

Impactos extremos en la hidrogeomorfología de cuencas semiáridas. Efectos de la deforestación y el cambio climático en el centro de Argentina

Celina S. Santoni

Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada de San Luis (UNSL – CONICET), Avda. Italia 1556 – D5700HHW San Luis – ARGENTINA; www.gea.unsl.edu.ar ; celinasantoni@gmail.com

Sergio Contreras López

*FutureWater Spain, S.L., Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena – ESPAÑA; www.futurewater.es
s.contreras@futurewater.es*



Material docente preparado para el curso de verano “Cambio climático e hidrología: desde la ciencia a la práctica en gestión hídrica y manejo del suelo” organizado por la Universidad Politécnica de Cartagena e impartido del 10 al 12 de julio de 2013.



I INTRODUCCIÓN

En las llanuras sedimentarias, caracterizadas por su escasa pendiente regional ($<0.1\%$), las redes de evacuación de agua superficial y sales hacia el océano suelen estar poco desarrolladas. En periodos de excedentes hídricos, la falta de una red de drenaje superficial vuelve a estas regiones extremadamente vulnerables a inundaciones y a la movilización, redistribución lateral y acumulación de sales en las zonas más deprimidas. Es previsible que la vulnerabilidad hidrogeomorfológica de estos paisajes se vea incrementada en el medio/largo plazo como consecuencia del cambio climático, e incluso acelerada bajo escenarios de modificaciones en el uso de la tierra. En este trabajo describimos una situación de creciente vulnerabilidad hidrogeomorfológica en el centro de Argentina, donde la disección abrupta del terreno y la aparición de nuevos cauces de agua han provocado una importante pérdida de suelo y la salinización de aguas y tierras. Se explican los posibles factores causales del fenómeno (cambios de uso de la tierra, cambio climático, y actividad sísmica) en base a observaciones y antecedentes locales y regionales, y se presentan un conjunto de metodologías y herramientas de estudio que contribuyen a identificar y diagnosticar los riesgos ambientales asociados al reemplazo de la vegetación nativa y su conversión en agricultura.

Existen evidencias destacables de que la conversión de ecosistemas de bosques secos en agrosistemas de secano en las grandes llanuras de Australia, África, Norteamérica y centro-norte de Argentina (regiones fitogeográficas del Espinal y el Chaco) se han acompañado de ascensos del nivel freático y del transporte de sales hacia la superficie, un fenómeno de salinización secundaria conocido como “dryland salinity” (NLWRA 2001, Pannell 2001). En condiciones de no perturbación, los bosques de ambientes semiáridos se caracterizan por sus elevadas tasas de evapotranspiración y por el uso exhaustivo que la vegetación hace del agua de lluvia, minimizándose la recarga de agua hacia los acuíferos (e.j. Kim y Jackson 2011). La casi ausencia de recarga y el escaso flujo lateral impuesto por una topografía llana, favorecen la acumulación en la zona vadosa de las sales de origen

atmosférico. La consecuencia directa del reemplazo de los bosques por agricultura radica en la reducción drástica de las pérdidas por evapotranspiración, el incremento del drenaje profundo y la recarga, el lavado de las sales acumuladas en la zona vadosa y, finalmente el ascenso gradual del nivel freático. Debido al escaso gradiente hidráulico de los paisajes de llanura, las sales movilizadas pueden reaparecer en superficie en las zonas topográficamente más deprimidas dando lugar al mencionado “dryland salinity”. Este fenómeno ha causado impactos agrícolas y ambientales muy negativos en Australia habiéndose estimado las pérdidas monetarias para el oeste del país, la región más afectada, en aproximadamente mil millones de dólares por año (NLWRA 2001, Clarke et al. 2002)

Los impactos que los cambios de uso del suelo pueden inducir sobre la hidrología de estas regiones pueden verse potenciados por el cambio climático y la recurrencia de seísmos o terremotos. Los incrementos en la precipitación media y en la frecuencia e intensidad de eventos extremos predichos para algunas regiones por los modelos de cambio climático, podrían aumentar significativamente las pérdidas netas de agua vía recarga subterránea y/o escorrentía superficial. Por otro lado, la incidencia de los seísmos sobre la hidrología local dependerá de la magnitud de los mismos y de la distancia del área de estudio al epicentro. Los cambios hidrológicos podrían incluir variaciones bruscas de los niveles freáticos y el caudal de los ríos, la licuefacción de los sedimentos y/o la subsidencia del terreno (Montgomery y Manga 2003). A la vez, la actividad sísmica podría actuar como disparador o “gatillo” de procesos erosivos de origen superficial relacionados con la formación de cárcavas (*gullying*) o subsuperficial como la formación y colapso de túneles (*piping/sapping*).

1.1. Caso de Estudio

La cuenca de El Morro, en la zona central de Argentina y al norte de la ciudad de Villa Mercedes (provincia de San Luis), se enmarca en un paisaje sedimentario que ha sufrido importantes cambios en el último siglo. La región presenta un clima continental semiárido y sedimentos loésicos-arenosos, cuyos estratos superficiales fueron depositados, según dataciones OSL, hace 9000 años (Tripaldi y Forman 2007, Santoni et al. 2010). La precipitación media anual es de 605 mm (período: 1903-2010). En general, las lluvias se

concentran durante el periodo estival y en muchos casos se generan en forma de tormentas convectivas con elevada variabilidad espacial. La pendiente media regional es del 1% (Figura 1).

Desde hace poco menos de 30 años, esta cuenca ha experimentado una transformación geomorfológica con pocos precedentes en el mundo. Este paisaje, en el que no existió una red de drenaje superficial bien definida y activa desde la deposición del último estrato sedimentario, comenzó a disectarse por la aparición de nuevos ríos y arroyos surgidos súbitamente en los años 1985, 2007 y 2008. Durante estos episodios, ocasionalmente asociados a eventos intensos de precipitación o periodos muy húmedos, se movilizaron grandes cantidades de sedimento y surgieron en superficie grandes volúmenes de agua, por lo general salinas, antes inexistentes en la cuenca. El fenómeno ha generado importantes pérdidas ambientales y económicas en la economía local y regional, provocando daños en infraestructuras y obras civiles (más de \$ 15 millones invertidos en reconstrucciones, inundaciones e inhabilitación de viviendas), en suelos (pérdida de ~200.000 ha de tierras fértiles) y en la actividad agropecuaria (mortalidad de ganado) (Figura 2).

El área ha estado cubierta históricamente por vegetación semiárida típica, en forma de bosques leñosos y abiertos de *Prosopis caldenia*, *P. flexuosa* y *Geoffroea decorticans*. En la actualidad el paisaje está dominado por grandes extensiones de agricultura de secano cubriendo el bosque semiárido una pequeña fracción de la superficie total de la cuenca. Se ha considerado a la cuenca como una de las zonas con más activa y temprana deforestación en la región. Los cultivos predominantes son de verano (soja, maíz y girasol) en detrimento de los de invierno y las pasturas que se han vuelto poco comunes.

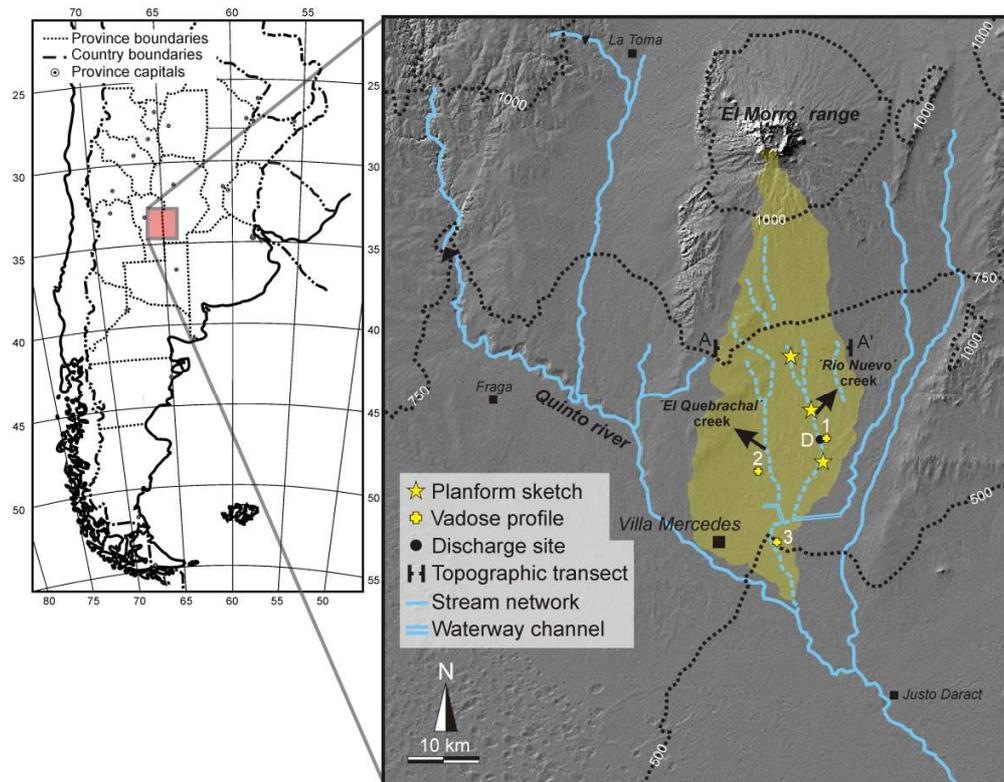


FIGURA 1 - LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA (SOMBREADO VERDE) Y SITIOS DE ESTUDIO. LOS NÚMEROS (1-3) INDICAN LOS TRES SITIOS DE MUESTREO DE PERFILES VADOSOS Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA. EL SITIO D INDICA EL LOTE DE TRAZADO DE LA TRANSECTA DE GEOELÉCTRICA. LAS LÍNEAS CONTINUAS CELESTES FUERA DE LA CUENCA MARCAN RÍOS QUE HAN EXISTIDO HISTÓRICAMENTE, MIENTRAS QUE LAS LÍNEAS DISCONTINUAS CELESTES DENTRO DE LA CUENCA MUESTRAN ALGUNOS DE LOS CAUCES PRINCIPALES SURGIDOS EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS. LAS CURVAS DE NIVEL SE GRAFICAN CON LÍNEAS PUNTEADAS NEGRAS. CON CUADROS NEGROS SE IDENTIFICAN LAS CIUDADES MÁS IMPORTANTES Y CON UN TRIÁNGULO SE INDICA EL DIQUE PRINCIPAL CERCANO A LA ZONA DE ESTUDIO (EXTRAÍDO DE CONTRERAS ET AL., 2012)



FIGURA 2 – FOTOGRAFÍAS DESCRIBIENDO LA TRANSFORMACIÓN EN LA SUBCUENCA, CON NUEVOS CAUCES DE AGUA SALINA (FOTO IZQ.) Y GRAN TRASLADO Y ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN LAS ZONAS BAJAS (FOTO DER.) (EXTRAÍDO DE CONTRERAS ET AL., 2012).

1.2. Aproximaciones

En vista a la necesidad de identificar y adoptar medidas de prevención y corrección hidrológico-forestal que frenaran de manera efectiva la pérdida y salinización de suelos en la cuenca, se realizó un diagnóstico previo de los factores causales y los procesos involucrados en el colapso e inestabilidad hidrogeomorfológica de la cuenca.

Se plantearon tres agentes causales básicos, no excluyentes entre sí, que podrían haber explicado la formación súbita de cursos de agua en un paisaje que en los últimos 9000 años (edad del estrato sedimentario más superficial) de historia no sufrió incisiones. Los agentes causales valorados son de naturaleza climática, antrópica y geodinámica. El agente climático involucra los efectos de las variaciones climáticas acontecidas en la región en los últimos 50-60 años, con una tendencia clara al aumento de las precipitaciones y a una mayor disponibilidad de agua en el sistema. El agente antrópico viene impuesto por los cambios de cobertura y uso de la tierra, particularmente el reemplazo de bosques semiáridos por cultivos anuales, que sugerirían posibles cambios en el balance de agua (reducción de la evapotranspiración y aumento de la recarga). Finalmente, el agente geodinámico estaría integrado por la actividad sísmica como desencadenante de procesos de licuefacción del sedimento, y de colapsos del terreno mediante fenómenos de erosión subsuperficial (*piping* y *sapping*). Para entender el papel relativo que cada agente causal pudiera haber tenido en los cambios hidrogeomorfológicos observados en la cuenca de

estudio, se empleó una aproximación multiescala y diferentes técnicas basadas en el análisis de imágenes de satélite y bases de datos meteorológicas y sísmicas, datos de nivel freático y comparación de contenido de agua y sales en los perfiles vadosos, a nivel de stand y de paisaje.

II MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. *Descripción del proceso a nivel de cuenca*

Análisis con imágenes de satélite: se realizó con el fin de describir la evolución de la superficie cubierta con bosque semiárido, y de la densidad de drenaje a lo largo del período de estudio (1976-2010). Se utilizó un conjunto de siete imágenes Landsat (período 1976-2010) y un juego de fotografías pancromáticas del año 1962. Las fotografías, que cubrían un 46% de la cuenca, fueron previamente ortorrectificadas e integradas junto con las imágenes de satélite en un Sistema de Información Geográfica. La superficie de bosque y la extensión de la red de drenaje para cada fecha se digitalizó sobre compuestos en falso color. La densidad de drenaje fue estimada como la relación entre la longitud total de los cauces y el área total de la cuenca (809 km²).

Análisis de variaciones en la profundidad del nivel freático: se estimó la evolución de los cambios en la profundidad del nivel freático en el período 1940-2011 a partir de información de pozos y sondeos, tanto históricos como actuales (bases de datos publicadas en Proyecto de Recursos Hidrológicos Subterráneos de la Provincia de San Luis 2002, Barbeito et al. 2008, Santoni et al. 2012).

Análisis de tendencias y extremos en precipitaciones, y de sismos: a partir de los datos de precipitación, mensuales (período 1903-1962) y diarios (período 1962-2010), de la estación meteorológica de Villa Mercedes, se investigó la existencia de tendencias de precipitación en el último siglo y se analizó la recurrencia de eventos extremos.

La actividad sísmica cercana a la cuenca se evaluó temporalmente y se relacionó con el crecimiento en la red de drenaje. A partir de bases de datos globales (USGS Geological

Survey Earthquakes Program, <http://earthquake.usgs.gov/>) y regionales (INPRES, <http://www.inpres.gov.ar/INPRES>), se recopiló información sobre la magnitud, profundidad del hipocentro, y distancia de la cuenca al epicentro de aquellos sismos ocurridos a una distancia menor a 350 km de la cuenca.

II.2. ***Estudio de cambios a nivel de parcela y paisaje***

Análisis de mediciones ecohidrológicas (parcela): se cuantificó la variación en profundidad del contenido de agua y sales (cloruros) y se estimó la recarga en perfiles vadosos realizados en parcelas pareadas de agricultura vs bosque en tres localizaciones. Las parcelas bosque-agricultura en cada localización estaban lo suficientemente cercanas entre sí para garantizar unas condiciones ambientales similares. Los tres casos de parcelas agrícolas presentaban un desarrollo agrícola entre 5-40 años, mientras que sus pares con bosque semiárido fueron utilizados como pastura para ganado vacuno en los últimos años. Las perforaciones se realizaron con barrena manual hasta los 6 metros de profundidad o el nivel freático, y las muestras de suelo se colectaron a intervalos de 50 cm, información que permitió estimar la recarga bajo los diferentes tipos vegetales.

Análisis con geoelectrica (paisaje): se realizó una calicata geoelectrica para la obtención de una tomografía de resistividad del terreno a lo largo de una transecta que atravesó un gradiente de usos de suelo (bosque en buen estado, bosque sobrepastoreado y agricultura). La técnica geoelectrica para la medición de la resistividad de los sedimentos aportó información sobre el estado de humedad y grado de salinidad de la zona vadosa, y la posición del nivel freático.

III **RESULTADOS**

III.1. ***Cambios a nivel de cuenca***

La aparición de nuevos cauces en la cuenca de estudio ha estado estrechamente vinculada a los cambios de uso de suelo. En 1962, con una cobertura de bosque de aproximadamente un 45% del total de la cuenca, la red de drenaje en superficie era casi inexistente, con apenas

un segmento de cauce de unos 4 km de longitud. Este valor contrasta con los valores medidos para 2010, con una cobertura de bosque de un 9% y una densidad de drenaje de 0.22 km/km² con cauces distribuidos por toda la cuenca y que convergen en un arroyo principal de ~45 km de longitud y que desemboca directamente en el Río Quinto. La cobertura con bosque semiárido decreció notablemente desde 1962 a la fecha. La tasa de deforestación más elevada ocurrió a finales de los 60, perdiéndose a razón de un 1% de cobertura de bosque por año.

El nivel freático mostró ascensos en todos los pozos analizados. Se estimó una tasa de ascenso medio de 0.3 m/año, y se observaron tasas de hasta 1 m/año. Los registros históricos y actuales evidencian un ascenso gradual y sostenido del nivel freático durante el periodo de estudio (Tabla 1).

En la cuenca se ha evidenciado un incremento significativo de las precipitaciones desde la década del 60. La precipitación media en el periodo 1963-2010 fue un 22% superior al registrado durante el periodo 1903-1962 (566 mm/año vs. 688 mm/año). Sin embargo, en ambos periodos ocurrieron años muy húmedos con valores similares durante el primer período (903 mm en 1919) y el segundo período (993 mm en 1970, 930 mm en 1984, 912 mm en 2007) (Figura 3).

La actividad sísmica en las cercanías de la cuenca, considerando un radio de influencia inferior a 100 km de la cuenca, fue relativamente baja durante el período crítico de apertura de cauces. Los seísmos de mayor magnitud se registraron durante la primera mitad del siglo XX (ej. 1934, magnitud: 6,0). El último seísmo de gran magnitud registrado en las proximidades ocurrió a una distancia superior a 350 km (terremoto de Cauçete, de 7.2 y 7.4). Desde que se tienen los primeros registros (hace más de 200 años), la actividad sísmica en la región ha sido constante sin que pueda concluirse que el agente geodinámico haya sido la causa principal de la inestabilidad hidrogeomórfológica observada en la cuenca en las últimas décadas (Figura 3).

Deforestación y cambios hidrogeomorfológicos en el centro de Argentina

TABLA 1 – NIVELES FREÁTICOS HISTÓRICOS Y ACTUALES, PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE Y ASCENSO MEDIO ANUAL DE LOS NIVELES (M/AÑO). SE COMPARARON POZOS/SONDEOS VECINOS CON INFORMACIÓN HISTÓRICA Y ACTUAL. EN LOS CASOS N3, N3', N8, N9 Y N10 (RESALTADOS EN NEGRITA), LA COMPARACIÓN SE REALIZÓ ENTRE MEDICIONES OBTENIDAS EN EL MISMO POZO/SONDEO. EN EL RESTO DE LOS CASOS, LAS COMPARACIONES SE REALIZARON ENTRE MEDICIONES DE POZOS/SONDEOS VECINOS, PREVIA CORRECCIÓN DE LOS NIVELES SEGÚN LA DIFERENCIA DE COTAS (EXTRAÍDO DE SANTONI, 2012)

Niveles	Años	Niveles históricos (m)		Niveles actuales (m)		Ascenso (m)	Ascenso medio anual (m/año)
		Nivel Freático	Prof. desde superficie	Nivel Freático	Prof. desde superficie		
N1	1975 vs 2007	480	12	488	5	8	0.3
N2	1975 vs 2010	553	5	560	7	7	0.2
N3	1978 vs 1999	712	15	718	9	6	0.3
N3'	1999 vs 2010	718	9	723	4	5	0.5
N4	1976 vs 2000	638	28	662	12	24	1
N5	1975 vs 2011	505	8	506	1.9	1	0.03
N6	1975 vs 2011	507	3	509	1.1	2	0.06
N7	1975 vs 2011	477	7	479	5.7	2	0.06
N8	1989 vs 2010	736	12	744	4	8	0.4
N9	1968 vs 2010	715	15	728	2	13	0.3
N10	1977 vs 2010	659	14	673	0	14	0.5

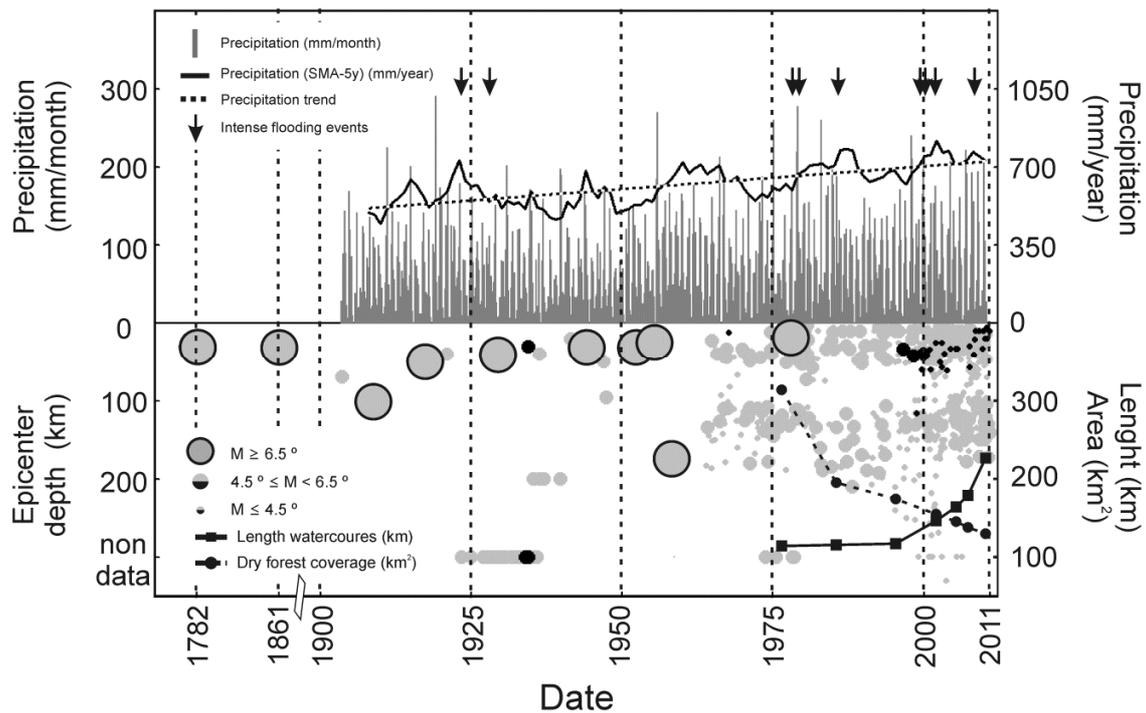


FIGURA 3 – EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PRECIPITACIÓN (PARTE SUPERIOR DEL GRÁFICO), ACTIVIDAD SÍSMICA (CÍRCULOS GRISES/NEGROS), SUPERFICIE FORESTADA (LÍNEA DE PUNTOS, EN KM²), Y DE LA LONGITUD TOTAL DE CAUCES (LÍNEA CONTINUA, EN KM) (PARTE INFERIOR DEL GRÁFICO). EN LA PARTE SUPERIOR SE MUESTRAN: LA PRECIPITACIÓN MENSUAL (BARRAS GRISES, EJE DE LA IZQUIERDA), LA MEDIA MÓVIL DE 5 AÑOS (EN MM/AÑO, LÍNEA CONTINUA NEGRA) Y LA TENDENCIA EN LAS PRECIPITACIONES PARA EL PERÍODO 1903-2010 (LÍNEA DE PUNTOS, EJE DE LA DERECHA). LOS EPISODIOS DE INUNDACIÓN SE MARCAN CON FLECHAS. EN LA PARTE INFERIOR DEL GRÁFICO, LOS SEÍSMOS SE CARACTERIZAN POR LA LA PROFUNDIDAD AL HIPOCENTRO, MAGNITUD (M) Y DISTANCIA DEL EPICENTRO A LA CUENCA DE ESTUDIO (CÍRCULOS NEGROS PARA < 100 KM, CÍRCULOS GRISES PARA 100-350 KM) (EXTRAÍDO DE CONTRERAS ET AL., 2012).

III.2. Cambios a nivel de stand

Los perfiles vadosos mostraron una gran acumulación de sales bajo el bosque seco que, por lo general, se perdió en las parcelas agrícolas. La masa de cloruro acumulada hasta los tres metros de profundidad fue de 300 a 950 g/m² en bosques y de 14 a 50 veces menor bajo cultivos. Las máximas concentraciones de cloruros en los perfiles de bosque se alcanzaron entre los 1.5 y 2.5 m de profundidad, llegando a ~6000 mg/L de solución del suelo en uno de los sitios. El contenido de agua acumulada en los perfiles hasta los 3 metros de

profundidad, en cultivo duplicó al de los bosques (Figura 3). La recarga estimada a partir del método del flujo de agua residual (Phillips 1994) fue significativamente diferente entre los perfiles de bosque y los de agricultura. En general, y a pesar del aumento de las precipitaciones observadas en la región, los valores de recarga estimados en las parcelas de bosque fueron inferiores a 0.2 mm/año, incluso en situaciones de pastoreo. En contraposición, la recarga en parcelas agrícolas osciló entre 8 y 22 mm/año, siguiendo el mismo método de cálculo (Figura 4).

III.3. *Cambios a nivel de paisaje*

En la tomografía geoelectrica de resistividad para la transecta analizada, se identificaron una diversidad de patrones horizontales que se destacan en las transiciones en superficie entre el bosque semiárido y la agricultura. En general se observan tres dominios en los perfiles: (a) en los primeros dos metros de profundidad se observan valores altos de resistividad (suelos secos) en bosque y de baja resistividad (suelos húmedos) en el sector agrícola; (b) Entre los 3 y 5 m de profundidad la resistividad de ambos sistemas disminuye y la de los bosques es inferior a la observada en agricultura. Esto sugiere que en este sector del perfil el lavado de sales fue más importante en la disminución de la resistividad que el aumento de la misma, que pudo haber generado el humedecimiento., y (c) a partir de los 5-6 metros de profundidad, los valores de resistividad convergen indicando la cercanía o presencia del nivel freático. Sin embargo, justo por encima de esta zona, y bajo agricultura la resistividad se incrementa levemente lo que sugeriría una llegada de agua con menor contenido de sales. Esta pequeña diferencia en la zona de transición coincide con las mediciones a nivel de stand, donde los sedimentos saturados bajo bosque presentaban un mayor contenido de sales. Finalmente, es posible detectar diferencias en la humedad en las distintas situaciones de uso agrícola. Cuanto más antigua es la agricultura, mayor humedad se detecta en el perfil y el nivel freático se encuentra más cercano a la superficie (Figura 5).

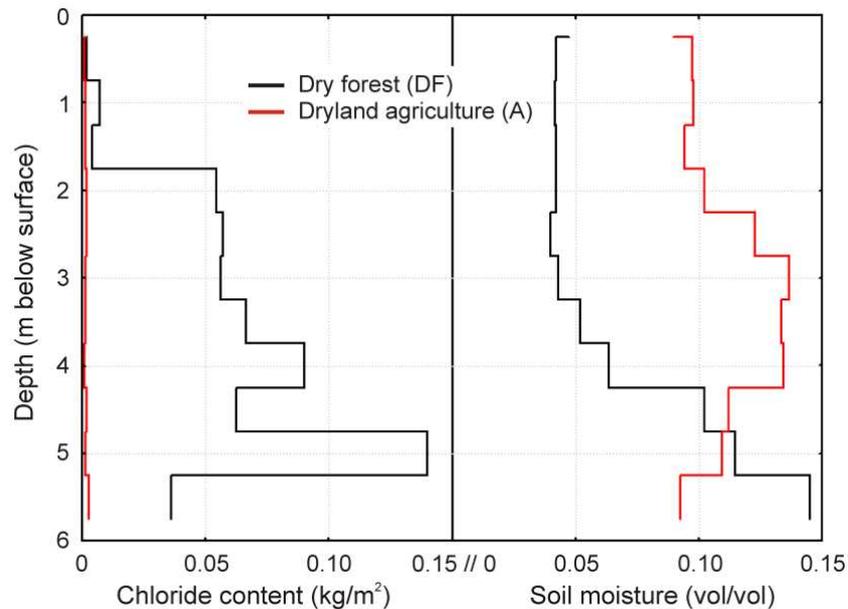


FIGURA 4 – PERFILES DE CLORURO Y HUMEDAD DEL SUELO OBSERVADOS BAJO PARCELAS DE BOSQUE SEMIÁRIDO (DF) Y AGRICULTURA DE SECANO (A) (SITIOS 1-3 EN FIGURA 1). LAS CURVAS SE CONSTRUYERON A PARTIR DE LA MEDIANA DE LAS MEDICIONES TOMADAS EN LOS TRES SITIOS PAREADOS DF-A Y CON TRES RÉPLICAS EN CADA SITIO (EXTRAÍDO DE CONTRERAS ET AL., 2012).

IV DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los perfiles de agua y sales obtenidos a nivel de parcela evidencian el efecto de la agricultura generando cambios en el balance hídrico (incremento de la recarga) y promoviendo el lavado de sales. Estas evidencias apoyan los resultados obtenidos a nivel de paisaje y las observaciones realizadas a escala de cuenca. La abundancia de cloruros y la escasa humedad del suelo por debajo de los 2-3 m de profundidad confirman que los bosques secos de la región han limitado la generación de recarga hasta el presente, incluso a pesar del incremento de las precipitaciones registrado en los últimos 50-60 años. En contraposición, los suelos bajo agricultura carecen de sales en profundidad y se caracterizan por presentar perfiles más húmedos como consecuencia del incremento de la recarga después de varios años de uso agrícola.

El análisis a nivel de cuenca muestra una nueva situación del fenómeno de “dryland salinity” descrito en Australia. A pesar de que existen diferencias entre el caso australiano y

el presentado aquí, las situaciones de contexto son claramente comparables y en el caso local es posible atribuir estos cambios dramáticos de movilización de agua y sales al establecimiento de la agricultura por largos períodos de tiempo.

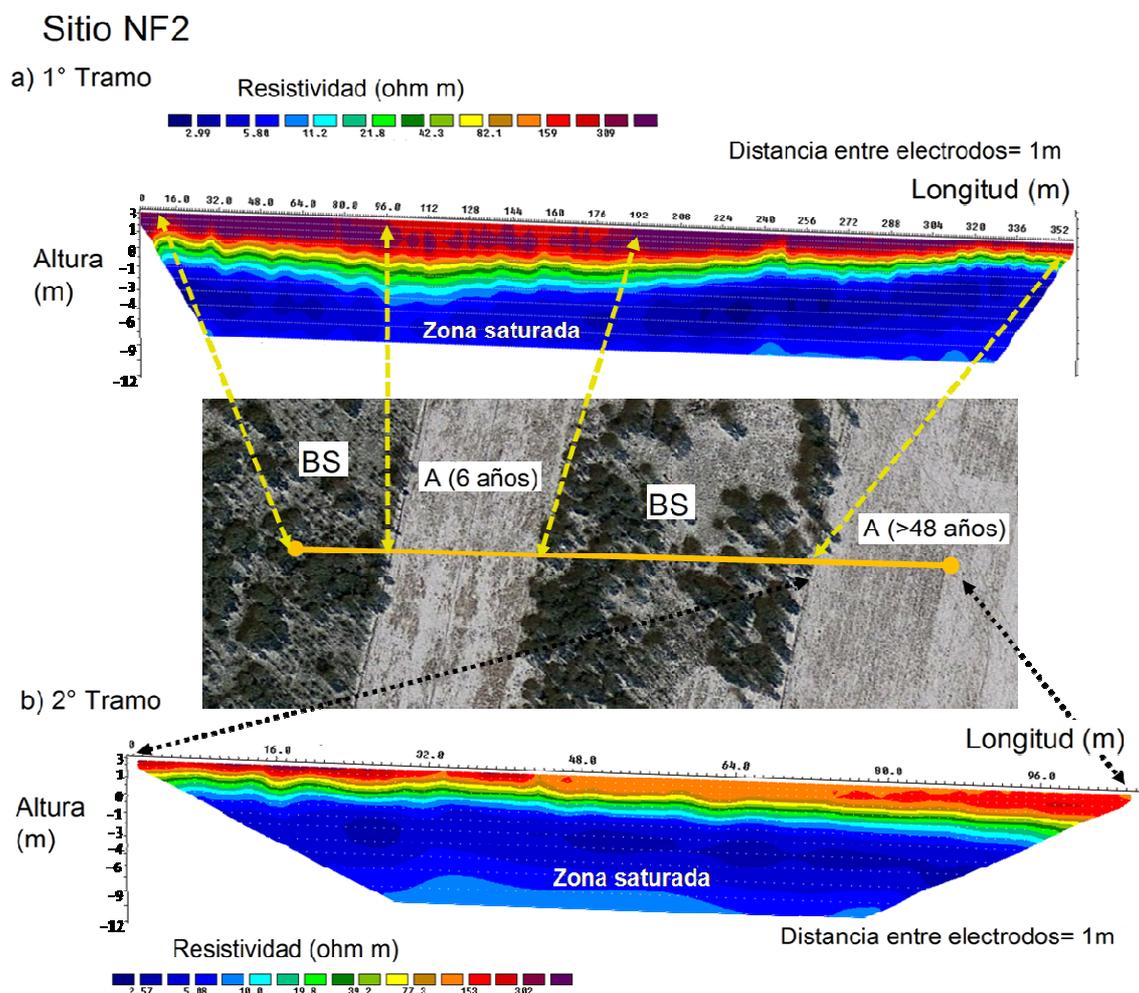


FIGURA 5 – TOMOGRAFÍA GEOELÉCTRICA DE RESISTIVIDAD 2D (OHM M) OBTENIDA EN UNA TRANSECTA REALIZADA EN EL SITIO NF2 DE LA CUENCA DE ESTUDIO. SE OBSERVAN CADA UNO DE LOS USOS DEL SUELO A LO LARGO DE LA TRANSECTA: BOSQUE SEMÁRIDO (BS), AGRICULTURA DE 6 AÑOS DE USO (A 6 AÑOS) Y AGRICULTURA DE MÁS DE 48 AÑOS (A \geq 48 AÑOS). A) EL PRIMER TRAMO DE LA TRANSECTA INCLUYE LA TRANSICIÓN BS-A (6 AÑOS)-BS, B) EL SEGUNDO TRAMO DE LA TRANSECTA CARACTERIZA UN PERFIL BAJO AGRICULTURA \geq 48 AÑOS DE USO. SE DETECTA UNA ZONA SATURADA ENTRE LOS ~3-7 M PROFUNDIDAD. OBSÉRVESE UNA LEVE PENDIENTE DE ~2% (EXTRAÍDO DE SANTONI ET AL., 2012).

El incremento en las precipitaciones y las características texturales del suelo seguramente han favorecido a que estos procesos se vean acelerados, con cambios drásticos del paisaje

en años, días o incluso horas. La mayor entrada de agua al sistema parece haber generado un importante cambio en la humedad de los suelos y por consiguiente en las sales de los perfiles bajo agricultura, pero no así bajo perfiles de bosque semiárido, que mantuvieron valores muy bajos de recarga. Estas observaciones reafirman la idea de que los suelos bajo agricultura son especialmente vulnerables frente a los incrementos de precipitación, especialmente en lo que se refiere a la generación de excesos hídricos en profundidad y las inestabilidades hidrogeomórfológicas que dichos excesos conllevan en sistemas de llanura escasamente drenados.

V INFORMACIÓN ADICIONAL

Este material resume gran parte de la información contenida en la tesis doctoral de C.S. Santoni titulada: “Circulación vertical del agua y su relación con la vegetación en zonas áridas y semiáridas” (2012, Área Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires), y en diferentes publicaciones científicas:

Contreras S., C.S. Santoni, E.G. Jobbágy. 2012. Abrupt watercourse formation in a semiarid sedimentary landscape of central Argentina: the roles of forest clearing, rainfall variability and seismic activity, *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.1302.

Jayawickreme, D.H., C.S. Santoni, J.H. Kim, E.G. Jobbágy, R.B. Jackson. 2011. Changes in hydrology and salinity accompanying a century of agricultural conversion in Argentina, *Ecological Applications*, 21 (7), 2367-2379.

Santoni, C.S., E.G. Jobbágy, S. Contreras. 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: role of land use, *Water Resour. Res.*, 46, W10541, doi:10.1029/2009WR008784.

Jobbágy, E.G., M.D. Nosetto, C.S. Santoni, G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura ChacoPampeana, *Ecol. Austral*, 18(3), 305–322.

VI CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbeito, O., Beltramone, C., Ambrosino, S., Contreras, P., Quintana Salvat, F., Moya, G. y Barrera, F. 2009. Informe de avance, Proyecto Estudio Geomorfológico De La Cuenca Del Morro, General Pedernera. San Luis. Instituto Nacional del Agua. 56pp.
- Clarke, C.J., George, R.J., Bell, R.W. y Hatton, T.J. 2002. Dryland salinity in southwestern Australia: its origins, remedies, and future research directions. *Australian Journal of Soil Research*, 40: 93-113.
- Kim, J.H y Jackson R.B. 2011. A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate and soils. *Vadose Zone Journal*, doi:10.2136/vzj2011.0021RA.
- Montgomery, D.R. y Manga, M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, 300: 2047-2049.
- NLWRA (National Land and Water Resources Audit). 2001. National Land and Water Resources Audit Australian dryland salinity assessment 2000: Extent, impacts, processes, monitoring and management options, 771 pp., Canberra.
- Pannel, D.J. y Ewing, M.A. 2006. Managing secondary dryland salinity: options and challenges. *Agricultural Water Management*, 80: 41-56.
- Phillips, F.M. 1994. Environmental tracers for water movement in desert soils of the American Southwest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:15-24.
- Proyecto de Recursos Hidrológicos Subterráneos de la Provincia de San Luis. 2002. Evaluación de las posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en la provincia de San Luis: Hidrología de la zona central. En Lunter, S. M. (ed.). Los Recursos Hidrológicos Subterráneos de la Provincia de San Luis. Un Proyecto de Cooperación Técnica Argentino-Australiano, Mapa 1. Bureau of Rural Science Agriculture, Fish and Forest in Australia, San Luis, Argentina.
- Santoni, C.S., Jobbágy, E.G. y Contreras, S. 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: role of land use. *Water Resour. Res.*, 46, W10541, doi:10.1029/2009WR008784.
- Santoni, C.S. 2012. Circulación vertical del agua y su relación con la vegetación en zonas áridas y semiáridas. Tesis Doctoral Área Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Argentina.

Tripaldi, A. y Forman, S.L. 2007. Geomorphology and chronology of Late Quaternary dune fields of western Argentina. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 251: 300–320, doi:10.1016/j.palaeo.2007.04.007.