

MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS A ESCALA DE CUENCA EN EL SISTEMA DEL A° LUDUEÑA, SANTA FE, ARGENTINA

Pedro A. Basile^{(1),(3)}, Gerardo A. Riccardi^{(2),(3)} y Hernán Stenta^{(1),(3)}

⁽¹⁾Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁽²⁾Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

⁽³⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM). FCEIA. UNR.

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina

Telefax: 0341 4808541. E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

La erosión hídrica a nivel de cuenca induce una disminución de productividad de los campos cultivables y un aumento de sedimentos en suspensión en los cursos de agua. La deposición de dichos sedimentos en lagunas, embalses, cauces y planicies de inundación, como así también la elevada concentración de los mismos en proximidad de obras de toma, plantean problemas operacionales que requieren importantes esfuerzos técnicos y económicos para solucionarlos. Por otra parte, los sedimentos finos erosionados y transportados presentan la particularidad de adsorber sustancias contaminantes, tales como metales pesados, pesticidas, hidrocarburos poliaromáticos, etc., razón por la cual las vías de drenaje y las zonas de acumulación actúan como reservorios de sedimentos contaminados. Tanto la pérdida de productividad de suelos cultivables como la degradación de la calidad del recurso hídrico superficial son incompatibles con el desarrollo sustentable de una comunidad. El objetivo principal del presente trabajo es realizar el balance de sedimentos, a escala temporal anual, que permita establecer el orden de magnitud de los procesos de sedimentación a largo plazo que se observan en algunos sectores del sistema hidrológico del A° Ludueña, especialmente en la zona de la presa de retención de crecidas y en la zona del entubamiento cercana a la desembocadura en el río Paraná. Se presenta la formulación, implementación computacional y la aplicación de un modelo adecuado para evaluar la producción de sedimentos mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS). Las estimaciones de erosión efectuadas han mostrado una mayor producción de sedimentos en las zonas de las cabeceras respecto a la producción en las zonas próximas a la salida de la cuenca. Para los dos escenarios simulados (erosión actual y riesgo de erosión potencial) la capacidad de almacenamiento de la presa de retención de crecidas no se ve sustancialmente afectada debido al proceso de sedimentación a largo plazo. En cambio, el sistema de conductos puede experimentar un severo proceso de sedimentación, razón por la cual deberían adoptarse medidas para la gestión y control de sedimentos en el área de estudio.

PALABRAS CLAVE: producción de sedimentos, cuencas hidrográficas, arroyo Ludueña.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica superficial es muy perjudicial ya que se relaciona con la disminución de productividad del suelo, debido sustancialmente a la pérdida de materia orgánica de los horizontes superiores del mismo (Casas, 2003). Además de este problema local, originado por el desprendimiento y erosión de partículas de suelo, existe el transporte y posterior deposición de dicho sedimento en zonas alejadas, donde el problema es justamente la deposición del sedimento generado por la erosión a nivel de la cuenca.

Para estimar la erosión hídrica a nivel de cuenca existen distintos abordajes metodológicos. Un abordaje está representado por las evaluaciones basadas en la apreciación de expertos, que asignan distintos grados de severidad al proceso o dan un puntaje a distintos factores los cuales son posteriormente combinados. Ejemplos de este tipo de abordaje lo constituyen los trabajos de De Ploey (1989), Morgan (1995), Montier *et al.* (1998). El otro abordaje se sustenta en las aplicaciones de distintos tipos de modelos matemáticos. Una descripción detallada de estos modelos ha sido recientemente realizada por Singh *et al.* (2002).

Los modelos matemáticos para el pronóstico de erosión hídrica pueden ser clasificados de diferentes maneras. Una manera de clasificarlos es en función de la escala temporal para la cual han sido desarrollados, es decir, algunos modelos permiten estimar la erosión producida por un evento hidrológico particular, mientras que otros, por ejemplo, evalúan la erosión media anual a largo plazo. Se puede asimismo establecer otra división entre modelos empíricos y modelos físicamente basados. La elección de un tipo particular de modelo depende sustancialmente del objetivo que se persigue y de la disponibilidad de datos, tiempo y financiamiento.

El objetivo principal del presente trabajo es realizar el balance de sedimentos, a escala temporal anual, que permita establecer el orden de magnitud de los procesos de sedimentación a largo plazo que se están desarrollando en algunos sectores del sistema hidrológico del A° Ludueña. En particular, los sectores en estudio son la zona de la presa de retención de crecidas y el sistema de conductos ubicados en proximidad de la desembocadura del arroyo en el río Paraná. A tales fines se desarrolló, implementó y aplicó un modelo adecuado para evaluar la producción de sedimentos mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS). Utilizando información de clima, topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo, se estimó la erosión media anual en la cuenca del A° Ludueña, considerando la erosión actual como así también el riesgo de erosión potencial. Para validar el modelo se utilizaron datos observados de volumen de sedimentos depositados en el sistema de conductos. Sobre la base de las estimaciones de erosión realizadas a nivel de cuenca se efectuaron los balances sólidos para cada uno de los casos considerados.

ÁREA DE ESTUDIO

Breve descripción del sistema hidrológico del A° Ludueña.

La cuenca del A° Ludueña se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) y comprende parte de la ciudad de Rosario y un grupo de 8 poblaciones (ver Figura 1). Su red de cursos permanentes y transitorios tiene una longitud de aproximadamente 120 km y se desarrolla sobre suelos cohesivos altamente resistentes a la erosión inducida por el flujo encauzado. El área de la cuenca es de 717 km², con una pendiente media de 1 ‰. La sección de control corresponde al cruce del arroyo con el puente de la Av. de Circunvalación de la ciudad de Rosario. El caudal medio anual es de 2,7 m³/s, habiéndose observado caudales picos del orden de los 400

m³/s durante la crecida del año 1986. Además, la cuenca presenta una serie de intervenciones antrópicas tales como terraplenes de rutas y ferrocarriles, alcantarillas, puentes, presa de retención de crecidas, etc. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho se desarrolla casi enteramente al sur de la Ruta Nacional N° 9 (RN9). Mientras que, al norte de dicha ruta se desarrolla el sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat. La presa de retención de crecidas se ubica aproximadamente 1 km aguas arriba de la intersección del A° Ludueña con la RN9. El área de aporte que delimita el cierre de la presa es de 440 km² aproximadamente. En inmediaciones del cruce del A° Ludueña con la Av. de Circunvalación de Rosario (6 km aguas abajo de la intersección con la RN9) el arroyo recibe el aporte de la cuenca del canal Ibarlucea (sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat) cuya área de aporte es de aproximadamente 240 km². Aguas abajo de la Av. de Circunvalación el A° Ludueña recorre zonas densamente pobladas de la ciudad de Rosario hasta desembocar en el río Paraná. En parte de este recorrido urbano el arroyo se encuentra entubado.

Problemática asociada a la producción de sedimentos en la cuenca

Los sedimentos erosionados en la cuenca, además de degradar la potencialidad productiva de los suelos, contribuyen con los procesos de sedimentación que se verifican en las zonas de la presa de retención de crecidas y en las zonas de los entubamientos del arroyo Ludueña en la ciudad de Rosario. En efecto, parte de los sedimentos generados en la cuenca del A° Ludueña propiamente dicho son retenidos por la presa y contribuyen con el proceso de sedimentación a largo plazo del vaso de la misma. Hasta el presente no se han realizado evaluaciones del aporte sólido, ni relevamientos de cantidad y calidad de los sedimentos retenidos en la presa.

Por otra parte, los sedimentos que logran pasar a través de las estructuras de descarga de la presa y los sedimentos generados en el sector de la cuenca comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación se suman a los sedimentos producidos por la cuenca del canal Ibarlucea. Dicha carga sólida ingresa a la zona de los entubamientos del A° Ludueña en la ciudad de Rosario, localizados aproximadamente 2 km aguas arriba de la desembocadura en el río Paraná. Esta última zona funciona como una suerte de embalse, espontáneamente regulado por las fluctuaciones de niveles hidrométricos del río Paraná, lo cual induce la deposición de una parte de los sedimentos que ingresan, mientras que, la parte restante se descarga en el río Paraná. En esta zona la única información disponible se refiere a mediciones y estimaciones globales del volumen de sedimentos depositados en un período de aproximadamente 8 años (Saucedo y Scuderi, 2003). Esta información, si bien escasa, es muy importante para validar el modelo de erosión a nivel de cuenca y establecer el orden de magnitud del proceso de sedimentación a largo plazo que se está desarrollando en la presa de retención de crecidas y en el sistema de conductos.

Discretización espacial del área de estudio

La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho ha sido dividida en 21 subcuencas, las cuales se indican en la Figura 2 con los números 1 a 21. Por otra parte, la cuenca del canal Ibarlucea ha sido dividida en 7 subcuencas, éstas se identifican con los números 22 a 28 en la Figura 2. La mayoría de las subcuencas se dividieron a su vez en sub-subcuencas. En el trazado de las subcuencas se adoptó el criterio de materializar unidades homogéneas desde el punto de vista geomorfológico e hidrológico, contemplando las partes altas, medias y bajas de la cuenca, como así también las zonas de cursos permanentes y semipermanentes.

MODELO EROSUP-U

El modelo EROSUP-U (Basile, 2004) se basa en la ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS), la cual resulta apropiada para estimar la erosión superficial media anual a largo plazo, es decir, integrada o promediada en un período de 10 o más años (Wischmeier y Smith, 1978). La EUPS se expresa para una subcuenca genérica i como:

$$A_i = 224,2 R_i K_i LS_i C_i P_i \quad (1)$$

donde:

A_i : erosión superficial media anual o producción bruta específica de sedimentos [(T/km²)/año], siendo T: toneladas métricas;

R_i : factor de erosividad de lluvia-escorrentía [(ton pié/acre) (pulgada/h)], siendo ton: toneladas Sistema Inglés US;

K_i : factor de erosionabilidad del suelo [(ton/acre) (acre h/ton pié pulgada)];

LS_i : factor topográfico de longitud y pendiente del terreno (-);

C_i : factor de cobertura vegetal (-);

P_i : factor de prácticas conservacionistas para control de erosión (-) y 224,2 es un coeficiente de conversión de unidades.

Es necesario notar que no todo el sedimento producido por erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua hasta la sección de control. En general, el sedimento que efectivamente alcanza la sección de control (SY) es menor que la cantidad de sedimento producido por erosión superficial (A). La relación entre estas dos magnitudes se denomina relación de erogación de sedimentos y es menor que la unidad:

$$SY_i = SDR_i A_i \quad (2)$$

donde SY_i es la producción neta específica de sedimentos [(T/km²)/año] y SDR_i es la relación de erogación de sedimentos (-).

Cabe señalar que (1) es una ecuación empírica que estima exclusivamente la erosión superficial (en surcos y entre surcos), es decir, no contempla los procesos de erosión del flujo encauzado (erosión de lecho y márgenes) ni obviamente procesos de remoción masivos (deslizamientos, flujos de detritos, etc.). Por tratarse de un sistema hidrológico de llanura, en el A° Ludueña los procesos de remoción masivos están descartados. Por otra parte, el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado pueden considerarse mucho menores que los producidos por erosión superficial.

Factor de erosividad asociado a lluvia-escorrentía (R)

El factor de erosividad R_s para una tormenta genérica s se calcula mediante el producto de la energía cinética por unidad de área (E) y la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}). El factor de erosividad contempla el proceso de desprendimiento de las partículas de suelo por el impacto de las gotas de lluvia y su transporte por el flujo superficial. Por este motivo es conveniente denominarlo factor de erosividad asociado a lluvia-escorrentía. En efecto, parte de la energía cinética (E) de la tormenta se consume en producir el desprendimiento de las partículas de suelo, mientras que, la

intensidad máxima de la lluvia (I_{30}) es proporcional al caudal máximo, el cual a su vez se relaciona con la capacidad de transporte del flujo superficial.

$$R_s = EI_{30} = \frac{1}{173,6} \left\{ \sum_{n=1}^N [1,213 + 0,89 \log I_n] I_n \Delta t \right\} I_{30} \quad (3)$$

donde I_n es la intensidad asociada al n-ésimo pulso de precipitación (mm/h); Δt es el intervalo de tiempo (h) de cada pulso (constante); I_{30} es la intensidad máxima en 30 minutos (mm/h); 173,6 es un coeficiente de conversión de unidades, de manera tal que R_s queda expresado en [(ton pié / acre) (pulgada / h)]. Para expresarlo en unidades métricas (N/h) se debe multiplicar por 1,7. Para $I_n > 76$ (mm/h) E_n es constante e igual a 2,887. Además, se deben considerar tormentas que superen los 12,5 mm (Wischmeier y Smith, 1978).

El factor de erosividad para un año genérico (R_y) y el factor de erosividad medio anual (R) se determinan mediante:

$$R_y = \sum_{s=1}^{N_s} R_s \quad , \quad R = \frac{1}{N_y} \sum_{y=1}^{N_y} R_y \quad (4a),(4b)$$

donde N_s es el número de tormentas en el año y N_y es el número de años.

En gran parte de la provincia de Santa Fe no existe una base de datos pluviográfica suficientemente densa o antigua como para calcular el valor de R mediante EI_{30} . La red de pluviógrafos existente es muy escasa. En muchas cuencas no se cuenta con registros pluviográficos, en la mayoría de los casos es posible contar solo con registros pluviométricos. Por este motivo es útil recurrir a expresiones que permitan cuantificar el valor de R a partir de información pluviométrica. Estas expresiones podrán a su vez ser verificadas correlacionándolas con los valores de R calculados mediante EI_{30} a partir de datos de estaciones con registros pluviográficos.

Arnoldus (1978) propuso evaluar R en función del índice de Fournier modificado, la ecuación propuesta es:

$$\log R = 1,93 [\log IFM] - 1,52 \quad (5)$$

donde IFM es el índice de Fournier modificado:

$$IFM = \frac{1}{P_{MA}} \sum_{k=1}^{12} P_k^2 \quad , \quad P_{MA} = \sum_{k=1}^{12} P_k \quad (6a),(6b)$$

donde P_k es la precipitación media del k-ésimo mes expresada en (mm) i P_{MA} es la precipitación media anual (mm).

Para verificar la correlación existente entre el valor de $R=f(EI_{30})$ y el valor de $R=f(IFM)$ se procesaron 1031 tormentas registradas en la estación Rosario Aeropuerto (ver Figura 2) durante el período 1986-1998. Considerando el umbral de 12,5 mm el número de tormentas remanente para el cálculo de R es de 245. El valor de R calculado a partir de EI_{30} fue $R=219,4$ mientras que el calculado en función del índice de Fournier modificado fue $R=230,9$. Es decir, el ajuste es muy

satisfactorio ya que $R=f(IMF)$ es un 5 % superior aproximadamente al $R=f(EI_{30})$. Tal diferencia no es significativa si se considera el tipo de estimación de erosión que se realiza con el modelo.

Por lo tanto, para el cálculo de R se alimentó el modelo con los datos de precipitación media mensual de las estaciones de Zavalla (estación pluviométrica) y Rosario Aeropuerto. Para la estación Zavalla el valor de R calculado mediante la fórmula de Arnoldus es $R=204,3$. Los datos de precipitaciones medias mensuales para cada subcuenca se asignaron en función del área de influencia de cada estación, la cual se materializó mediante el trazado de polígonos de Thiessen.

Factor de erosionabilidad del suelo (K)

El factor asociado a la erosionabilidad del suelo representa la erosión por unidad de área y por unidad de factor R considerando la parcela estándar: $LS=1$, $C=1$ (suelo desnudo) y $P=1$ (prácticas para control de erosión nulas). El mismo se determina en función de las características texturales y el contenido de materia orgánica mediante la siguiente ecuación (Wischmeier y Smith, 1978):

$$K_{ij} = T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (7)$$

donde los términos T_1 , T_2 , T_3 y T_4 se expresan como:

$$T_1 = 0.2 + 0.3 \exp \left[-0,0256 \text{ SAN}_{ij} \left(\frac{1 - \text{SIL}_{ij}}{100} \right) \right] \quad (8)$$

$$T_2 = \left(\frac{\text{SIL}_{ij}}{\text{CLA}_{ij} + \text{SIL}_{ij}} \right)^{0,3} \quad (9)$$

$$T_3 = 1 - \frac{0,25}{\text{Cl}_{ij} + \exp(3,72 - 2,95 \text{Cl}_{ij})} \quad (10)$$

$$T_4 = 1 - \frac{0,7 \text{SN1}_{ij}}{\text{SN1}_{ij} + \exp(-5,51 + 22,9 \text{SN1}_{ij})} \quad (11)$$

donde: SAN_{ij} , SIL_{ij} , CLA_{ij} y Cl_{ij} son los contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica respectivamente para la subcuenca i y la sub-subcuenca j , expresados en % y $\text{SN1}_{ij} = 1 - (\text{SAN}_{ij}/100)$. Considerando distintas combinaciones texturales el valor de K_{ij} que se obtiene a partir de la ecuación (7) varía aproximadamente entre 0,1 y 0,5 [(ton/acre) (acre h/ton pié pulgada)].

Los valores de K_{ij} se determinaron a partir de datos sobre las características texturales de los suelos de la cuenca del A° Ludueña, obtenidos por Zimmermann (2000) a partir de cartas de suelos del INTA. En la Tabla 1 se exponen las características texturales y el contenido de materia orgánica de cada una de las series de suelos básicas presentes en la cuenca.

Las series básicas se combinan entre ellas en diferentes proporciones originando asociaciones de suelos tales como Py, Py2x, Py8, Py15, Py20, Za2, Za3, Rd8, Rd10, Rd11, Rd12 y

Rd15. En la Tabla 2 se muestran las composiciones de cada asociación (Zimmermann, 2000). En la Tabla 3 se observan los porcentajes areales de las diferentes asociaciones de suelos presentes en cada sub-subcuenca. Mediante los valores de las Tablas 2, 3 y 4 se determinaron los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica para cada sub-subcuenca, los cuales se suministraron como información de entrada al modelo. Los valores de K_{ij} obtenidos variaron entre 0,3 y 0,32. El valor de K_i para cada subcuenca es calculado mediante la siguiente ponderación areal:

$$K_i = \frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{NSSB_i} K_{ij} F_{ij} \quad (12)$$

donde $NSSB_i$ es el número de sub-subcuencas correspondiente a la subcuenca i ; F_i es el área de la subcuenca i , F_{ij} es el área de la sub-subcuenca j contenida en la subcuenca i .

Factor topográfico (LS)

El factor topográfico LS se expresa mediante la siguiente ecuación (Wischmeier y Smith, 1978):

$$LS_i = \left(\frac{L_i}{22,13} \right)^\zeta (0,065 + 4,52S_i + 65,4S_i^2) \quad (13)$$

donde S_i es la pendiente media de la subcuenca i en (m/m) y ζ es un coeficiente que depende de S_i :

$$\zeta = 0,2 + \frac{0,3S_i}{S_i + \exp(-1,47 - 61,09S_i)} \quad (14)$$

El valor de L_i para cada subcuenca se expresa en (m) y se define mediante la inversa de la densidad de drenaje D_{di} (km^{-1}) dividida por 2, es decir, L_i representa la longitud promedio de la zona del valle dentro de la subcuenca (zona donde se desarrolla el flujo sobre el terreno), (Williams *et al.*, 1976):

$$L_i = \chi \frac{D_{di}^{-1}}{2} = \chi \frac{F_i}{2 LCH_i} \quad (15)$$

donde LCH_i es la longitud total de cursos en la subcuenca i (km), F_i es el área correspondiente expresada en (km^2) y $\chi=1000$.

El factor LS es adimensional y está representando la relación entre el factor topográfico correspondiente a la situación específica en estudio y el factor LS de la parcela estándar. Obsérvese que para $L_i=22,13$ m (72,6 pies) y $S_i=0,09$ (9 %), es decir los valores de la parcela estándar, el valor de LS_i dado por (13) es 1.

Los valores de los parámetros morfológicos para cada subcuenca se determinaron a partir de información digitalizada de curvas de nivel con equidistancia de 2,5 m, red de cursos permanentes y temporarios en CAD. Los valores de LCH_i que se ingresaron como datos en el modelo variaron entre 2,3 km y 15,9 km, mientras los referidos a S_i variaron entre 0,00018 y 0,0036.

Factor asociado a la cobertura vegetal (C)

El factor C contempla la reducción de la erosión superficial debido al efecto de la cobertura vegetal. El mismo es adimensional y se define como la relación entre la erosión bajo las condiciones específicas de cobertura vegetal en el caso de estudio y la erosión de la parcela estándar (suelo desnudo, C=1), (Wischmeier y Smith, 1978). Dicho factor depende del tipo de vegetación y de la fase de crecimiento, conglobándose en un solo coeficiente una gran cantidad de información referida a aspectos biológicos, químicos, físicos y de prácticas de manejo, con sus respectivas interacciones. Tales interacciones, no adecuadamente definidas, hacen que la estimación de C en sentido objetivo preciso sea imposible (Lane *et al.*, 1983).

En el presente estudio los valores promedios del factor C se determinaron en función de datos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtenidos por Zimmermann (2002). Las imágenes satelitales en falso color y formato digital fueron procesadas en mapas de Índice Diferencia Normalizada de Vegetación mediante rutinas internas de importación, estiramiento, resampleado, concatenación de imágenes (unión de una o varias imágenes) de IDRISI (Zimmermann, 2002).

El factor C se relaciona con el NDVI mediante la siguiente ecuación (Van de Knijff *et al.*, 1999):

$$C_{ij} = \exp \left[-\alpha \frac{NDVI_{ij}}{(\beta - NDVI_{ij})} \right] \quad (16)$$

donde α y β son parámetros que definen la forma de la curva $C=f(NDVI)$, para los cuales se adoptaron los valores $\alpha=2$ y $\beta=1$ propuestos por Van de Knijff *et al.*, 1999. Los valores de C_{ij} que se ingresaron como datos en el modelo variaron entre 0,018 y 0,26. El valor de C_i para cada subcuenca se determina mediante la siguiente ponderación areal:

$$C_i = \frac{1}{F_i} \sum_{j=1}^{NSSB_i} C_{ij} F_{ij} \quad (17)$$

donde las variables intervinientes han sido definidas previamente. Además, a los efectos de estimar el riesgo de erosión potencial se realizó una simulación donde se especificó $C=1$ para cada una de las sub-subcuencas.

Factor de prácticas conservacionistas (P)

El factor P es adimensional y contempla la reducción de la erosión superficial debido a las prácticas conservacionistas. Tal factor se define como la relación entre la erosión bajo las condiciones específicas de labranza en el caso de estudio y la labranza por roturado en el sentido del máximo declive ($P=1$).

En el modelo se puede suministrar a través de archivo de entrada un valor de P para cada subcuenca. Valores orientativos de P han sido propuestos por Wischmeier y Smith (1978) en función de la pendiente y del tipo de práctica de cultivo (cultivo en contorno, cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados, terráceo, etc.). Existen también valores orientativos para el caso de cultivo en surcos cruzando el máximo declive.

La práctica conservacionista más adecuada resulta ser la siembra directa, ya que reduce la erosión e induce un incremento de fracciones de materia orgánica joven, ligadas a la fertilidad actual del suelo (Casas, 2003). Sin embargo, aún con este sistema, en áreas de la pampa ondulada se ha observado el arrastre de suelo y rastros por el escurrimiento superficial (Casas, 2003). En este estudio, para caracterizar las diversas prácticas de manejo y para estimar la erosión actual se especificó un valor promedio de $P=0,6$ para cada subcuenca. Mientras que, para estimar el riesgo de erosión potencial se especificó $P=1$.

Relación de erogación de sedimentos (SDR)

En el modelo EROSUP-U se pueden utilizar distintas expresiones para evaluar la relación de erogación de sedimentos SDR:

$$\text{Vanoni (1975):} \quad \text{SDR}_i = 0,47 F_i^{-0,125} \quad (18)$$

$$\text{USDA SCS (1979):} \quad \text{SDR}_i = 0,566 F_i^{-0,11} \quad (19)$$

$$\text{Williams \& Berndt (1972):} \quad \text{SDR}_i = 0,627 \text{SLP}_i^{0,403} \quad (20)$$

En las ecuaciones (18) y (19) F_i es el área expresada en (km^2), mientras en la ecuación (20) SLP_i es la pendiente media del curso principal expresada en (%). Las ecuaciones anteriores, aplicadas en el sistema hidrológico del A° Ludueña, brindan valores similares de SDR variables entorno al 20%-30%. En este estudio se aplicó la ecuación (18) derivada por Vanoni utilizando datos de más de 300 cuencas de diferentes partes del mundo (Da Ouyang *et al.*, 1997).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 4 se presentan los valores de producción bruta y producción neta de sedimentos para cada subcuenca, estimados considerando la erosión actual y el riesgo de erosión potencial ($C=1$ y $P=1$). De acuerdo a la clasificación de Wischmeier *et al.* (1978) los valores estimados de erosión actual para cada subcuenca son bajos (valores de A menores que $448 \text{ (T/km}^2\text{/año)}$). Sin embargo, es necesario señalar que se trata de valores medios anuales a largo plazo y además valores medios areales. Por otra parte, utilizando la misma clasificación, los valores estimados considerando el riesgo de erosión potencial resultan altos (valores de A mayores que $1121 \text{ (T/km}^2\text{/año)}$). En ambos casos se observa una producción bruta específica de sedimentos ligeramente menor en la zona baja de la cuenca respecto a la producción en la zona media y alta.

En la Figura 3 se presenta el balance medio anual de sedimentos en el sistema hidrológico del A° Ludueña, considerando el proceso de erosión actual. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho con cierre en la presa de retención de crecidas presenta una producción bruta de 81560 T/año , una deposición interna de 63640 T/año y un ingreso de sedimentos a la presa de 17920 T/año (la SDR calculada en base a (18) para el cierre en la presa es aproximadamente $0,22$).

La eficiencia de retención de sedimentos media a largo plazo de la presa, estimada en función del método de Churchill, es de 25% aproximadamente (pasa el 75%). Por lo tanto, en la presa se estima una sedimentación media anual a largo plazo de 4480 T/año . Realizando un

pronóstico de sedimentación, considerando según Lane y Koelzer embalse normalmente vacío y sedimento en ingreso con una composición de 50 % de arcilla, 47 % de limo y 3 % de arena fina, se obtiene una pérdida de volumen de aproximadamente $0,35 \text{ Hm}^3$ al cabo de 100 años.

Por otra parte, el 75 % del sedimento que pasa a través de la presa representa una erogación de 13340 T/año. Suponiendo una lámina de escurrimiento medio anual de 120 mm, distribuida uniformemente en la cuenca, se obtiene una concentración media anual a largo plazo de 255 ppm inmediatamente aguas abajo de la presa. La cuenca del canal Ibarlucea contribuye con una producción neta de 11760 T/año, mientras que, la generada en el sector comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación es de 460 T/año. Por lo tanto, la cantidad de sedimentos que ingresa al sistema de conductos es de 25660 T/año. Suponiendo la misma lámina de escurrimiento mencionada más arriba, la correspondiente concentración de sedimentos media anual a largo plazo que ingresa al sistema de conductos es de 298 ppm.

La eficiencia de retención de sedimentos media en el sistema de conductos, estimada en función del método de Churchill, es de aproximadamente 20% (pasa el 80%). Por lo tanto, se estima una sedimentación media anual a largo plazo de 5130 T/año. La sedimentación observada en un período de 8 años es de aproximadamente 30500 m^3 . Adoptando, según Lane y Koelzer, embalse con normalmente considerables descensos de nivel y composición de sedimento igual a la mencionada anteriormente, se obtiene una deposición media observada para el período de 4380 T/año, es decir, aproximadamente el 85% del valor estimado mediante el modelo.

En la Figura 4 se presenta el balance medio anual de sedimentos en el sistema hidrológico del A° Ludueña, considerando el riesgo de erosión potencial ($C=1$, $P=1$). En este caso, asumiendo que la presa tiene la eficiencia de retención de sedimentos media a largo plazo mencionada anteriormente, se estima una deposición de sedimentos media anual a largo plazo de 62780 T/año. Realizando un pronóstico de sedimentación, bajo las mismas hipótesis señaladas más arriba, se obtiene una pérdida de volumen de aproximadamente $4,9 \text{ Hm}^3$ al cabo de 100 años. El volumen del embalse correspondiente a la cota de 30 m IGM es de $71,32 \text{ Hm}^3$. Consecuentemente se observa que, aún en este caso de aporte sólido extraordinario, la capacidad de almacenamiento no se vería significativamente disminuida ya que la pérdida de capacidad sería aproximadamente igual al 7 % del volumen correspondiente a la cota 30 m IGM (la cota de coronamiento es 32,5 m IGM). En el sistema de conductos la situación es más crítica pues, si bien podría alcanzarse un cierto equilibrio, la deposición sería de todos modos excesiva. En este caso el ingreso de sedimentos a los entubamientos es de 403550 T/año, con una concentración media anual asociada de 4690 ppm, es decir, casi 16 veces mayor que la estimada en el caso de erosión actual.

CONCLUSIONES

Se ha estimado la producción bruta y la producción neta de sedimentos media anual a largo plazo en el sistema hidrológico del A° Ludueña, considerando tanto el proceso de erosión actual como el riesgo de erosión potencial. Se han realizado los balances de sedimentos para ambas situaciones, los cuales han permitido establecer el orden de magnitud relativo de los procesos de sedimentación a largo plazo que experimenta la presa de retención de crecidas y el entubamiento del arroyo en la ciudad de Rosario.

En los dos escenarios simulados (erosión actual y potencial) la capacidad de almacenamiento de la presa de retención de crecidas no se ve sustancialmente afectada por el proceso de sedimentación a largo plazo. Sin embargo, el sistema de conductos puede experimentar

un severo proceso de sedimentación, razón por la cual deberían adoptarse medidas para la gestión y control de sedimentos en el área de estudio.

A los efectos de estimar la permanencia de eventuales tareas de limpieza del sistema de conductos se deberían realizar mediciones de concentración de sedimentos en algunas secciones, calibrar y aplicar modelos de erosión a escala espacial de cuenca y a escala temporal de un evento de crecida, etc.. Por otra parte, es también necesario analizar estrategias de disminución de producción a nivel de cuenca y/o diferentes estrategias de retención parcial en zonas no conflictivas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnoldus, H. M.** (1978) *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation*. En: De Boodst, M. y Gabriels, D. (eds.). *Assessment of erosion: 127-132*. John Wiley y Sons, Inc. Chichester (Gran Bretaña).
- Basile, P.A.** (2004) *Modelo matemático para pronóstico de erosión superficial media anual a escala de cuenca: EROSUP-U*. Informe técnico interno ICI-0104, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA-UNR.
- Casas, R.** (2003) *Sustentabilidad de la agricultura en la región pampeana*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA-Castelar.
- Da Ouyang y Bartholic, J.** (1997) *“Predicting Sediment Delivery Ratio in Saginaw Bay Watershed”*. Proc. 22nd National Association of Environmental Professionals Conference. May 19-23, 1997, Orlando, FL. pp 659-671.
- De Ploey, J.** (1989) *A Soil Erosion Map for Western Europe*. Catena Verlag.
- Lane, L.J.; Hakonson, T.E. y Foster, G.R.** (1983) *“Watershed erosion and sediment yield affecting contaminant transport”*. Proc. Symposium on Environmental Research on Actidine Elements. Hilton Head, South Dakota, pp. 193-223.
- Montier, C.; Daroussin, J.; King, D. y Le Bissonnais, Y.** (1998) *Cartographie vde l'aléa “Erosion des Sols” en France*. INRA, Orléans.
- Morgan, R.P.C.** (1995) *Soil Erosion and Conservation*. Second Edition. Longman, Essex.
- Riccardi, G.; Scuderi, C. y Stenta, H.** (2002) *“Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en La cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina”*. XIX Congreso Nacional del Agua, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Saucedo, I. y Scuderi, C.** (2003) *Limpieza del conducto Aliviador 2 y de la platea de desembocadura – A° Ludueña*. Proyecto Final Carrera de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR. Tomos I y II.
- Singh V.P. y Woolisher, D.A.** (2002). *“Mathematical Modeling of Watershed Hydrology”*. Journal of Hydrologic Engineering, ISSN 1084-0699, 7 (4), 270-292.
- Van der Knijff, J. M.; Jones, R.J.A. y Montanarella, L.** (2000) *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau. Joint Research Center of the European Commission.
- Williams, J. R. y Berndt, H.D.** (1972) *“Sediment yield computed with universal equation”*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98 (12).
- Williams, J. R. y Berndt, H.D.** (1976) *Determining the universal soil loss equation length-slope factor for watersheds*. In: *Erosion and solid matter transport in inland waters*. pp 217-225. IAHS-AISH publication No. 122.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D.D.** (1978) *Predicting rainfall erosion losses – a guide for conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537.
- Zimmermann, E.** (2000) *“Metodología para la Estimación de la Conductividad Hidráulica Equivalente en Suelos No Saturados Heterogéneos”*. Cuadernos del CURIHAM. PHI-UNESCO. ISSN 1514-2906. Vol. 6, Nº1, pp. 1-12.
- Zimmermann, E.** (2002) *Informe anual Carrera de Investigador Científico - CONICET*. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR.

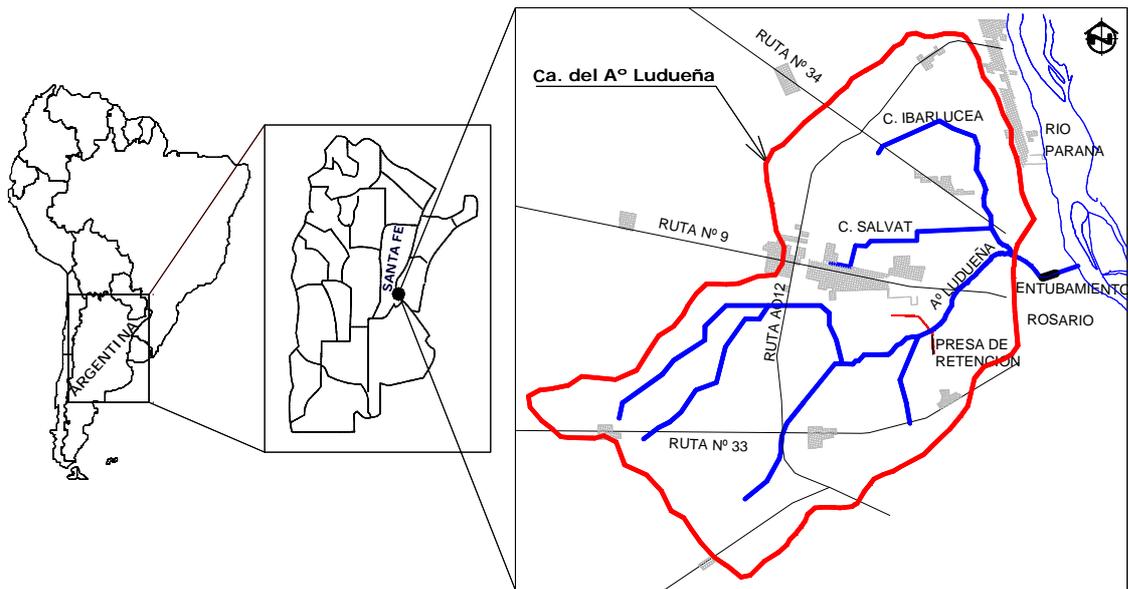


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina.



Figura 2. Delimitación de las subcuencas y sub-subcuencas.

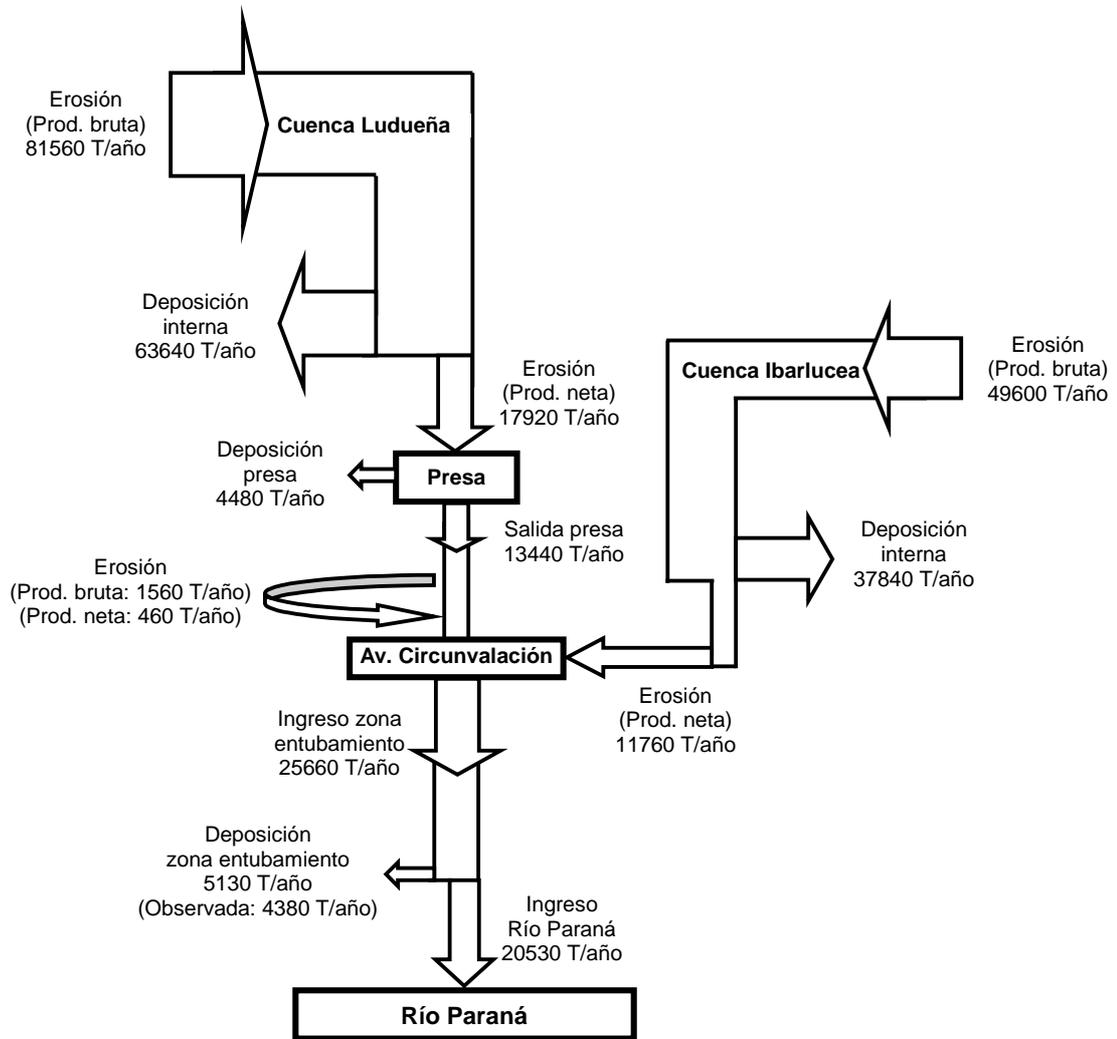


Figura 3. Balance medio anual de sedimentos en el sistema hidrológico del A° Ludueña considerando erosión actual.

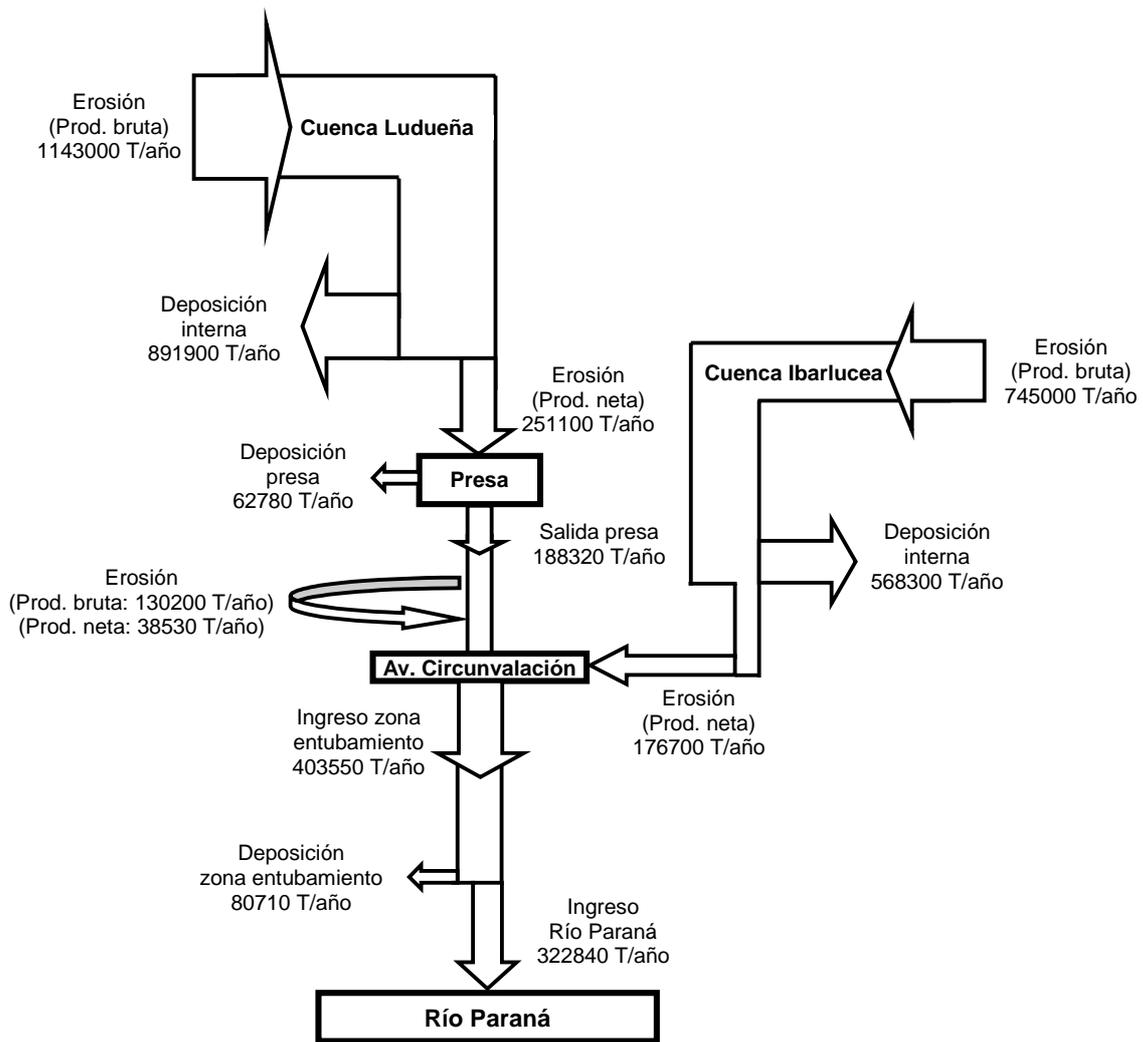


Figura 4. Balance medio anual de sedimentos en el sistema hidrológico del A° Ludueña considerando riesgo de erosión potencial (C=1, P=1).

Tabla 1. Características texturales de cada serie de suelos.

Serie	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	MO (%)
Monte Flores (MF)	54,6	2,6	40,8	2,0
Gelly (Ge)	41,3	4,6	51,1	3,0
Zavalla (Za)	55,6	2,0	40,4	2,0
Peyrano (Py)	49,6	4,3	43,1	3,0
Roldán (Rd)	50,7	2,2	45,1	2,0

Tabla 2. Porcentaje de cada serie en las distintas asociaciones.

Serie	Asociaciones						
	Py, Py2x, Py8 Py15, Py20	Za2 Za3	Rd8	Rd10	Rd11	Rd12	Rd15
Monte Flores (MF)	0	30	0	20	40	20	20
Gelly (Ge)	0	20	30	20	20	10	20
Zavalla (Za)	0	50	0	30	0	0	10
Peyrano (Py)	100	0	0	0	0	0	0
Roldán (Rd)	0	0	70	30	40	70	50

Tabla 3. Porcentaje areal de asociaciones de suelos por sub-subcuencas.

	SB (i)	SSB (j)	Fij (km ²)	Py	Za2 Za3	Rd8	Rd10	Rd11	Rd12	Rd15
A. Ludueña	1	1	15,30	0	50	0	0	0	0	50
	1	2	7,20	0	50	0	0	0	0	50
	1	3	18,00	0	0	0	0	0	50	50
A. Ludueña	2	1	14,10	0	50	0	10	0	20	20
	2	2	11,60	0	0	0	0	0	50	50
A. Ludueña	3	1	10,50	0	30	0	0	0	60	10
	3	2	15,80	0	40	0	20	20	20	0
A. Ludueña	4	1	6,80	0	30	0	30	0	40	0
A. Ludueña	5	1	13,80	10	0	0	0	0	90	0
	5	2	5,20	0	30	0	0	0	70	0
A. Ludueña	6	1	8,10	10	0	0	0	0	90	0
	6	2	10,70	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	7	1	3,60	20	40	40	0	0	0	0
	7	2	8,20	90	0	0	0	0	10	0
	7	3	1,90	90	0	10	0	0	0	0
	7	4	3,60	100	0	0	0	0	0	0
	7	5	7,20	100	0	0	0	0	0	0
	7	6	5,40	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	8	1	8,60	0	40	0	20	20	20	0
	8	2	13,00	20	30	0	20	10	0	20
	8	3	12,10	0	20	30	50	0	0	0
	8	4	7,30	20	40	40	0	0	0	0
	8	5	5,20	90	0	10	0	0	0	0
A. Ludueña	9	1	9,40	0	30	0	30	0	40	0
A. Ludueña	10	1	18,60	0	30	0	20	0	20	30
	10	2	6,90	50	0	0	0	50	0	0
A. Ludueña	11	1	9,40	20	30	0	20	10	0	20
A. Ludueña	12	1	33,50	60	0	0	0	0	0	40
	12	2	4,30	80	0	0	0	0	0	20
A. Ludueña	13	1	6,80	70	0	0	15	15	0	0
	13	2	11,10	50	0	25	25	0	0	0
	13	3	4,60	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	14	1	13,60	0	10	70	20	0	0	0
	14	2	8,00	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	15	1	8,10	80	0	20	0	0	0	0
	15	2	8,50	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	16	1	6,30	60	10	20	0	10	0	0
	16	2	2,90	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	17	1	6,40	60	10	20	0	10	0	0
A. Ludueña	18	1	10,30	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	19	1	10,00	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	20	1	14,30	100	0	0	0	0	0	0
	20	2	14,50	100	0	0	0	0	0	0
	20	3	6,00	100	0	0	0	0	0	0
A. Ludueña	21	1	8,70	100	0	0	0	0	0	0
	21	2	5,20	70	0	0	15	15	0	0
	21	3	38,40	100	0	0	0	0	0	0
C. Ibarlucea	22	1	5,20	0	50	0	0	0	0	50
	22	2	6,90	0	0	100	0	0	0	0
C. Salvat	23	1	8,60	0	50	0	0	0	30	20
	23	2	8,30	0	0	10	10	0	40	40
C. Ibarlucea	24	1	12,70	0	0	100	0	0	0	0
	24	2	22,00	0	0	100	0	0	0	0
C. Ibarlucea	25	1	13,00	0	0	100	0	0	0	0
	25	2	43,00	0	0	70	30	0	0	0
	25	3	20,80	0	0	65	35	0	0	0
C. Ibarlucea	26	1	25,80	0	30	0	40	0	30	0
	26	2	43,00	0	20	0	40	0	40	0
C. Salvat	27	1	4,80	0	0	10	10	0	40	40
C. Funes	28	1	10,20	0	0	0	30	0	70	0
	28	2	13,70	0	30	0	0	0	70	0

Tabla 4. Valores estimados de erosión actual y potencial por subcuencas. Sistema hidrológico A° Ludueña.

SB (i)	F _i (km ²)	Erosión actual				Erosión potencial			
		A _i (T/km ² /año)	A' _i (T/año)	SY _i (T/km ² /año)	SY' _i (T/año)	A _i (T/km ² /año)	A' _i (T/año)	SY _i (T/km ² /año)	SY' _i (T/año)
1	40,5	38,6	1562,4	11,4	462,3	3214,8	130200,7	951,3	38528,2
2	25,7	55,5	1425,4	17,4	446,5	3081,3	79189,7	965,1	24804,2
3	26,3	62,9	1653,9	19,6	516,5	2517,7	66215,1	786,3	20680,5
4	6,8	47,7	324,1	17,6	119,9	2844,1	19339,6	1051,9	7152,9
5	19	130,4	2477,7	42,4	806,0	2215,1	42086,2	720,5	13689,7
6	18,8	154,2	2898,7	50,2	944,1	2458,0	46210,7	800,6	15051,2
7	29,9	198,7	5941,8	61,1	1826,2	2265,1	67726,9	696,2	20816,1
8	46,2	176,8	8168,9	51,5	2377,8	2640,2	121977,4	768,5	35505,6
9	9,4	45,9	431,5	16,3	153,2	2738,7	25743,7	972,7	9143,8
10	25,5	271,4	6920,5	85,1	2169,8	2983,6	76082,6	935,5	23854,2
11	9,4	138,7	1303,9	49,3	463,1	2636,5	24782,8	936,4	8802,5
12	37,8	348,3	13165,7	104,0	3929,7	2946,3	111370,1	879,4	33241,5
13	22,5	250,9	5646,1	79,9	1798,2	2681,0	60321,6	853,8	19210,9
14	21,6	235,3	5081,9	75,3	1626,7	2385,7	51530,2	763,7	16495,0
15	16,6	167,5	2780,9	55,4	919,9	2288,1	37982,4	756,9	12565,1
16	9,2	163,4	1503,6	58,2	535,5	2287,8	21048,0	814,8	7496,1
17	6,4	107,7	689,4	40,1	256,9	2063,2	13204,5	768,9	4920,9
18	10,3	110,4	1137,0	38,8	399,3	2629,4	27083,3	923,3	9510,3
19	10	168,6	1686,3	59,4	594,3	2342,1	23420,8	825,5	8254,7
20	34,8	250,2	8708,4	75,5	2626,3	2575,9	89640,0	776,8	27033,5
21	52,3	183,8	9613,6	52,7	2755,3	2639,5	138044,2	756,5	39564,3
22	12,1	152,6	1846,7	52,5	635,5	2853,9	34531,8	982,2	11884,2
23	16,9	191,4	3233,8	63,2	1067,4	2724,1	46037,4	899,2	15195,8
24	34,7	127,2	4413,0	38,4	1331,3	2912,2	101052,3	878,6	30486,2
25	76,8	188,8	14497,9	51,6	3960,3	3201,7	245886,9	874,6	67168,1
26	68,8	314,7	21650,2	87,2	5996,0	3462,1	238195,8	958,8	65968,0
27	4,8	142,9	685,9	55,2	265,0	2348,9	11274,6	907,4	4355,6
28	23,9	136,9	3272,4	43,3	1034,3	2845,9	68016,4	899,5	21498,7