

## Evaluación de la erosión estimada y medida en campo mediante dos propuestas metodológicas

Pablo Alejandro Campos<sup>1,4</sup>, Ivana C. Valdez<sup>2</sup>, Ramona I. Moreno<sup>3,4</sup>, Adrian J. Avendaño<sup>4</sup> & Analía V. Villagra<sup>4</sup>

(1) *Cátedra de Sensores Remotos-Sistemas de Información Geográfica y Ordenamiento Territorial. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.*  
pablo404996@yahoo.com.ar; pcampos@unsa.edu.ar

(2) *Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.*  
ivy\_caro28@hotmail.com

(3) *Cátedra Introducción a los Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.*  
ramoren@unsa.edu.ar; ignamoren@gmail.com

(4) *Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta.*  
ajavendao@yahoo.com.ar  
anivillagra@hotmail.com

**RESUMEN:** El trabajo se realizó con el fin de determinar si los valores de pérdida de suelos estimados a partir de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos son similares a los valores reales que se pueden obtener a partir de mediciones en campo, como el empleo de estacas de erosión. De la aplicación de ambas metodologías se obtienen valores medio de erosión muy cercanos (61,08 tn/ha/año y 60.31 tn/ha/año respectivamente) sin embargo la distribución espacial de los mismos es diferente así como los valores máximos calculados, por ello se desprende la necesidad de continuar con el registro en campo y ajustar los factores que intervienen en los procesos erosivos y que se analizan en la USLE. De este modo la estimación de la erosión resultaría precisa, permitiendo dimensionar apropiadamente obras estructurales y establecer una planificación eficiente.

### 1 INTRODUCCIÓN

La microcuenca del arroyo Vaqueros, está ubicada en las laderas de exposición oriental de la Sierra de Vaqueros, en el departamento La Caldera de la provincia de Salta. El arroyo es de tipo torrencial. La Sierra de Vaqueros presenta problemas de sobrepastoreo y compactación de suelos en el sector serrano acelerando el proceso de erosión.

Estos procesos erosivos revisten especial importancia en el riego hacia los bienes y a las personas mismas, por ello es necesario aportar datos asociado a la permanencia y al tipo de obras estructurales y no estructurales, necesarias para minimizar esta acción potencial. Esta información es de suma importancia en la planificación del uso del territorio y de los recursos que posee el municipio.

### 2 OBJETIVOS

Determinación erosión actual de la cuenca del arroyo Vaqueros mediante la aplicación de la USLE.

Determinación de la erosión en campo mediante la aplicación de estacas de erosión.

Analizar las metodologías empleadas.

### 3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo Vaqueros se localiza en el municipio de Vaqueros, departamento la Caldera, provincia de Salta, a unos 10 km al norte de la ciudad de Salta. Se accede por la Ruta Nacional N° 9 desde la ciudad de Salta.

Orográficamente corresponde a las Sierras de Vaqueros, situada en laderas de orientación Este, cuyas aguas drenan hacia el Río Vaqueros, siendo parte del sistema hídrico Mojotoro – Lavayén – San Francisco – Bermejo.

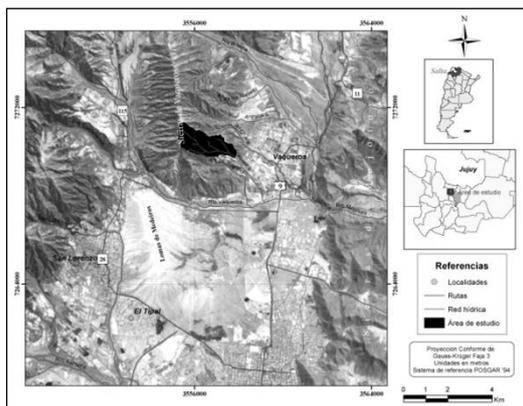


Figura 1. Ubicación general del área de estudio.

### 3.1 Clima

El clima del área de estudio es subtropical serrano, cálido, subhúmedo con estación seca (Belmonte y Nuñez, 2006), las precipitaciones se concentran entre los meses de noviembre a marzo siendo los meses de diciembre y enero los que presentan los registros de mayor precipitación.

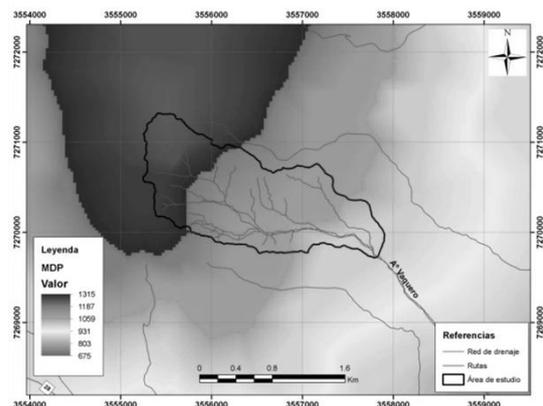


Figura 2. Modelo digital de precipitaciones

### 3.2 Suelos

La asociación San Alejo es un Regosole éútrico según la clasificación de la FAO, corresponden a depósitos residuales derivados de rocas del terciario. Color pardo (7,5YR 5/2) en seco y pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/2) en húmedo. De textura Franco arcilloso. Bloques subangulares, finos, débiles. Ligeramente duro, friable, plástico, adhesivo. pH 4,7. Abundante cantidad de raíces. Límite claro y suave. (Nadir y Chafatinos, 1990)

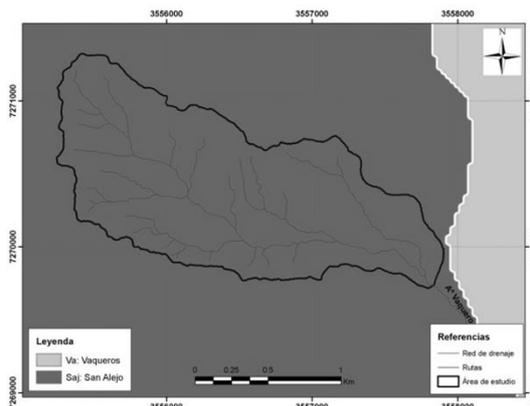


Figura 3. Mapa de suelos

### 3.3 Relieve

En la cuenca alta el relieve es colinado con una pendiente general entre el 20 y 30 % y una pendiente máxima del 60%, el lecho del cauce presenta un relieve plano inclinado con una pendiente general entre el 7 y 9 %, con una máxima de 27%.

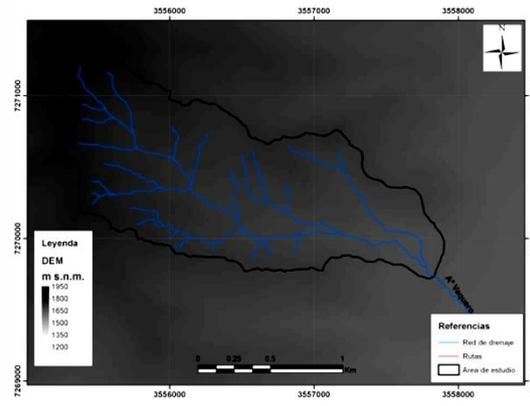


Figura 4. Modelo digital de elevaciones

### 3.4 Vegetación

La vegetación predominante en las Sierras de Vaqueros, pertenece a la Región Neotropical, Dominio Amazónico y a la Provincia Fitogeográfica de Yungas, presentándose los distritos de Selva de Transición, Selva Montana y algunas especies correspondientes a Bosque Montano (Moreno, 2010).

En el área de estudio se identificaron 4 tipos florísticos, ellos son: Bosque húmedo, bosque seco, matorrales y pastizales.

Entre las especies detectadas en el campo se pueden citar:

Laurel del cerro (*Phoebe porphyria*), Nogal del cerro (*Juglans australis*), *Eupatorium* sp., tala

(*Celtis* sp.), garabato (*Acacia praecox*), palo leche (*Sebastiania brasiliensis*), tipa blanca (*Tipuana tipu*), Tala Blanca (*Duranta serratifolia*), Ceibo salteño (*Erythrina falcata*), chalchal (*Allophylus edulis*), horco cebil (*Parapiptadenis excelsa*), hediondilla (*Cestrum parqui*), carica (*Carica quercifolia*), (*Vassobia breviflora*), coronillo (*Xylosma pubescens*, *Boehmeria caudata*, *Heliotropium* sp., aliso del cerro (*Alnus acuminata*), cedro salteño (*Cedrella lilloi*), ña de gato (*Macfadyena unguicati*), tabaquillo (*Solanum riparium*), Senecio sp., molle (*Schinus* sp.), alfilerillo (*Barnadesia odorata*), canelón (*Rapanea laetevirens*), sauce criollo (*Salix humboldtiana*), tusca (*Acacia aroma*), churqui (*Acacia caven*), lecherón (*Sapium haematospermum*).

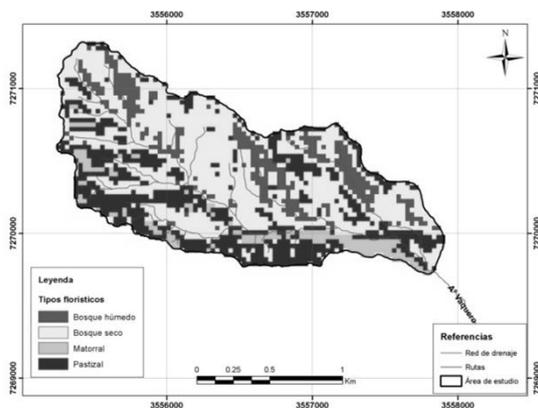


Figura 5. Mapa de tipos florísticos

## 4 METODOLOGÍA

A los fines del estudio se consideraron 2 zonas de la cuenca del arroyo Vaqueros, la aplicación de la fórmula de la USLE para establecer la pérdida de suelos se aplicó a la cuenca alta, mientras que la metodología establecida para la determinación del riesgo se aplicó al sector de la cuenca baja.

### 4.1 Procesamiento de imagen satelital

Para ello se utilizó SIG, empleando software de aplicación Idrisi Taiga y Arc Gis 10. Se procesó la imagen satelital ResourceSat1 (P6\_LISS3 path & row 314-096) del 17 de noviembre de 2012, ajustando la misma al sistema de proyección POSGAR 98. Para aislar el área de estudio se generó una máscara booleana descartando el entorno, para evaluar exclusivamente y con mayor precisión el espacio geográfico de interés. Utilizando el módulo CLUSTER, se obtuvo una clasificación del terreno, el que se utiliza como

base para la elaboración de mapas como vegetación o rugosidad del terreno. Para la valoración de la topografía se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (GMDE) generado a partir del ASTER, provisto por el NASA (2011). A partir del modelo digital de precipitaciones medias anuales (MDP) para el Valle de Lerma provisto por Belmonte (2006) y en base a los datos de precipitaciones de la localidad de Vaqueros, se generó el MDP para el área de estudio.

### 4.2 Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

Aplicando la metodología general propuesta por Villanueva (2001), la Erosión actual se obtuvo mediante la fórmula:

$$A = R * K * LS * C * P$$

A: Pérdida media anual de suelo (t/ha/año)

R: Factor de lluvia o erosividad de la lluvia (kg/ha)(mm/h).

K: Factor de erodabilidad del suelo (t/kg)(h/mm).

LS: Factor topográfico (adimensional).

C: Factor de la cobertura vegetal (adimensional).

P: Son las prácticas conservacionistas sobre el suelo (adimensional).

Factor R: Este parámetro representa la energía cinética de la lluvia. El agua de la misma provoca la erosión del suelo por el impacto de las gotas sobre su superficie y a través del escurrimiento. El índice que expresa su capacidad de provocar erosión se conoce como erosividad. Cuando se mantienen constantes los otros factores que pueden dar lugar a la erosión, la erosividad es proporcional al producto de la energía cinética total de las gotas de lluvia y su intensidad máxima en treinta minutos.

Debido a la carencia de registros pluviográficos y por lo tanto la imposibilidad de trabajar con valores de máxima intensidad, como lo requiere el modelo original, se aplicó el modelo de Arnoldus (1978), citado por Moreno (2012), el que permite una aproximación al valor del factor R. El modelo se basa en el IF o índice de Fournier (1960) citado Moreno (2012), también llamado índice de agresividad climática, el que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía y que considera la precipitación mensual del mes más húmedo. Su fórmula es la siguiente:

$$R = a \text{ Índice FAO} + b$$

R: Factor de erosividad de las lluvias (kg.mm/ha.h)

a y b: Coeficientes de la recta de regresión que dependen del lugar.

—

p: Precipitación media mensual (mm); P: Precipitación media anual (mm); a = 4,17; b = -152

La fórmula final es la siguiente:

Dado que con la aplicación del IFM o Índice de la FAO se obtiene un sólo valor para todos los meses del año, se trabajó con el coeficiente pluviométrico propuesto por Moreno (2010), el que permite captar las variaciones a lo largo del año sobre la totalidad del área, píxel por píxel, para aplicarlas al MDP, utilizando la calculadora de mapas del soft utilizado, definiéndose las siguientes fórmulas:

—

ci: coeficiente pluviométrico correspondiente al mes considerado; pi: precipitación media mensual del mes considerado; P: precipitación media anual

—

mdpi: modelo de precipitación media mensual; MDP: Modelo de precipitación media anual

—

Factor K: Dado que la fórmula propuesta por la U.S.L.E. requiere, entre otras, el porcentaje de arena muy fina, el cual es difícil de precisar puesto que no se lo obtiene de los análisis físicos rutinarios en los laboratorios de suelos, el cálculo se llevó a cabo mediante la utilización de la Curva de Determinación del Factor K de la Soil and Water Conservation Society (SWCS, 1995, extraído de Villanueva, 2001), la que requiere el valor de la media geométrica de las partículas de cada tipo de suelo, lo cual ha sido propuesto por la R.U.S.L.E. (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos Revisada). Para su obtención se aplicó la siguiente fórmula, considerando los datos relacionados con arena, limo y arcilla.

$$GM = \left\{ \left[ \frac{(\% \text{ a.Dg a}) (\% \text{ L.Dg L}) (\% \text{ A.Dg A})}{100} \right] \right\}^{1/3}$$

GM: media geométrica; Dg: diámetro medio; a: arcilla; L: limo; A: arena

Con el valor de cada media geométrica obtenida, entrando por la antes mencionada gráfica, se obtuvo el valor del factor K para cada tipo de suelo.

Factor topográfico LS: Está integrado por los factores L y S.

Para el cálculo combinado de estos factores se aplicó la siguiente fórmula (Marmol, 2008: página 190):

L: Longitud de la pendiente; S: Grado de la pendiente expresado en m/m.

El valor de L se tomó de Moreno (2012), el cual considera la longitud de la diagonal del píxel medido en el terreno para la imagen utilizada (resolución de 23.5 m).

Utilizando el MDE, se ingresa la fórmula a la calculadora de mapas del programa, para obtener el valor conjunto del factor LS para cada uno de los píxeles que conformaron el mismo.

Factor C: Es el factor de cobertura vegetal y expresa el grado de protección que ejerce la vegetación sobre el suelo. Su determinación se efectuó a partir de las mediciones de la cobertura en campo y de la aplicación de las tablas de Wischmeier y Smith (1979) tomada de Marmol (2008).

Factor P: Es el factor de las prácticas conservacionistas y de control de erosión del suelo. Este factor puede tomar valores entre 0 y 1, siendo el valor 1 aplicado a los sitios en los que no se realizan ninguna de las mencionadas prácticas, como es el caso de la cuenca estudiada.

Erosión actual: Aplicando la fórmula de la USLE se obtiene la adición de los factores que la caracterizan. Los diferentes valores de pérdida de suelos fueron agrupados de acuerdo a las clases de erosión propuestas por la FAO - PNUMA - UNESCO (Moreno, 2012):

Tabla 1. Evaluación de la degradación de suelos

Clase	Pérdida de suelos (t/ha/año)	Nivel de degradación
1	Menos de 10	Ninguna o ligera
2	10 – 50	Moderada
3	50 - 100	Acusada
4	50 – 200	Alta
5	Mayor a 200	Muy alta

Fuente: FAO - PNUMA – UNESCO (Moreno, 2012).

#### 4.3 Determinación de la pérdida de suelo por estacas de erosión

La cuantificación de pérdidas de suelo se hace a través del método modificado de Mendoza Álvarez (2005), siendo la formula:

Donde:

P= pérdida de suelo; (unidades t/ha/año)

H= altura de la lámina pérdida; (m/año)

D= densidad aparente del suelo ( $g/cm^3$  o  $t/m^3$ )

F= factor de conversión ( $10000 m^2/ha$ )

H: Los sitios de muestreos se establecen a partir del mapa de tipos florísticos. La medición de la lámina perdida en el suelo se efectúa mediante la implementación de estacas o clavos de hierro de diámetro igual a 6mm para evitar la influencia de la misma en el flujo laminar de agua. La lectura se realiza empleando una arandela modificada para registrar la superficie alrededor de la estaca que fue erosionada, mediante el uso de un calibre. Este valor se establece para el periodo de un año.

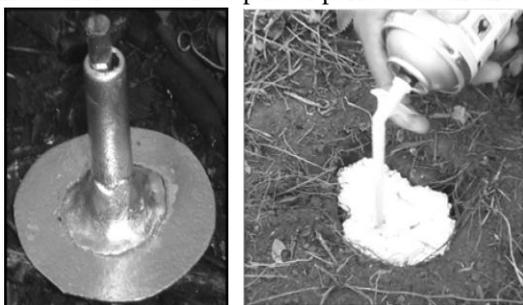


Figura 6. Izq.: estaca de erosión; Der. Agregado de espuma de poliuretano en sitio de muestreo de suelo.

D: la densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso. Para la determinación de la densidad aparente del suelo se extraen muestras de suelo del sitio en cual se localizan las estacas, en el sector del cual se retira la muestra se vierte espuma de poliuretano la que permitirá medir el volumen de suelo en laboratorio. La muestra

sacada es secada en estufa a 110°C por 24 horas, luego se procede a pesar las muestras mediante el uso de balanza analítica (Balanza Denver Instrument- Modelo: PK-2401).

Para evaluar la precipitación se implementó un pluviómetro in situ, además de contar con datos provistos por una estación total, cuyos datos se obtienen del INTA (2013). Este valor permite relacionar la pérdida de suelo con las precipitaciones, y compara los resultados obtenidos mediante ambas metodologías.



Figura 7. Pluviómetro

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Pérdida de suelos mediante aplicación de la USLE

Factor R: En base al MDP y a la metodología planteada es que se obtiene el mapa del factor r, con valores entre 0 y 712,6 (kg.mm/ha.h).

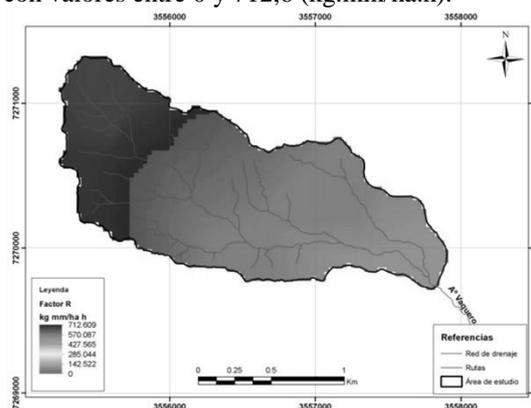


Figura 8. Mapa del factor R

Factor K: En base al mapa de suelos y a la metodología planteada es que se obtiene el valor para el factor K de 0,2567 (t/kg)(h/mm), siendo éste el único valor debido a que es el único suelo presente en el área de interés.

Tabla 2. Cálculo del diámetro medio de cada componente textural y valoración del factor K

	Suelos San Alejo	
	%	diámetro medio
Arcilla	35,6	0,001 mm
Limo	31,8	0,020 mm
Arena	22,6	0,100 mm
Media geométrica	0,08	
Factor K	0,2567	

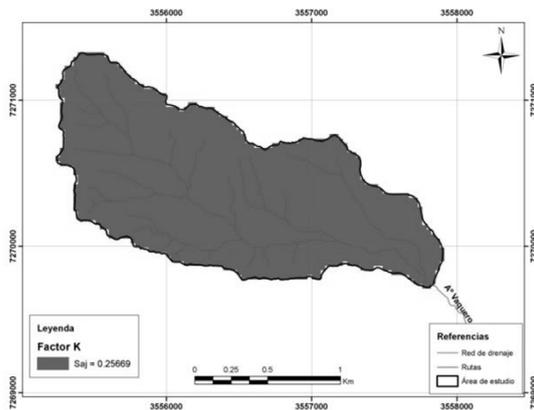


Figura 9. Mapa del factor K

Factor LS: En base al mapa de DEM y a la metodología utilizada es que se obtiene el valor para el factor LS entre 0 y 14,02.

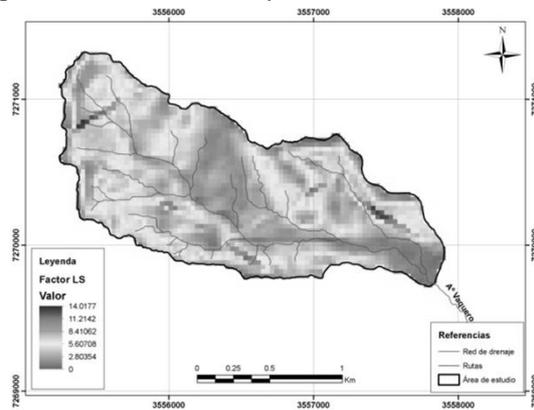


Figura 10. Mapa del factor LS

Factor C: En base al mapa de vegetación y a la metodología utilizada es que se obtiene el valor para el factor C que figuran en la tabla a continuación:

Tabla 3. Valores del factor C, según unidades de vegetación

Unidades de vegetación	Valor de C	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Pastizal	0.13	69.5	29.5
Matorral	0.1	15.8	6.7
Bosque seco	0.087	118.1	50.2
Bosque húmedo	0.012	32.0	13.6

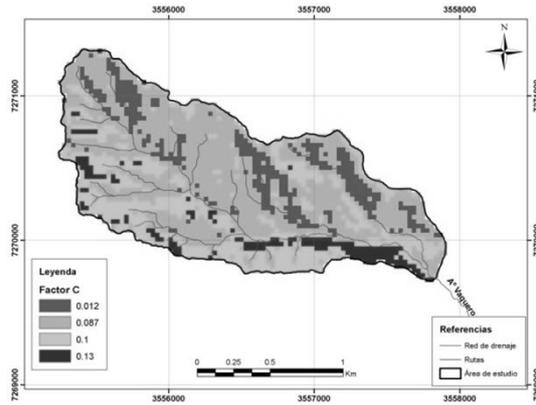


Figura 11. Mapa del factor C

Erosión actual: Del producto de los factores que integran la fórmula de la USLE, considerando al factor P con el valor de 1 para toda la cuenca, se obtiene el mapa de pérdida de suelos, con un promedio ponderado de 61,08 t/ha/año lo que indicaría en términos generales una erosión acusada.

Tabla 4. Proporción de erosión actual

Erosión actual	Valor medio por clase	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ninguna o ligera	5	22.7	9.7
Moderada	30	93.5	39.7
Acusada	75	86.5	36.8
Alta	150	31.4	13.4
Muy alta	223.46	1.1	0.5

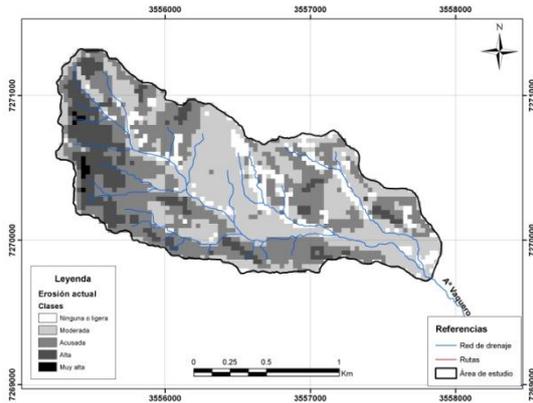


Figura 12. Mapa de erosión actual

### 5.2 Pérdida de suelo por estacas de erosión

Los valores obtenidos a partir de las mediciones en campo se expresan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Valores de pérdida de suelo obtenidos a partir de estacas.

Unidad de vegetación	H (m)	D (g/cm <sup>3</sup> o t/m <sup>3</sup> )	P (t/ha/año)
Pastizal	0.00023327	0.958	2.234751
Matorral	0.00950585	1.676	159.318123
Bosque seco	0.00816454	1.118	91.279532
Bosque húmedo	0.00458380	0.508	23.285728

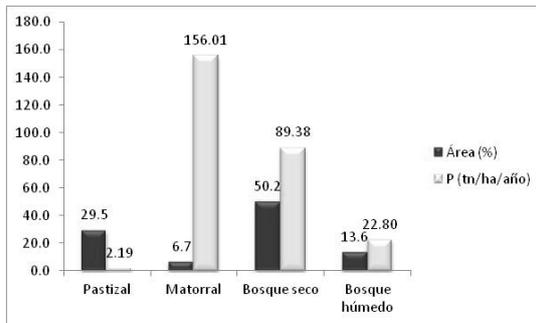


Figura 13. Unidades florísticas en relación con la pérdida de suelo y la proporción de área para cada una.

El máximo valor se presenta para el Matorral con 159.3 tn/ha/año, mientras que el promedio ponderado por la proporción de área es de 60.31 tn/ha/año.

## 6 ANÁLISIS

Comparando los resultados mediante la aplicación de la USLE se obtuvo 61,08 t/ha/año como promedio ponderado, con valores máximos

de 246.92 t/ha/año, mientras que aplicando el método de medición de estacas de erosión los valores ponderados son de 60.31 t/ha/año, y el valor máximo obtenido es de 159.3 t/ha/año, este último mucho más bajo que el calculado a partir del primer método, en cambio los valores medio son similares. Si consideramos la distribución de la erosión en el mapa en el primer método se considera la influencia de la vegetación, la distribución de las precipitaciones, y la topografía, considerando el suelo a nivel de serie, mientras que en el segundo método se considera la erosión como respuesta a los factores que condicionan la misma, sin embargo la distribución en la cartografía responde principalmente a la vegetación, y los valores obtenidos para cada tipo florístico se establecen considerando la densidad aparente del suelo en el sitio del muestreo.

## 7 CONCLUSIONES

La aplicación de la USLE permite un mejor ajuste de la distribución de la erosión mediante la incorporación de los factores que la caracterizan, mientras que el método de las estacas de erosión permite una mayor aproximación a los valores reales de pérdida de suelo que ocurren en la cuenca.

En ambas metodologías la vegetación se destaca por el grado de protección que genera, disminuyendo la influencia de los restantes factores que afectan los procesos erosivos.

Es importante realizar mediciones de estacas en parcelas que permitan comparar los valores de pérdida de suelo en distintos tipos de suelos y topografía ya que para el presente se evaluó la vegetación y las precipitaciones. De este modo las metodologías serán comparables y se podrán realizar ajustes en los modelos empleados para obtener una adecuada distribución de la erosión en campo con valores cercanos a los reales, y el cálculo de la erosión resultaría preciso, permitiendo dimensionar apropiadamente obras estructurales y establecer una planificación eficiente.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

Belmonte, S. & V. Nuñez, “Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas de SIG”, Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, N° 6, pág. 15-27, ISSN: 1578-5157, 2006.

- Campos, P. A., "Aplicación de herramientas de SIG para el análisis de paisaje. Universidad Nacional de Catamarca", Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Revista científica: CIENCIA, Vol. 4, N° 10, Noviembre, páginas 87 – 103, ISSN: 1668-2009, <http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/index.html>, 2009.
- Google earth. SIG libre. [En línea], <<http://earth.google.com/intl/es/index.html>> [Consulta: 2013], 2013.
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informe climatico mensual para la localidad de Vaqueros, Argentina. [http://anterior.inta.gob.ar/prorenea/ema\\_vaqueros/NOAAPRMO.txt](http://anterior.inta.gob.ar/prorenea/ema_vaqueros/NOAAPRMO.txt), 2013
- Mármol, L. A., Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes, Editores: Silvia Elena Ferreira y Laura Mármol, ISBN: 978-987-05-0569-3, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina, 2008.
- Mendoza Álvarez M. E., Métodos de clavos y rondanas. Manual de Métodos Sencillos para estimar Erosión Hídrica. Documento N° 502. COMITÉ EDITORIAL: Matilde Somarriba Chang - UNA, Miguel Obando - UAP-PASOLAC, Jorge Alonso Beltrán-CIAT-Laderas. Managua, Nicaragua, 2005.
- Moreno, R. I., Ordenamiento territorial mediante criterios de sostenibilidad ambiental y aplicación de un SIG (Sistema de Información Geográfica) en Sierras de Mojotoro (Departamento Cerrillos, Provincia de Salta, Argentina), Tesis de la Maestría en Recursos Naturales, Universidad Nacional de Salta, 2012
- Moreno, R. I., P. A. Campos & A. J. Avendaño, Estimación de la erosión hídrica de una microcuenca perteneciente a las Sierras de Mojotoro (Salta, Argentina) mediante la utilización de herramientas SIG y de un coeficiente pluvial para el cálculo del factor R de la USLE, Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA, Editorial: EdiUNJu, San Salvador de Jujuy, 2010.
- Nadir, A. & T. Chafatinos, Los Suelos del N.O.A. (Salta y Jujuy), Tomo 1, Salta, Argentina, 1990.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) on October 17, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, 2.011.
- Villanueva G., Osinaga R. & A. Chávez, Manual de Tecnología de los Suelos Agrícolas - (El Uso Sustentable de los suelos), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, 2001.