

# El umbral de resiliencia del paisaje en el proceso de desertificación de los valles preandinos de Catamarca (Argentina)

Sayago, José M.<sup>1,2</sup>; Mirian M. Collantes<sup>1</sup>; Adriana Niz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociencias y Medio Ambiente (INGEMA). Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205, (4000) Tucumán, Argentina. E-mail: jmsayago@arnet.com.ar; mcollantes@arnet.com.ar

<sup>2</sup> CONICET.

<sup>3</sup> Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental (INCODEG). Universidad Nacional de Catamarca. aniz@arnet.com.ar

► **Resumen** — Durante las cuatro últimas centurias los valles preandinos del noroeste argentino sufrieron un severo proceso de desertificación producto del uso incontrolado de las tierras, especialmente la deforestación y el sobrepastoreo. La intensidad alcanzada por la degradación plantea interrogantes sobre la posibilidad (o no) de obtener una producción agrosilvopastoril sustentable y, correlativamente, sobre la capacidad de obtener la recuperación del paisaje en el corto o mediano plazo. En los valles de Abaucán y Santa María, áreas muestras que tipifican las condiciones de la región árida preandina del noroeste de Argentina, se analizaron los factores causales y la evolución histórica del proceso de desertificación y si tal proceso ha excedido la capacidad de recuperación o resiliencia del ecosistema. En el valle de Abaucán la intensidad de la erosión en laderas y piedemonte y el consecuente aporte al drenaje superficial explican los cambios en el diseño o “metamorfosis” del río Abaucán, sumándose a ello la pobre o nula recuperación temporal de la cobertura vegetal (especialmente en los niveles pedemontanos cubiertos por *Larrea sp*), sugiriendo una disminución en la capacidad de resiliencia del paisaje. En el valle de Santa María la evaluación del riesgo erosivo en diferentes unidades de relieve, expresado en pérdida de suelo en Tn/Has/Año, validado por la nula respuesta estacional de la cobertura vegetal, permitió inferir que en el piedemonte distal y la terraza fluvial baja, el paisaje habría alcanzado el “tipping point” o punto de colapso del ecosistema. Considerando que, dentro de la región árida de los valles preandinos coexisten diferentes intensidades de deterioro paisajístico, se aconseja una evaluación de su cercanía (o lejanía) al umbral de resiliencia, condición necesaria para determinar su sostenibilidad productiva, especialmente frente a los futuros cambios climáticos.

**Palabras clave:** Desertificación, resiliencia ecosistémica, cambios climáticos.

► **Abstract** — “The landscape resilience threshold in the desertification process of the pre-Andean valleys of Catamarca (Argentina)”. During the last four centuries the preandean valleys in northwestern Argentina suffered a severe process of desertification product of uncontrolled landuse, specially deforestation and overgrazing. The intensity of land degradation raises questions on the possibility (or not) of obtaining a sustainable future “agrosilvopastoril” production and, correlatively, on the aptitude to obtain the recovery of the landscape in the short or medium term. In Abaucán and Santa Maria valleys, sample areas that typify the conditions of the preandean arid region of northwestern Argentina, the causal factors and the historical evolution of the process of desertification were analyzed and if such a process has exceeded the capacity of recovery or resilience of the ecosystem. In Abaucán valley the intensity of the erosion in hillsides and piedmonts and the consistent contribution to the superficial drainage explain the changes in the fluvial pattern or “metamorphosis” of the Abaucán river. Additionally, the poor temporary recovery of the vegetation cover (specially in the piedmont levels covered by *Larrea sp*), suggests a decrease in the capacity of resilience of the landscape. In the Santa Maria valley, the evaluation of the erosive risk in different units of relief, expressed in loss of soil in Tn/Has/Year, validated by the null seasonal response of the vegetation cover allowed to infer that in the distal piedmont and the fluvial low terrace, the landscape would have reached “tipping point” or point of collapse of the ecosystem. Since different intensities of landscape deterioration coexist in the arid areas of the preandean

valleys, an evaluation of the nearness (or distance) to the threshold of resilience is advised, a necessary condition to determine its productive sustentation, especially under the perspective of future climate changes.

**Keywords:** Desertification, ecosystem resilience, climate change.

## INTRODUCCIÓN

*“La elección de un futuro que “vale la pena”: Gente Resiliente, Planeta Resiliente”*  
(Panel sobre sostenibilidad  
de Naciones Unidas)

La región preandina de la Provincia de Catamarca integra el enorme territorio árido del noroeste argentino -antaoño ocupado por culturas agroalfareras durante el periodo Formativo (3000-1000AP) (Caria *et al.*, 2001), que constituye hoy un espacio geográfico con pobre presencia humana (a excepción de los llamados “oasis de riego”), cuyo destino productivo desde la perspectiva agropecuaria es incierto. La población local, descendiente directo de las culturas prehispanicas, ha perdido la rica tradición en el manejo de suelo y agua, reflejado en innumerables sitios arqueológicos, andenes de cultivos y/o corrales destinados a la ganadería de camélidos (González y Núñez Regueiro, 1960; Sayago y Niz, 2001). La intensidad de la desertificación plantea interrogantes sobre la capacidad de recuperación o resiliencia de los ecosistemas frente a esta situación o cualquier otro disturbio (incendio, cambio climático, acción antrópica, etc.), que modifique su inestable equilibrio. Si tal condición se cumpliera, cuestionaría la posibilidad de alcanzar una producción agropecuaria sostenible de cara al futuro. Adicionalmente, las posibilidades productivas de esta región desde la perspectiva de los cambios climáticos, debieran considerar el llamado “tipping point” (Scheffer, 2010), efecto que implica un cambio brusco o catastrófico de los ecosistemas, al superarse la capacidad de recuperación o resiliencia del paisaje. En el presente trabajo se analizan los factores causales y efectos de la desertificación en los valles preandinos de la provincia de Catamarca, intentándose detectar en el valle de Abaucán (mediante evidencias geomórficas,

edáficas y bióticas) si la intensidad de la degradación ha superado (o no) el “umbral de resiliencia”. En el valle de Santa María se plantea una aproximación metodológica (preliminar y tentativa) para detectar la tendencia del paisaje o ecosistema hacia el “tipping point” o punto de colapso y, consecuentemente, determinar diversas alternativas productivas frente a las condiciones climáticas actuales o los cambios futuros.

## MÉTODOS

El análisis de los factores de la desertificación en valle del río Abaucán se efectuó desde una perspectiva interdisciplinaria, incluyendo el comportamiento del clima, la dinámica vegetal, los procesos erosivos y las modificaciones en la dinámica fluvial. Los datos pluviométricos fueron obtenidos de Bianchi y Yáñez (1992) y Niz (2003), la evolución histórica de la cobertura vegetal, se efectuó mediante el análisis multitemporal de fotografías aéreas y controles de campo en áreas muestras, representativas de diferentes complejos dunarios (Niz, 2003). El mapeo del avance temporal del cárcavamiento y su relación con la dinámica pluvial se efectuó siguiendo los criterios aconsejados por Van Zuidam y Van Zuidam-Cancelado (1978) y la cuantificación de las relaciones entre aporte de sedimentos y modificaciones en las relaciones geométricas del río Abaucán en base a los criterios de Schumm (1977). La descripción de los caracteres edáficos se efectuó siguiendo los criterios de FAO y Birkeland (1999). En relación al valle de Santa María en la evaluación de las relaciones entre desertificación, resiliencia del paisaje y el “tipping point se tuvieron en cuenta los conceptos de Scheffer (2010). Para la determinación del umbral de resiliencia se aplicó la Ecuación universal de pérdida de suelos (Wischmeier y Smith, 1978) con las modificaciones introducidas

por Sayago (1985) para adaptarla a las condiciones regionales. La validación del riesgo erosivo se efectuó evaluando la variación estacional de cobertura en cada unidad geomorfológica, en base al cálculo del factor "C" de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en estaciones húmeda y seca. En la interpretación de los procesos de erosión hídrica y las modificaciones edáficas se siguieron los conceptos de Bergsma (1986) y Birkeland (1999). La sectorización geomorfológica y la toposecuencia construida en la ladera oriental del valle se basaron en los criterios de Verstappen (1983).

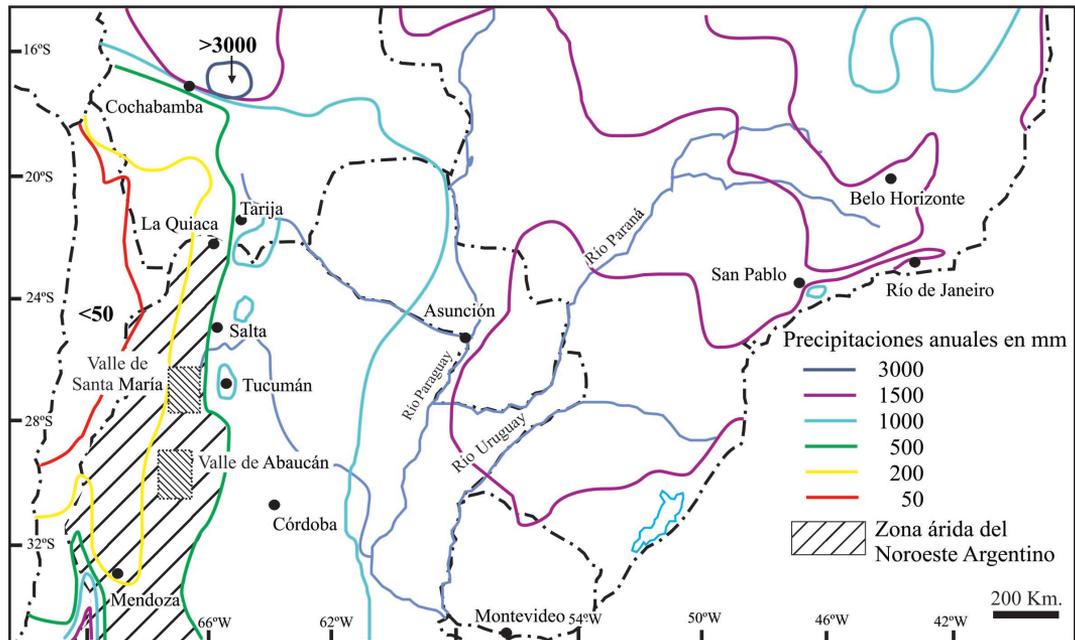
#### CARACTERÍSTICAS REGIONALES

La aridez de los valles preandinos de la Provincia de Catamarca se origina en la disminución del gradiente pluviométrico este-oeste, generado en el anticiclón del Atlántico Sur, sumado al proceso adiabático de "sombra lluvia" sobre los cordones preandinos del NOA (Bianchi y Yáñez, 1992) (Figura 1). Precisamente, los cordones de rumbo meridiano (Ambato, Ancasti, Aconquija), muestran en su perfil asimétrico (abruptas laderas occidentales en contraste con suaves pendientes de reverso), el característico estilo tectónico pampeano, cubiertas por vegetación boscosa. El relieve de valles y bolsones refleja la presencia de núcleos de basamento circundados por varios niveles pedemontanos, labrados sobre sedimentos terciarios y cuaternarios. Asimismo, la circulación atmosférica regional explica también las condiciones ecosistémicas de la región, que transitan desde el ambiente del Bosque chaqueño al este, a las condiciones xerofíticas del Monte en los valles y bolsones y, finalmente, la Estepa Altoandina y puneña, en las áreas cumbrales y el altiplano (Cabrera, 1976). Desde el punto de vista paleoclimático, el paisaje árido-semiárido se instala a comienzos del primer milenio, contemporáneamente con la extremada aridez del Periodo Medieval Cálido (Garralla, 1999; Caria y Garralla, 2003). No obstante, para explicar el actual estado de desertificación debe aceptarse tanto la influencia de la variabili-

dad climática como la del hombre. Así, a la llegada del conquistador español Francisco de Almagro, un cronista integrante de tal expedición, expresaba que la densidad de los bosques de Algarrobo que cubrían los valles preandinos de Abaucán y Santa María hacían dificultoso el tránsito de la expedición española (Niz, 2003). No debe olvidarse, que durante el Periodo arqueológico Formativo (aprox. 3000-1000 AP) estos valles estuvieron ocupados por miles de pobladores que han dejado su impronta en innumerables sitios arqueológicos, evidenciando un excelente manejo de suelo y agua, claramente adaptado a las condiciones climáticas, geomórficas y edáficas del área (González y Núñez Regueiro, 1960; Sayago y Niz, 2001). Posteriormente, al inicio del periodo colonial, el área de estudio constituyó el lugar de tránsito de enormes tropas de ganado vacuno y caballar, con destino a las explotaciones mineras de Chile, Bolivia y Perú, iniciando así un proceso de intenso degradamiento del paisaje, primero, a través de la deforestación, seguido luego por la progresiva desaparición de pasturas naturales (reemplazadas por especies xerofíticas) en respuesta al sobrepastoreo (Niz, 2003). Durante los siglos restantes, el proceso se prolonga con la llegada del ferrocarril y las principales carreteras, provocando la definitiva desaparición de los bosques nativos. Esta verdadera metamorfosis del paisaje, provocó también la migración de la población nativa hacia los centros urbanos de la región en busca de mejores condiciones de vida. En suma, la situación del paisaje actual plantea interrogantes sobre su posible recuperación o resiliencia, tanto bajo las actuales condiciones de clima y manejo o frente a posibles escenarios de cambio climático futuro.

#### LA DESERTIFICACIÓN EN LOS VALLES PREANDINOS

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación (Nairobi 1978) la definió como "la acentuación de las condiciones de aridez como resultado del impacto humano sobre los ecosistemas de regiones áridas o semiáridas, lo cual implica un conjunto de



**Figura 1.** Gradiente pluviométrico Este-Oeste del subtropical sudamericano y región árida del NOA y ubicación de los valles preandinos de Abaucán y Santa María (Modificado de Planchon, 2003).

procesos físicos y antropogénicos que llevan a la pérdida de la productividad”. Para mayor claridad, así como la “desertización” constituye la evolución de una región hacia las condiciones de desierto por causas naturales, la “desertificación” potencia el deterioro de la aptitud productiva de las tierras por acción del hombre. La desertificación de los valles preandinos de Catamarca se ha manifestado de diversas maneras ya que los cambios en la vegetación natural han sido acompañados por intensos procesos erosivos que afectaron especialmente a los suelos, cuyos materiales arrastrados hacia el fondo de los valles fluviales produjeron la modificación en la relaciones geométricas de los sistemas fluviales, reflejados en los cambios de diseño de drenaje de meandriforme a entrelazado (Schumm, 1977). Este proceso, traducido en la dramática disminución de la producción agropecuaria extensiva, exige valorar en qué medida la aptitud productiva de la tierra puede recuperarse o ha sobrepasado el umbral de resiliencia, condición *sine qua non* para alcanzar un desarrollo sosteni-

ble de cara al futuro. En la consecución de este objetivo, los aspectos sociales y económicos tienen un rol crítico, la estratificación social, la pobreza, el nivel educativo de la población, los incentivos productivos, el asesoramiento técnico, etc., tienen un rol fundamental en el diagnóstico y las soluciones a este problema. Sin embargo, debido a la complejidad de la problemática social y económica, en el presente trabajo se enfatiza el análisis de los factores y mecanismos de la desertificación y de su recuperación desde la perspectiva biofísica.

#### EL MARCO CONCEPTUAL

El planeamiento de las tierras rurales en muchos países, especialmente los situados en los trópicos, se vio limitado a principios de la última centuria por la carencia de estudios integrados a pequeña escala que incluyeran información geomórfica, edáfica, fitogeográfica y climática. Un método cartográfico desarrollado por CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Orga-

nization) australiano, fue aplicado en numerosos países desde mediados del siglo XX. El "Land System" es la clasificación científica de un territorio basado en la topografía, los suelos y la vegetación correlacionado con la geología, la geomorfología y el clima (Steward y Perry 1953, citado por Cook y Dornkamp, 1990). En los años subsiguientes un nuevo enfoque de clasificación de tierras desarrollado por autores australianos (Laut *et al.*, 1977) aportó mayor elaboración de las categorías taxonómicas y la incorporación de numerosos factores ambientales, especialmente los bióticos. Aunque orientada hacia los aspectos biofísicos, esta nueva clasificación presentaba ventajas sobre el "land system" en cuanto al volumen de la información obtenible, fidelidad planimétrica e integración a diferentes niveles de complejidad ambiental. Otro enfoque destacable es el de Haase (1976), orientado al estudio de transecciones biogeográficas a partir de la vegetación y el medio físico, seguido de una investigación de carácter ecológico, mediante la localización sobre la transectas de todos los flujos relevados. Finalmente, Sayago (1982), siguiendo en parte las ideas Zonneveld (1983), desarrolla un sistema integrado de clasificación del paisaje basado en el concepto de que clima y relieve son factores dominantes que condicionan a los restantes factores (suelo, vegetación, hidrología, uso del suelo, etc.) con el carácter de dependientes. El sistema contempla aproximaciones sucesivas en el análisis del paisaje según la escala considerada (Provincia, Región, Asociación o Complejo, Unidad y Faceta). Las metodologías citadas son de indudable utilidad en la puesta en valor productivo de regiones extensas, poco antropizadas, analizadas mayormente desde una perspectiva espacial. La carencia de una percepción dinámica o histórica del paisaje, limita sus posibilidades en la posdicción o predicción de las probables modificaciones futuras generadas por los factores biofísicos o antropogénicos y, especialmente, en cuanto a su capacidad de recuperación o resiliencia frente a cambios climáticos u otros disturbios.

#### LA RESILIENCIA DEL PAISAJE

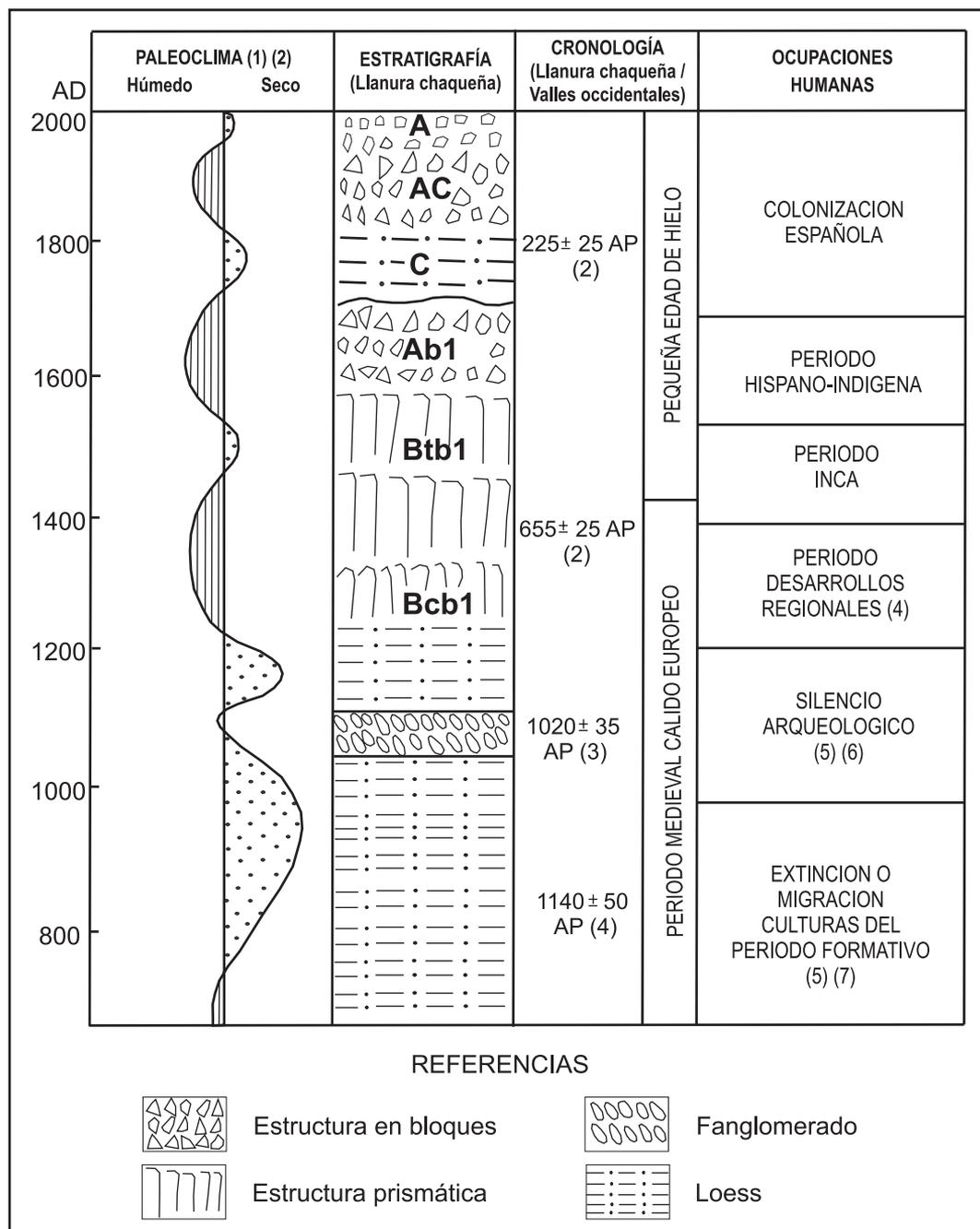
Propuesto en 1935 por A.G. Tansley, el término Ecosistema proviene de la expresión inglesa "ecological system" considerado "una unidad elemental de la biosfera" en la que la resiliencia aparece como un mecanismo homeostático autorregulador del sistema. La resiliencia de un ecosistema, según Begon *et al.* (1987) "describe la velocidad a la cual una comunidad retorna a su estadio primitivo, luego de haber sido perturbado o desplazado de tal estadio". A partir de esta definición podría inferirse que el "retorno a su estadio primitivo" es a la condición "climática" o estadio de equilibrio inestable del sistema. Sin embargo, autores como Di Castri (1980), expresan que "aun antes de la aparición del fenómeno de la hominización sobre la tierra, el equilibrio ecológico o la estabilidad de los ecosistemas estaba lejos de existir". Al margen de que la presencia del hombre hace inviable la existencia de un equilibrio permanente (aun en áreas protegidas), el concepto de resiliencia, basado exclusivamente en aspectos bióticos (el biotopo nunca tiene un rol esencial) presenta limitaciones para reconstruir la evolución de los ecosistemas a través del tiempo. En tal sentido, Tansley (1935) expresa: "El ecosistema en sí está constituido por el complejo orgánico pero también por el propio sistema de factores físicos que constituye lo que llamamos el medio ambiente". Así, la influencia del clima, el relieve y los suelos es obviado, por caso ante cambios climáticos multianuales y seculares o los paleoclimáticos. Imaginemos por caso un cambio climático que transita desde condiciones subtropicales seco-húmedas a una mayor aridez, como el ocurrido frecuentemente en el noroeste del País Argentina desde el último milenio a la actualidad (Sayago *et al.*, 2010) (Figura 2). Con la progresiva disminución pluvial, la densidad y composición vegetal cambia y aumenta la superficie de suelo desnudo generando erosión y sedimentos que llegan a los ríos, lo cual, a su vez, modifica la dinámica fluvial en toda la cuenca (Langbein y Schumm, 1958). Si la aridez se intensifica, los cambios fitosociológicos transitan hacia fisonomías xerofíticas y/o halófitas, menos

complejas, aunque al aumentar la estabilidad disminuyen su capacidad de resiliencia (Begon *et al.*, 1987). Paralelamente, mientras aparecen formas dunarias en la llanura de inundación de los ríos los suelos se erosionan, pierden materia orgánica y estabilidad estructural, contribuyendo a disminuir la capacidad de resiliencia del ecosistema hasta superar el umbral de recuperación. Bajo tales condiciones, repetidas cíclicamente, parecería ilusorio que exista un equilibrio o clímax dentro de una comunidad biótica terrestre, como lo plantea la teoría ecosistémica. A la limitada percepción temporal se suma la espacial, como lo expresa Tricart (1979) al afirmar que “el concepto de Ecosistema no tiene soporte espacial, ya que sus límites son vagos y lábiles”. En tal sentido, importantes biomas como el Bosque de transición o el Bosque chaqueño occidental, prácticamente desaparecidos por deforestación en la provincia de Tucumán, carecen de identidad espacial por la indefinición a nivel sistémico del parentesco entre sus características fitosociológicas, el sustrato geológico, la micro y macro geomorfología y las condiciones intrínsecas y extrínsecas de los suelos. No obstante, no es posible prescindir de la concepción sistémica en la comprensión de la génesis, evolución y colapso de los paisajes áridos, la cual se enriquece con la integración de aspectos espaciales y temporales, en el marco de interrelaciones entre dinámica fitosociológica, evolución edáfica y morfogénesis del relieve. El concepto de resiliencia y la sustentabilidad están directamente relacionados con las influencias en el largo plazo en el perfil de las sociedades, las economías y el sistema humano en su conjunto. Numerosos autores han hecho importantes contribuciones al conocimiento de los sistemas socioecológicos. Sin embargo, la complejidad de las interrelaciones y la carencia de estadísticas socioeconómicas actualizadas, sumado a la dificultad para integrar percepciones de tal carácter nos circunscriben al campo biofísico.

#### EL UMBRAL DE RESILIENCIA

Al analizar la susceptibilidad a la desertificación de las regiones áridas Verstappen

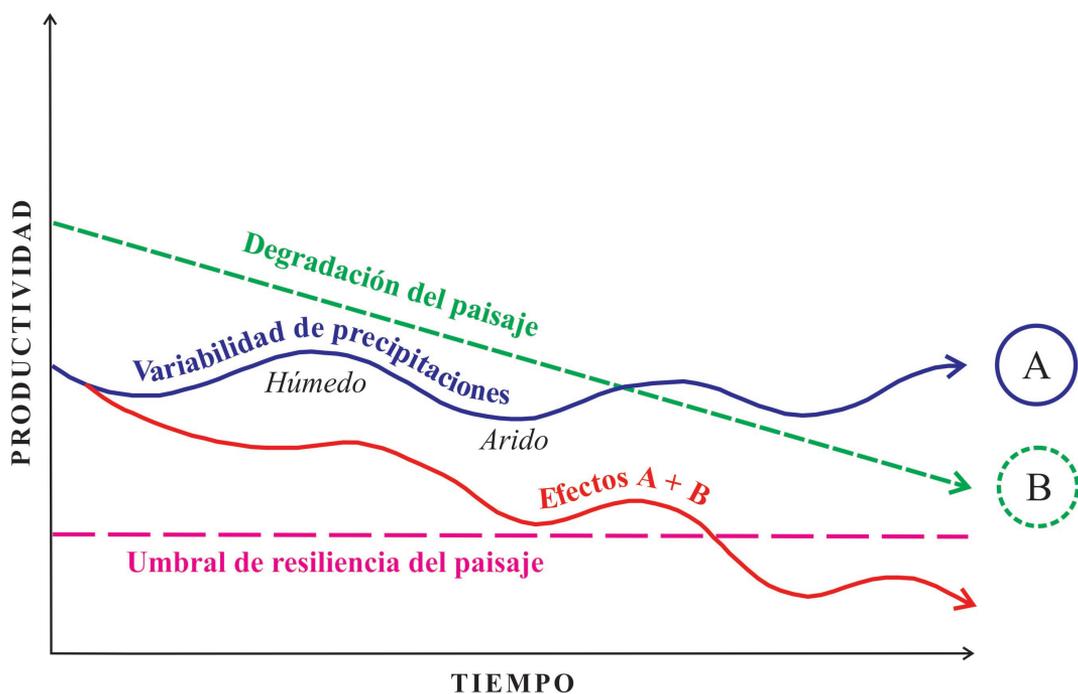
(1983), desarrolla una teoría sobre la relación entre variabilidad climática, degradación antropogénica y desertificación en una región africana. Como se observa en la Figura 3, el progresivo deterioro del paisaje en el tiempo, por influencia del impacto antrópico, bajo una marcada ciclicidad pluviométrica (árido/húmedo), disminuye indefectiblemente la productividad primaria del ecosistema hasta superar un umbral de resiliencia. Ello implica incapacidad de recuperación de la vegetación local e influye directa e indirectamente sobre el nivel de vida de la población. El concepto de umbral, reflejado por la dinámica vegetal presenta complicaciones derivadas de la complejidad de la respuesta fitosociológica ante disturbios de diversa índole (incendios, deforestación, sobrepastoreo, cambio climático, etc.), lo cual dificulta predecir, tanto los cambios en la evolución del ecosistema, como la cercanía o la superación del umbral de resiliencia. Es destacable la existencia de aproximaciones metodológicas basadas en cambios en la auto organización de la vegetación como indicador de proximidad al umbral de resiliencia (Drake y Griffen, 2010). Al respecto, Kefi *et al.* (2007) combinan observaciones de campo y satelitales al estudiar tres ecosistemas mediterráneos, evaluando la influencia de la disminución de lluvias y la presión del pastoreo. Concluyen que “la elevada presión pastoril empuja a los ecosistemas áridos hacia la extinción” y que “la creciente aridez puede conducir a la desertificación en forma discontinua siendo baja la posibilidad de recuperación”. El trabajo de Bailey (2010) constituye también una interesante aproximación al desarrollo de un modelo de simulación que permite evaluar indicadores vegetales que alerten sobre la proximidad de un umbral (threshold) de resiliencia del ecosistema. En suma, expresa que “bajo elevada presión ambiental, los ritmos de recuperación (y los cambios asociados hacia patrones de mayor degradación) decrecen significativamente la resiliencia de la población vegetal ante repetidas perturbaciones”. Estos estudios que constituyen una valiosa aproximación en la comprensión del problema de



**Figura 2.** Relación entre evolución paleoclimática y ocupaciones humanas durante el último milenio en la región subtropical seco-húmeda del noroeste argentino. (1) Prieto *et al.* (1997); (2) Sayago *et al.* (2005); (3) Caria y Garralla (2003); (4) Berberian *et al.* (1998); (5) Sayago *et al.* (2003); (6) Raffino (1998); (7) González (1999) (Tomado de Sayago *et al.*, 2010).

la desertificación y la resiliencia, presentan, sin embargo, limitaciones derivadas de la dificultad para validar las interpretaciones mediante controles y monitoreos sistemáticos en el terreno, a lo cual se suma la no consideración de los aspectos abióticos como la erosión, la degradación edáfica y la morfodinámica, entre otros. Si bien la determinación de un umbral de recuperación de elementos del biotopo, asume similar complejidad que la de los aspectos bióticos, existen conceptos generalmente aceptados sobre los umbrales de cambio en la dinámica geomorfológica y edáfica. Al respecto, Schumm (1977) establece la existencia de un umbral intrínseco y otro extrínseco en la dinámica de un sistema fluvial. El primero, reflejado por ejemplo, en la resección de los meandros, en respuesta a la pérdida de energía y disminución de la pendiente por el crecimiento lateral del lóbulo del meandro. En cuanto al umbral extrínseco, más cercano a la problemática de la desertificación, se produce cuando factores tales como un cambio climático, la defores-

tación en la cuenca, la influencia de la neotectónica o algún evento morfodinámico de magnitud, generan cambios en el aporte de sedimentos a los cauces, que a su vez influyen en las relaciones geométricas del sistema, traducidos en la modificación del diseño de drenaje del sistema fluvial. Asimismo, el umbral edáfico, es definido por Birkeland (1999), como “un límite en la estabilidad de la morfología edáfica que es excedido ya sea por un cambio intrínseco de las condiciones morfológicas, químicas o mineralógicas del suelo o por un sutil pero progresivo cambio en alguno de los factores formadores del suelo”. Si bien estas definiciones constituyen un sustrato conceptual valioso con bases en la realidad, no incluyen indicadores de cercanía o superación del umbral de resiliencia del sistema en el marco del proceso de desertificación. Así, en el análisis de la desertificación de los valles preandinos de Catamarca, que se describe más adelante, se persigue la búsqueda de criterios empíricos tendientes a tal objetivo, desde la perspectiva biofísica,



**Figura 3.** El continuo degradamiento de las tierras y la disminución de la productividad sumado a la irregularidad pluvial, puede superar la capacidad de recuperación o resiliencia del ecosistema [Tomado de Sayago y Collantes, 2009].

con carácter tentativo y solo aplicable a la región estudiada.

#### LA DESERTIFICACIÓN EN EL VALLE DEL RÍO ABAUCÁN

El proceso de desertificación se inicia antes de la llegada de los europeos, a partir de un paisaje poco disturbado (con dudas, ya que a pesar del buen manejo de suelo y agua de los pueblos aborígenes no puede descartarse algún impacto antrópico). Con la llegada de Diego de Almagro en 1536 se inicia un periodo de intenso intercambio comercial – que se prolonga en los siglos posteriores- entre los valles occidentales de Catamarca y las regiones de Chile, Bolivia y Perú. En los valles, cubiertos por algarrobales y extensas pasturas naturales, ganados diversos eran engordados, para luego ser trasladados a los países vecinos (Niz, 2003). Para reconstruir la génesis y evolución de la desertificación en el valle de Abaucán, se consideraron, a) la variabilidad pluviométrica durante las últimas décadas y los cambios paleoclimáticos regionales; b) las modificaciones en la cobertura vegetal en las áreas dunarias, como indicador sensible del incremento o disminución de la desertificación; c) la evolución temporal de la erosión de los suelos y su relación con los cambios pluviométricos multianuales; d) los cambios en las relaciones geométricas del río Abaucan, en respuesta al aporte de sedimentos erosionados en las áreas interfluviales.

#### LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La variabilidad climática estacional juega un rol importante en la fragilidad del paisaje ya que la asimetría entre la estación seca (que dura seis meses o más) contrasta con la húmeda, reducida a tres meses en años normales (Bianchi y Yáñez, 1992). Obviamente, en un paisaje equilibrado la estación húmeda permite la recuperación vegetal mientras en la seca, la adaptación de ciertas fisonomías xerofíticas sostiene la capacidad de resiliencia. Tal situación se ve distorsionada por la presión antrópica, cuyos efectos negativos se intensifican cuando más prolongados e intensos son los procesos de-

gradatorios. Sin embargo, muchas veces los cambios en el paisaje y el hombre son influidos por ciclos paleoclimáticos. Durante el último milenio la región árida de Catamarca y Tucumán fue afectada por la alternancia de periodos de intensa sequía y otros definitivamente húmedos. Entre 1000 y 1300 (AP), durante el llamado Periodo Medieval Cálido Europeo, la región sufrió una extrema sequía, motivando la migración o extinción de las culturas agroalfareras del Periodo Fomativo (Sayago *et al.*, 2010). La intensidad que alcanzó la sequía sugiere que en tal periodo se generaron los campos dunarios existentes en los valles preandinos de Catamarca, Tucumán y La Rioja (Tripaldi *et al.*, 2006). Las evidencias históricas (Figura 2) muestran la existencia de periodos de mayor humedad durante los tiempos de la colonia, que posiblemente motivaron el desmonte definitivo de los bosques nativos, la desaparición de los camélidos y el sobrepastoreo producto de la introducción de ganado bovino, ovino y caprino. Durante la primera mitad del siglo XX el valle de Abaucán es afectado por una reducción pluvial de aproximadamente de un 30% en promedio (Bianchi y Yáñez, 1992), lo que sin duda potenció la desertificación. Por el contrario, las décadas finales de siglo XX se caracterizaron por un notable aumento de la pluviosidad cuyos efectos sobre el ecosistema son variados, ya que en las áreas menos degradadas se produjo alguna recuperación vegetal, mientras que en las extremadamente erosionadas la desertificación se incrementó.

#### LAS MODIFICACIONES EN LA COBERTURA VEGETAL DE LAS ÁREAS DUNARIAS EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS

Con el propósito de comprobar el avance de la desertificación en un área considerada como paradigma de este proceso en el NOA, se controló, mediante aerofotointerpretación multitemporal, el avance de la vegetación leñosa en seis sectores del valle del Abaucán caracterizados por la presencia de dunas estabilizadas, que actuarían como indicadores de la recuperación vegetal o una tendencia a la “desertización”. A pesar de la evidencia de

aridez del relieve dunario, los resultados indican que en las áreas muestras relevadas la cobertura vegetal aumentó en promedio entre 15% y 35% (Niz, 2003). Ello sugiere que, al contrario de lo comúnmente aceptado, la desertificación había disminuido, al menos en tal ambiente. Por el contrario, este resultado se complica por el diferente comportamiento de las bajadas pedemontanas, especialmente en los cordones Negro Rodríguez y Zapata, cubiertas por un arbustal monoespecífico de *Larrea sp.*, cobertura que no registró recuperación vegetal, constituyendo una marcada contradicción respecto a las áreas dunarias antedichas. Teniendo en cuenta que en el arbustal que cubre las bajadas pedemontanas cada planta se presenta en pedestal, constituyendo el relicto de un suelo anterior erosionado, la primera interpretación de las diferencias entre la dinámica vegetal del paisaje dunario y las bajadas sin recuperación poblacional, es que la capacidad de resiliencia ha disminuido en los piedemontes, mientras que en las áreas dunarias es posible la recuperación por la presencia de un sustrato permeable que facilita la infiltración y conservación hídrica, creando las condiciones para una incipiente pedogénesis.

#### LA DINÁMICA DE LA EROSIÓN LAMINAR Y EN CÁRCAVAS

Con el propósito de comprobar el avance del carcavamiento y su relación con la pluviometría y la dinámica de la cobertura vegetal en el intervalo 1968-82, se cartografió su avance en el piedemonte de los cordones Negro Rodríguez y Zapata (Niz, 2003). Sus resultados indican el mayor desarrollo del carcavamiento en el piedemonte del Negro Rodríguez atribuible a su exposición a los vientos húmedos generados por el Anticiclón Atlántico, mientras el cordón de Zapata recibe los más esporádicos provenientes del pacífico. La relación entre el aumento del carcavamiento en los piedemontes y el aumento pluvial confirma que la intensidad del degradamiento de los suelos es mayor en las bajadas pedemontanas, mientras en las áreas dunarias la mayor permeabilidad de la roca madre y el microrelieve local atenúa

la presión antrópica facilitando la pedogénesis y el poblamiento vegetal.

#### LOS CAMBIOS EN LA GEOMETRÍA FLUVIAL

Considerando que los valles preandinos constituyen sistemas fluviales dinámicos en los que toda acción degradatoria influye “tarde o temprano”, en toda su cuenca, se evaluó la influencia de los sedimentos erosionados sobre el diseño fluvial del río Abaucán. En su importante obra “The fluvial system” Schumm (1977) introduce el concepto de “umbral extrínseco” para expresar los efectos de las modificaciones en el diseño de drenaje de un sistema fluvial cuando es influido por la disminución de la cobertura vegetal en las laderas de la cuenca, la erosión de los suelos o el efecto de movimientos tectónicos o sísmicos. Este proceso, conocido como “metamorfosis fluvial”, establece que la relación entre la geometría de los cauces (expresada por el ancho, la profundidad, la sinuosidad, la longitud de onda de meandro, la pendiente y el aporte de sedimentos), se expresa por cambios en el diseño del cauce fluvial hacia el patrón entrelazado (trellis), cuando los sedimentos transportados aumentan o por el contrario, tienden al diseño meandriforme (meandering) cuando el aporte disminuye. La tabla 1 muestra el cambio en todos los elementos de la geometría fluvial del Abaucán, sugiriendo la influencia del aumento del aporte sedimentario en la tendencia hacia un diseño entrelazado. Si bien el intervalo temporal considerado es poco representativo desde la perspectiva histórica, no deja de constituir un indicador paramétrico que se suma a los restantes (clima, suelo, vegetación y erosión) para confirmar la intensidad del proceso de desertificación. Así, la evolución temporal de diversos elementos del paisaje en respuesta a la presión antrópica en el valle de Abaucán confirman la existencia de un proceso generalizado de desertificación aunque con intensidades diversas, ya que ciertas áreas presentan mayor capacidad de recuperación, mientras otros sectores aparentemente han superado el umbral de resiliencia.

**Tabla 1.** Modificación en los parámetros de la morfología fluvial del río Abaucán en el intervalo 1968-82, por influencia de los sedimentos transportados desde el área interfluvial (Niz, 2003) del río Abaucán.

Parámetros fluviales	1968	1982
Sed. Transp. río Abaucán	46%	62%
Ancho	247 m	300 m
Profundidad	2,60 m	1.70 m
Longitud onda de meandro	870 m	940 m
Pendiente	0.0028	0.0044
Sinuosidad	1.21	1.1

#### LA PERSPECTIVA REGIONAL DE LA DESERTIFICACIÓN

La desertificación en la cuenca del río Abaucán, al oeste de la provincia de Catamarca, tipifica las condiciones presentes en la gran región árida del noroeste argentino (Collantes *et al.*, 2008), extendida entre el límite con Bolivia, los Andes áridos, los valles y bolsones catamarqueños y riojanos y el occidente de los cordones preandinos del subtropical (Figura 1). Este proceso no podría entenderse sin tener en cuenta la variabilidad paleoclimática del último milenio y la metamorfosis del paisaje producto del impacto de la ocupación española desde mediados del siglo XVI. Los cambios en el paisaje son reflejados en las modificaciones en la cubierta vegetal, la geomorfodinámica, la dinámica edáfica y las modificaciones en la geometría hidráulica de los ríos, documentando la magnitud de las modificaciones y, consecuentemente, de las dificultades para reconstruir, al menos en parte, la aptitud productiva pasada que dio sustento y bienestar durante milenios a nuestros ancestros. Se trata en suma, de encontrar sistemas de manejo que a partir de las limitaciones ecosistémicas actuales, permitan recuperar en lo posible la potencialidad perdida o, al menos valorar, la intensidad del disturbio y la posibilidad de su recuperación.

#### DESERTIFICACIÓN Y RESILIENCIA EN EL VALLE DE SANTA MARIA

##### LA DEGRADACIÓN DEL PAISAJE

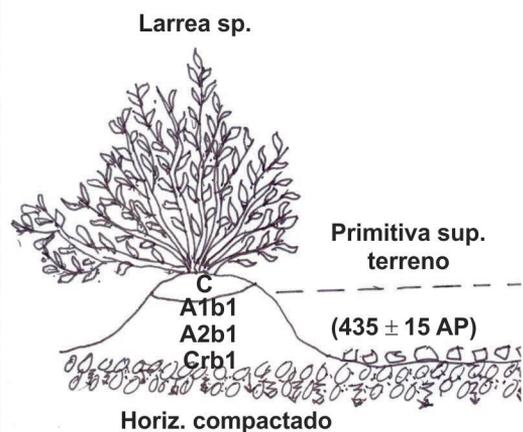
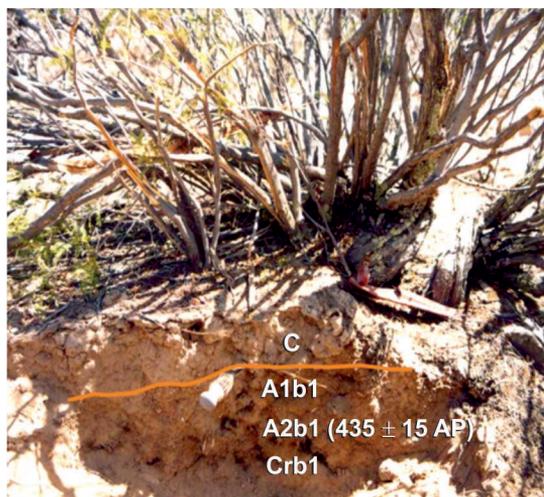
La evolución histórica de la deforestación en el valle de Santa María presenta las mismas características que en el valle del Abaucán y, en general, en todos los valles y bolsosnes áridos preandinos. Como ya se expresara, la acción del hombre se vio potenciada por la variabilidad climática del último milenio, produciendo una verdadera metamorfosis en el paisaje de pastizales y bosque bajo en los piedemontes y los bosques en galería y densos algarrobales y otras freatófitas en los valles fluviales, transformados en nuestro días en arbustales xerofíticos en las bajadas, que transitan a halófitas y xerófitas en los valles fluviales. El proceso iniciado con la progresiva desaparición de las pasturas naturales (Figura 5) continúa con el reemplazo de un arbustal monoespecífico de *Larrea sp.*, dando inicio en el suelo desnudo a la erosión areolar (overland flow). La intensidad de los procesos erosivos desarrollados en el pasado constituye un indicador clave del estado de desertificación que presenta el valle. Tanto los suelos aluviales como los arídicos (formados durante la extrema sequía del periodo Medieval Cálido), hasta los litosoles y regosoles, desarrollados sobre el basamento de los cordones principales, constituyen testigos calificados de la relación entre el ambiente y el hombre. La presencia de un arbustal de *Larrea sp.* donde cada planta se encuentra arraigada en un pedestal que ha permitido su supervivencia, constituye la reliquia de un suelo primitivo que cubrió gran parte del valle. En la Figura 4, se observa el microrelieve en pedestal cuyo límite superior indica el nivel que alcanzaba el suelo primitivo, el que cubrió gran parte de las superficies pedemontanas. Este suelo, que en realidad constituye un paleosuelo, es el remanente de un horizonte superficial potente, bien provisto de materia orgánica y moderado desarrollo (A-C o A/AC-C) genético, cuyo material originario es de carácter loesosoide, depositado con anterioridad al periodo húmedo del Formativo.

La intensidad del proceso erosivo, iniciado con el arribo de los españoles, generó erosión areolar a través de un flujo hortoniano superficial (Bergsma, 1986) y produjo la desaparición de gran parte del suelo primitivo. Una datación radiocarbónica efectuada mediante el Acelerador de Partículas (AMS) permitió establecer para el pedestal una edad  $435 \pm 15$  AP, confirmando que su remoción se produjo con posterioridad a la llegada de Diego de Almagro en 1546. Con la desaparición del suelo primitivo, el paisaje de las bajadas fue afectado por marcados cambios edáficos y morfodinámicos ya que durante los periodos húmedos, ante la incapacidad de recuperación del suelo primitivo, flujos detríticos provenientes de las laderas fueron cubriendo progresivamente todo el piedemonte, transformando un molisol arídico en un regosol. Si bien este relieve refleja la superación de un umbral edáfico, no ocurre lo mismo en otros sectores del valle, donde el deterioro edáfico y la disminución de la vegetación no han sido radicalmente modificados.

#### LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS Y EL "TIPPING POINT"

Los cambios climáticos del pasado (Figura 2) muestran que la transición de un perio-

do húmedo a otro más seco, o inversamente, se manifiesta por cambios dramáticos en el paisaje, que afectaron sensiblemente a los pobladores locales. De igual modo, la presión antrópica durante las últimas centurias generó un impacto similar, poniendo en duda la posibilidad de un desarrollo sustentable. Se impone entonces la búsqueda de indicadores en el comportamiento del ecosistema que alerten sobre el progreso de la desertificación y la cercanía al punto en que el sistema pierde su capacidad de recuperación. Aunque algunos modelos matemáticos predicen tendencias graduales de cambio, aún se está lejos de predecir transiciones radicales tales como el inicio de sequías severas o el colapso de los ecosistemas frágiles. Nuevos desarrollos para predecir tales eventos provienen de observar que algunas dramáticas modificaciones en sistemas complejos se relacionan con la existencia de "tipping points" (punto de cambio o bifurcación peligrosa) (Scheffer, 2010). El principio más importante de esta teoría parte del hecho de que los sistemas cercanos al umbral de resiliencia se recuperan muy lentamente (en mayor tiempo) de las perturbaciones naturales o inducidas por el hombre. En tales situaciones puede comprobarse que "a medida que el punto crítico se aproxima, el descenso



**Figura 4.** Erosión en pedestal que cubre el piedemonte oriental de Cumbres Calchaquíes (Valle de Santa María). El pedestal constituye un relicto de un suelo preexistente erosionado con posterioridad a la llegada de los españoles.

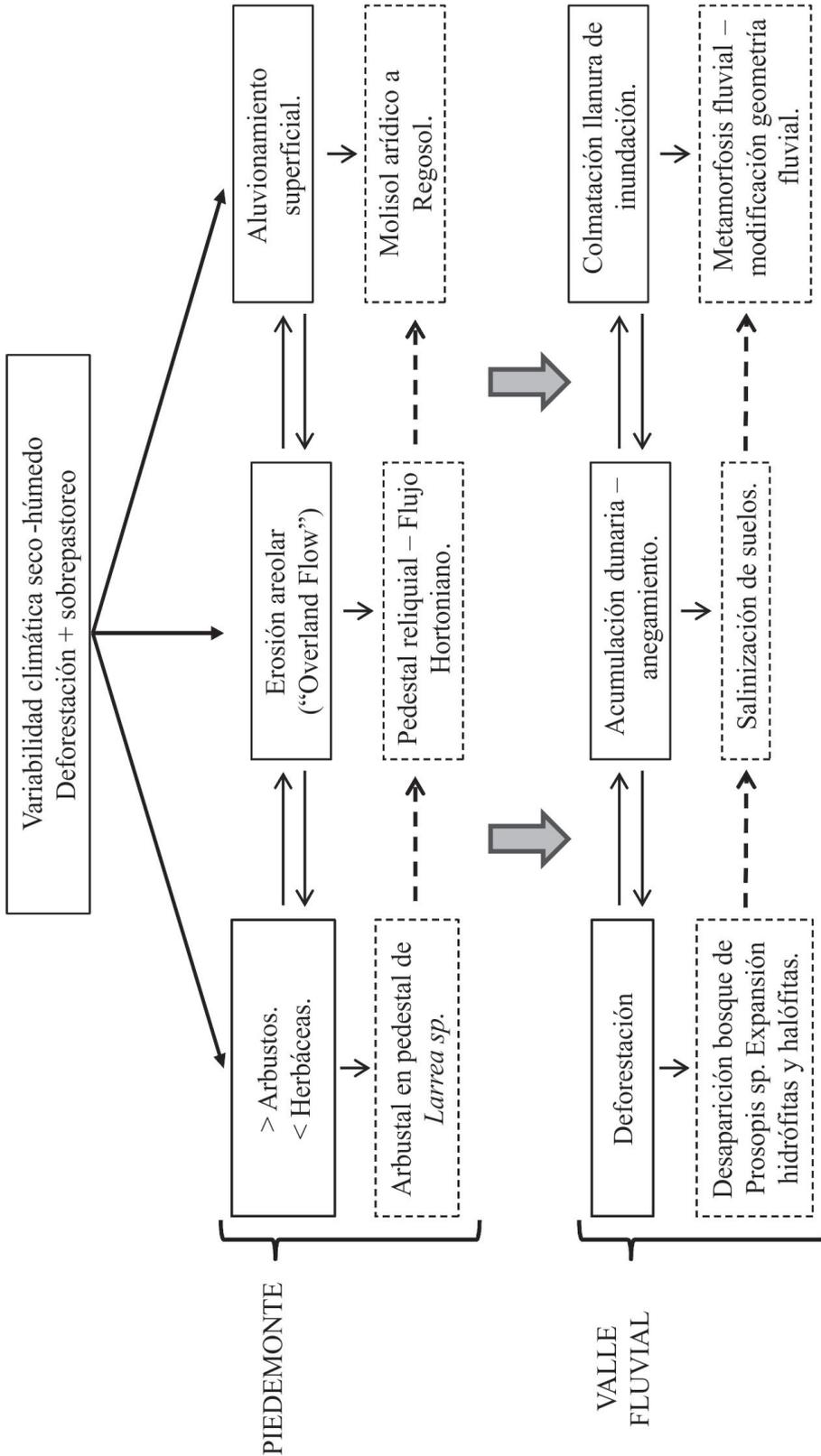


Figura 5. Evolución del proceso de desertificación en el valle de Santa María.

crítico se verá reflejado en cambios característicos en el espectro de frecuencia y variancia en las fluctuaciones del sistema” (Scheffer, 2010). En el caso del valle de Santa María considerando la importancia del clima y el relieve en la génesis de los suelos y la distribución de la vegetación (Zonneveld, 1983), se construyó una toposecuencia en la ladera occidental del cordón Cumbres Calchaquies (margen oriental del valle de Santa María), sectorizando el paisaje según sus características geomorfológicas (Figura 6) (pendiente superior e inferior, piedemonte proximal y distal, terraza alta y baja y llanura de inundación). Se asumió que la influencia del relieve y el clima (gradiente pluvial) condicionan los restantes factores del paisaje dentro de la toposecuencia, como el riesgo erosivo y la variabilidad temporal de la cobertura vegetal. En tal sentido, la sectorización geomorfológica integra la variabilidad espacial de la precipitación, el riesgo erosivo, y la fluctuación estacional (invierno y verano) de la cobertura de vegetal, en cada piso morfoclimático. El riesgo erosivo, medido mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, permite validar la desertificación, ya que al expresar la pérdida de suelo en Tn/Ha/Año y la pérdida futura que podría alcanzar en cada unidad de relieve (Seymour, 1985), contribuye a definir la intensidad actual y una tendencia en el proceso de degradamiento. En tal sentido, además de un método paramétrico, la ecuación entrega, a través de sus factores (erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, influencia de la pendiente, cobertura vegetal y manejo) una síntesis integrada y dinámica del paisaje actual, permitiendo efectuar simulaciones sobre la producción de sedimentos a partir de predicciones sobre posibles cambios en el clima futuro (Busnelli *et al.*, 2009). La evaluación de la dinámica estacional de la cobertura vegetal (mantillo y canopia) permiten validar el riesgo erosivo y establecer tentativamente diferentes niveles de recuperación. En la Figura 6 se indica el riesgo erosivo, expresado en pérdida potencial del suelo en Tn/Ha/Año, para cada piso o unidad de la toposecuencia. En la misma también se

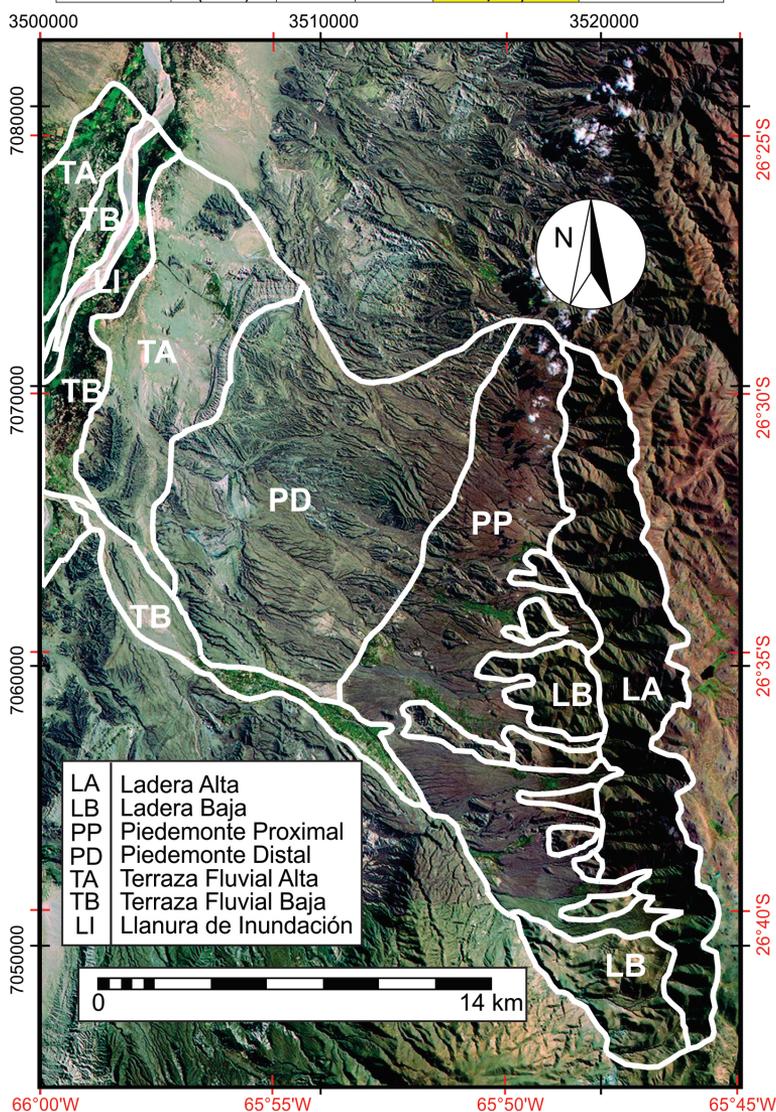
expresan los cambios en el porcentaje de la cobertura de mantillo y canopia en los periodos de mayor y menor precipitación anual, al igual que la aptitud productiva tentativa preliminar en cada unidad geomorfológica. Tanto el piedemonte proximal como la terraza baja presentan los mayores valores de pérdida de suelo (29-47tn/ha/año), representando las unidades más afectadas por la erosión actual y el riesgo futuro. Coincidentemente, dichas unidades presentan falta total de recuperación estacional al presentar la misma cobertura durante la estación seca y húmeda, lo que estaría indicando que en dichos sectores el paisaje ha perdido su capacidad de recuperación o resiliencia y superado un “tipping point”. Las restantes unidades de la toposecuencia presentan situaciones intermedias como en el piedemonte proximal, la terraza alta y la llanura de inundación, mostrando en la primera, moderada erosión y una buena recuperación de cobertura en la estación húmeda, mientras en la terraza alta y llanura de inundación, si bien la pérdida por erosión es similar, la recuperación de cobertura es menor. Finalmente, la ladera superior e inferior presentan menores niveles de erosión y una buena recuperación de la cobertura en el verano, especialmente en la ladera inferior. Parecería obvio aclarar que las fluctuaciones multianuales del clima podrían modificar algunos valores de recuperación de cobertura, aunque la clara coincidencia con la pérdida de suelo por erosión, (proceso que en general cambia lentamente con el tiempo), permiten inferir que constituye un factor apto para validar los resultados del cuadro de la Figura 6.

#### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La complejidad de las relaciones entre los componentes de un paisaje o ecosistema natural exige, prioritariamente, una mirada multidisciplinar, tanto de las características locales o regionales, como de los cambios en las interrelaciones endógenas y exógenas y del nivel de percepción o escala establecido. Así, a escala macroregional la influencia del clima y el relieve predomina sobre los

### REGIONES DE RELIEVE Y CAPACIDAD DE RESILIENCIA EN EL VALLE DE SANTA MARIA (PROVINCIA DE CATAMARCA)

GRANDES UNIDADES DE RELIEVE	RIESGO EROSIVO, Tn/Ha/Año (USLE)	COBERTURA VEGETAL (%) MULCH - (CANOPIA)		CAPACIDAD DE RESILIENCIA O RECUPERACION	APTITUD PRODUCTIVA EXTENSIVA (TENTATIVA)
		Estación seca	Estación húmeda		
LADERA ALTA	0 - 14 (ligero a moderado)	25 - (35)	56 - (35)	POSIBLE	Ganadería de Camélidos
LADERA BAJA	5 - 14 (moderado)	25 - (35)	72 - (35)	POSIBLE (a corto plazo con manejo conservacionista)	Ganadería de camélidos y caprinos
PIEDEMONTE PROXIMAL	14 - 29 (severo)	40 - (35)	80 - (50)	POSIBLE (a largo plazo)	Ganadería de caprinos con manejo pastoril
PIEDEMONTE DISTAL	29 - 47 (grave)	20 - (40)	20 - (60)	LIMITADA O NULA	Reserva natural y arqueológica
TERRAZA ALTA	14 - 29 (severo)	40 - (30)	60 - (40)	POSIBLE (a largo plazo)	Reserva forestal con autóctonas
TERRAZA BAJA	29 - 47 (grave)	15 - (30)	15 - (30)	LIMITADA O NULA	Reforestación con <i>prosopis</i> sp.
LLANURA DE INUNDACION	14 - 29 (severo)	10 - (30)	22 - (35)	POSIBLE (a largo plazo)	Pastoreo de secano



**Figura 6.** Sectorización geomorfológica y valoración de la capacidad de resiliencia en cada unidad de paisaje en la ladera occidental del Cordón Cumbres Calchaquíes, valle de Santa María.

restantes factores en la dinámica paisajística, mientras que a mayores escalas, la relación entre tales factores y otros, como la hidrología, los suelos o la vegetación, presentan interinfluencias equivalentes. Pero así como la sinergia entre elementos del paisaje se modifica “de lo general a lo particular”, no es posible también eludir la concepción histórica (geológica) en la dinámica de un ecosistema o paisaje, sin arriesgar la posibilidad de predecir su evolución futura. Asimismo, es innegable la certidumbre de la individualidad de todo paisaje – o los límites de la autosimilaridad - definida por variables dependientes del clima (milenario, anual, estacional), o el relieve (macro, meso, micro), el escurrimiento superficial (interfluvial y encausado), la erosión (susceptibilidad, riesgo actual y potencial), la pedogénesis (morfología, permeabilidad, geoquímica) y la dinámica vegetal (cobertura estacional, variabilidad fitosociológica, capacidad de resiliencia). Los resultados presentados en este trabajo sobre la evaluación del grado de desertificación y capacidad de resiliencia de los valles preandinos de Catamarca, presentan un grado de generalización, no necesariamente extrapolables sin una exhaustiva validación. Pero como expresa Paola (2011) “la simplificación es esencial si el objetivo es la comprensión, los modelos con pocos elementos móviles son más fáciles de aprehender y conectan más fácilmente causa y efecto”. Adicionalmente, la pobre resolución espacial de la información teledetectada, nos remite a la necesidad de controles más detallados en el terreno (obviados en muchos trabajos) sobre el rol de cada elemento del paisaje, la evolución histórica y su capacidad de recuperación o resiliencia si existiera. Es evidente la necesidad de indicadores confiables (probados y fáciles de valorar) sobre los diversos grados de cercanía o lejanía de un paisaje al umbral de resiliencia y al “tipping point”. Si bien ha sido posible establecer en este trabajo criterios valorativos en base a metodologías conocidas, es evidente la necesidad de indicadores probados, aplicables conjuntamente en los aspectos bióticos, edáficos y geomórficos. Un problema que aún

subsiste (de difícil comprobación dado la necesidad de un control recurrente) es el del lapso en que un paisaje desertificado puede retornar (o no) a condiciones de cierta productividad. En los casos de no superación del umbral de resiliencia, la predicción de la existencia -en un futuro cercano o lejano- de un “tipping point” (en respuesta a cambios climáticos), constituye un objetivo prioritario. En tal sentido, la asignación de aptitudes de uso de la tierra, en función de limitaciones en la capacidad de recuperación del paisaje, debería recoger la experiencia de alternativas productivas conocidas en la región u originales, factibles de ser validadas frente a factores o influencias físicas o biológicas y, especialmente, sociales, culturales y económicas.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto PICT 1207, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Bailey, R. M. 2010. Spatial and temporal signature of fragility and threshold proximity in modeled semi-arid vegetation. The Royal Society, Biological Sciences, Published online, 8 p. Londres.
- Begon, M., Harper, J. L. y Townsend, C. R. 1987. Ecología, individuos, poblaciones y comunidades. Ediciones Omega S.A., 865 p. Barcelona, España.
- Berberian, E. E., Nielsen, A. E., Argüello de Dorsch, E., Bixio, B., Spalletti, L. A., Salazar, J. A. y Pillado, E. L. 1998. Sistemas de asentamiento prehispánico en el valle de Tafi. Revista de Antropología e Historia, Edit. Comechingonia. Córdoba.
- Bergsma, E. 1986. Aspects of mapping units in the rain erosion hazard catchments survey. En: Siderius (Ed.), p. 84-105. The Netherlands.
- Birkeland, P. W. 1999. Soils and Geomorphology. 429 p. Oxford University Press. New York, Oxford.
- Bianchi, A. R. y Yañez, C. C. 1992. Las precipitaciones en el noroeste argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EER.Salta.
- Busnelli, J., Sayago, J. M. y Collantes, M. M. 2009. Riesgo erosivo ante diferentes escenarios de cambio climático en la provincia de Tucumán, Argentina. En: Sayago, J.M. y Collantes, M.M. (Eds.), Geomorfología y Cambio Climático: 97-

117. Instituto de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán.
- Cabrera, A. L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Ganadería 2 (2): 85. Segunda Edición. Editorial Acme. Buenos Aires.
- Caria, M. y Garralla, S. 2003. Caracterización arqueopalinológica del sitio Ticucho 1 [Cuenca Tapia-Trancas, Tucumán, Argentina. En: Collantes, M.M., Sayago J.M. y Neder L. (Eds.), Cuaternario y Geomorfología: 421-428. Instituto de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad nacional de Tucumán. Tucumán.
- Caria, M., Sampietro, M. y Sayago, J. M. 2001. Las sociedades aldeanas y los cambios climáticos. XIV Congreso Nacional de Arqueología. Rosario. Argentina.
- Cooke, R. U. y Doornkamp, J. C. 1990. Geomorphology in environmental management. 410 p. Clarendon Press. Oxford.
- Collantes, M. M., Sayago, J. M., Niz, A. y Gómez Augier, J. P. 2008. El proceso de desertificación en la región árida-semiárida del Noroeste Argentino: cambio climático o antropogénesis?. Primeras Jornadas Universitarias del Norte Grande Argentino sobre Medio Ambiente, Libro de Resúmenes, p. 58. Tucumán.
- Di Castri, F. 1980. L'Ecologie, défis d'une science en crise. Courrier Unesco, p. 20. Paris.
- Drake, J. M. y Griffen, B. D. 2010. Early warning signals of extinction in deteriorating environments. *Nature*, 467: 456-459.
- Garralla, S. 1999. Análisis polínico de una secuencia sedimentaria en el Abra del Infiernillo, Tucumán, Argentina. Primer Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas de Resúmenes, Comunicaciones y Trabajos, p. 11. La Pampa.
- González, A. R. 1999. La cultura La Aguada y el Periodo Formativo. Evolución e Historia en el proceso cultural del noroeste argentino. En: Ledergerber Crespo, A. (Ed.), *Formativo Sudamericano, una revolución: 285-301*, Ediciones ABYA-YALA. Quito.
- González, A. R. y Núñez Regueiro, V. A. 1960. Preliminary report on archaeological research in Tafi del Valle N.W. Argentina. *Akten del 34 Internationalen Amerikanisten Kongresses*: 485-496.
- Haase, G. 1976. The chorical structure of the natural landscape. *Proc. XXIII International Congress of Geography, Moscow*.
- Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C., Pueyo, Y., Papanastasis, V., El Aich, A. y De Ruiter, P. 2007. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean ecosystems. *Nature*, 449: 115-258.
- Laut, P., Heyliger, P., Keig, G. Loffler, E., Margules, C. y Scott, R. 1977. *Environments of South Australia*. Hand book SCIRO.
- Langbein, W. V. and Schumm, S. A. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *American Geophysics Union Transactions*, 39: 257-266.
- Niz, A. 2003. Geomorfología del sector meridional del Dpto. Tinogasta, Provincia de Catamarca, Argentina. Tesis Doctoral Inédita, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, UNCA, 333 p. S.F. del V. de Catamarca.
- Paola, C. 2011. In modelling, simplicity isn't simple. *Nature*, 469: 38.
- Planchon, O. 2003. Transitions entre climat tropicaux et tempérés en Amerique du Sud: essai de régionalisation climatique. *Les cahiers d'outre-mer*. N° 223-56 annee. *Revue de Géographie de Bordeaux*. France.
- Prieto, M., Herrera, R., Dussel, P. 1997. Las condiciones climáticas durante la conquista y colonización del noroeste argentino (1580-1710). *Actas Congr. Nac. de Ciencias Humanas*. Tucumán. Argentina.
- Raffino, R. A., 1988. Poblaciones indígenas de la República Argentina. *Urbanismo y proceso social*. Tipografía Editorial Argentina, 259, Buenos Aires, Argentina. 259 páginas.
- Sayago, J. M. 1982. Las unidades geomorfológicas como base para la evaluación integrada del paisaje natural. *Acta Geológica Lilloana*, 16 (1): 169-180. Tucumán, Argentina.
- Sayago, J. M. 1985. Aspectos metodológicos del inventario de la erosión hídrica mediante técnicas de percepción remota en la región subtropical del noroeste argentino. Msc. Thesis, 260 p. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). The Netherlands.
- Sayago, J. M. y Niz, A. 2001. Past human impacts and ecosystem response in the dry region of the northwest Catamarca province, Argentina. *Abstracts: Challenges of a Changing Earth, Global Change Open Sciences Conference*, p. 367. Amsterdam
- Sayago, J. M., Zinck, A., Collantes, M. M. y Toledo, M. 2005. Environmental changes in the pre-Andean valleys and Chaco Plain (Northwest Argentina) during the Late Pleistocene and Holocene. *J. Jb. Geol.Paslaont. Abh.* 236 (1/2): 245-265. Stuttgart.
- Sayago, J. M. y Collantes, M. M. 2009. ¿Cambio climático o cambio geomorfológico? En: Sayago, J.M. y Collantes, M. M. (Eds.), *Geomorfología y Cambio Climático: 9-24*. Instituto de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán.
- Sayago, J. M., Collantes, M. M., Neder, L. y Busnelli, J. 2010. Cambio climático y amenazas ambientales en el área metropolitana de San Miguel de Tucumán (Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 546-556.
- Sayago, J. M., Sampietro, M. M., Caria, M. y Collantes, M. M., 2003. Paleoclimatic changes and human crisis in north west Argentina during the european medieval warm period. En: *Quaternary*

- Climatic Changes and Environmental Crises in the Mediterranean Region, 10: 81-87, Universidad de Alcalá de Henares. Madrid.
- Scheffer, M. 2010. Foreseeing tipping points. *Nature*, 467: 363-494. Environmental Sciences Group, Wageningen University. The Netherlands.
- Schumm, S. A. 1977. *The fluvial systems*. John Wiley and Sons, 370 p. New York.
- Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational terms and concepts. *Ecology* 16: 284-307. England.
- Tricart, J. 1979. *Paysage et écologie*. *Revue de Géomorphologie dynamique*, p. 82 Paris.
- Tripaldi, A., Forman, F. y Ciccioilli, P. 2006. Análisis geomorfológico y primeras edades del campo de dunas Médanos Negros, Provincia de La Rioja, Argentina. III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Tomo I: 287. Córdoba, Argentina.
- Van Zuidam, R. y Van Zuidam-Cancelado, F. 1978. Terrain Analysis and classification using aerial photograph. ITC textbook of photo-interpretation, 430 p. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, Holland.
- Verstappen, H. T. 1983. *Applied Geomorphology: Geomorphological survey for environmental development*. 433 p., Elsevier, The Netherlands.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses -guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537, 43 p. Estados Unidos.
- Zonneveld, J. I. S. 1983. Some basic notions in geographical synthesis. *Geojournal* 72: 121-129.