de Buenos Aires. Hoja: 34 m*. Escala 1:200.000. Vol. 61. Dirección de Minería y Geología. Buenos Aires.
- HARRINGTON, H. 1947. *Explicación de la carta geológica 34 m (Sierra de la Ventana)*. Prov. Bs. As. Vol. 61. Dirección de Minería y Geología. Buenos Aires.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR. 1970. *Cartas topográficas de Tornquist (Hoja 3962-5-3), Tres Picos (Hoja 3963-5-4) y Estación Napostá (Hoja 3963-11-2), de la Provincia de Buenos Aires*. Escala 1:50.000. Instituto Geográfico Militar. Buenos Aires.
- INTA-CASTELAR. 1989. *Descripción y carta de suelo de Sierra de la Ventana. Provincia de Buenos Aires*. Cap. 4.1:43-55. Escala 1:500.000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. 1998. *Restauración hidrológico forestal en cuencas y control de erosión*. Ed. Tragsa-Tragsatec-Mundi Prensa. Madrid.
- MINTEGUI AGUIRRE, JA & F LÓPEZ UNZÚ. 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Madrid.
- ROJAS, A & A CONDE. 1985. Estimación del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo* 3:85-94.
- RUGGIERO, R & H CONTI. 1988. *Síntesis climática*. Publicaciones de FECIC 25-45. FECIC. Buenos Aires.
- SALA, JM; N GONZALES & E KRUSE. 1983. Generalización hidrológica de la Provincia de Bs. As. Pp. 973-1010 en: *Seminario de hidrología de grandes llanuras. Vol. 2*. UNESCO y CONA-Phi. Olavarría.
- TRICART, JL. 1973. *Geomorfología de la Pampa Deprimida*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires.
- VICH, AIJ. 1989. Erosión hídrica: estimación y medición de pérdidas de suelo. Pp. 118-130 en: FA Roig (ed). *Seminario latinoamericano sobre detección y control de la desertización*. CRICYT. Mendoza.
- WISCHMEIER, WH & DD SMITH. 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook Nº537. Washington D.C.