



Balance hídrico de diferentes escenarios en la cuenca El Morro

Claudio Alejandro Saenz, Nicolas Rusoci y Juan Cruz Colazo



BALANCE HÍDRICO DE DIFERENTES ESCENARIOS EN LA CUENCA EL MORRO

Información Técnica 192. EEA San Luis. ISSN 0327-425X.

Diciembre de 2016.

Claudio Alejandro Saenz, Nicolas Rusoci & Juan Cruz Colazo

BALANCE HÍDRICO DE DIFERENTES ESCENARIOS EN LA CUENCA EL MORRO

Claudio Alejandro Saenz, Nicolás Rusoci & Juan Cruz Colazo

Introducción

En la provincia de San Luis, el clima es continental seco con inviernos fríos y veranos calurosos. Las precipitaciones son primavero-estivales con otoños e inviernos secos (Aguilera y otros, 2003).

La altitud de las sierras favorece las lluvias orográficas mientras sus fuertes pendientes favorecen el escurrimiento rápido de las lluvias y la recarga de las cuencas adyacentes. Estas cuencas están formadas por sedimentos Terciarios y Cuaternarios, en donde gran parte de la lluvia se infiltra y se almacena como agua subterránea (Ivkovic y otros, 2000).

La distribución de las precipitaciones en la Provincia sigue un régimen monzónico, la mayoría de las precipitaciones se producen durante el verano. Hay un marcado descenso de lluvias desde el este al oeste de la provincia, particularmente en el noroeste. Las zonas de mayor nivel de lluvia están asociadas con las Sierras de San Luis y Sierras de Comechingones (Ivkovic y otros, 2000).

El agua superficial cumple un importante rol en la recarga del sistema de aguas subterráneas de la provincia. Esto sucede porque la recarga difusa del agua de lluvia termina en sedimentos permeables en gran parte del sur de la provincia. También ocurre cuando la recarga concentrada a través de la filtración de sistemas fluviales como el río Quinto se disipa en los sedimentos cuaternarios altamente permeables (Ivkovic y otros, 2000).

La cuenca sur del cerro El Morro se ubica en el sector noreste del departamento Pederñera en la provincia de San Luis y constituye una subcuenca del sistema hidrológico del río Quinto. La superficie de la cuenca es de 220000 ha y se extiende desde La Sierra del Morro al Norte, la ruta provincial 1 al Este, la autopista 55 (ex 148) al Oeste y la ribera del río Quinto al Sur (Figura 1).

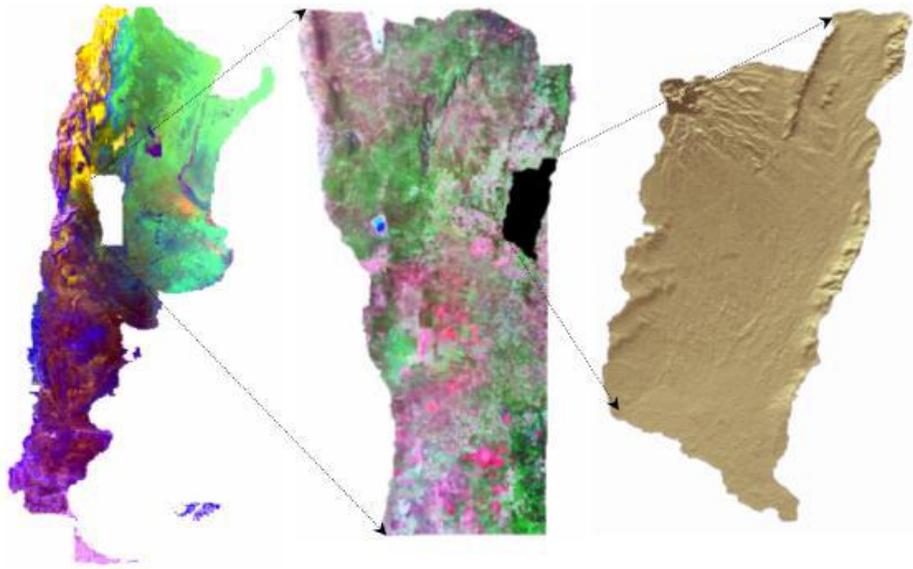


Figura 1: Localización de la cuenca El Morro (Galván y otros, 2010).

La cuenca puede ser dividida en cuatro subcuencas: Zanjón del Cerro Negro, La Guardia, Río Nuevo y El Quebrachal. En la Figura 2 se presenta la ubicación y superficie de cada una de ellas.

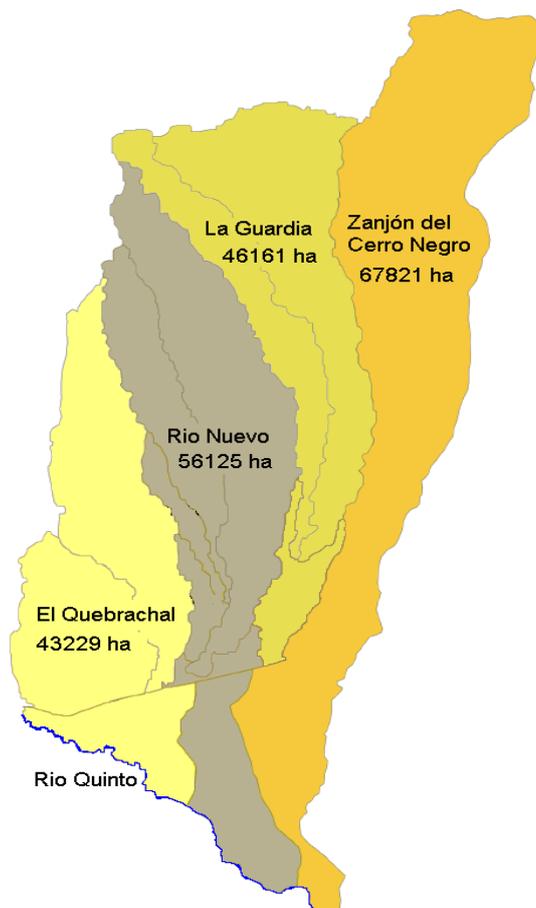


Figura 2: Ubicación y superficie de las subcuencas. Adaptado de Galván y otros (2010).

Los suelos de la cuenca corresponden a Haplustoles Énticos al Norte y Ustortentes - Ustipsamientos Típicos al Sur. Los mismos son aptos para ganadería con restricciones para su uso con fines agrícolas, debido a la susceptibilidad a procesos de erosión hídrica y eólica, por lo que requieren prácticas de manejo y conservación.

Estos suelos, constituidos por arenas de origen eólico son muy permeables, con una velocidad de infiltración básica de 79 mm h^{-1} , el tiempo para llegar a la infiltración básica es de 164 min, y la infiltración acumulada en este periodo es de 296 mm (Figura 3; Saenz, 2008). Por ende, la recarga de agua hacia napas subterráneas es rápida y preponderan los procesos relacionados al transporte de agua subterránea.

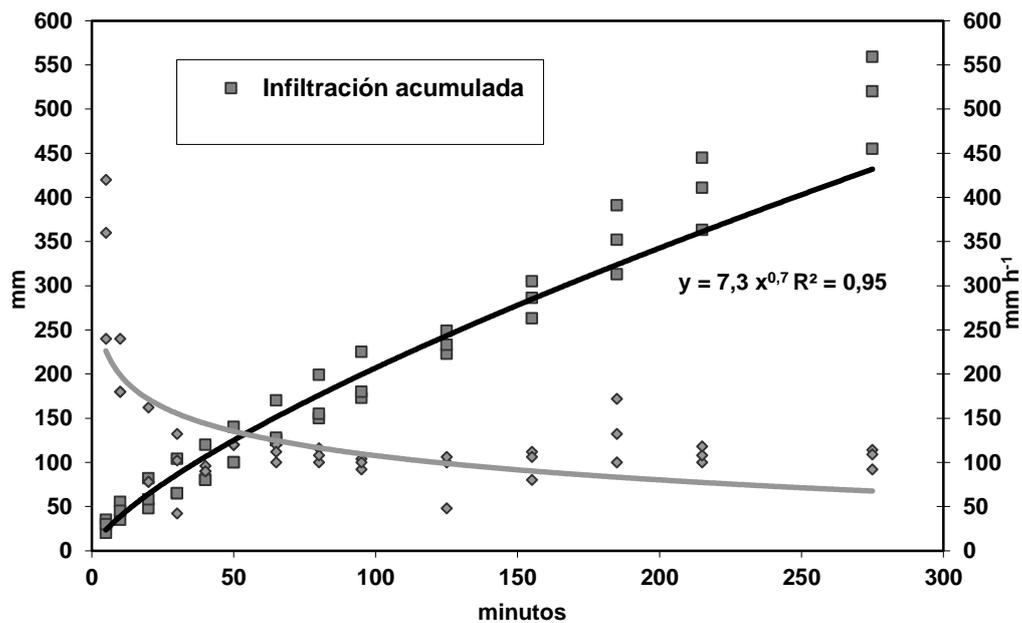


Figura 3: Curvas de infiltración del suelo en la cuenca baja.

En la parte baja de la cuenca el agua subterránea se encuentra a menos de 5 m de profundidad (Ivkovic y otros, 2000), si bien en esta zona la napa aporta agua a los cultivos la misma tiene una conductividad eléctrica de 4 dS m^{-1} por lo que su utilización es condicionada por la salinidad que presenta (Saenz, 2008).

En la Figura 4 se representa la cuenca con los principales procesos hidrológicos, la alta permeabilidad de los sedimentos que la conforman determina que el agua subterránea sea muy importante en el funcionamiento hídrico de la misma. Aproximadamente a 700 msnm, se produce el fenómeno de aparición de nuevos cursos de agua que involucran procesos de cambio en el transporte de agua, suelos, sedimentos y sales que tienen distintas velocidades de ocurrencia y que se vinculan entre sí (Consejo Federal de Ciencia, Técnica, Desarrollo e Innovación, 2015).

Estos cursos generan diversos daños sobre el sistema productivo e infraestructura presentes en la cuenca. Se producen impactos puntuales por erosión o sedimentación

producto del escurrimiento superficial. Pero la elevación del nivel freático genera daños difusos por anegamiento y salinización muy severos en una amplia superficie.

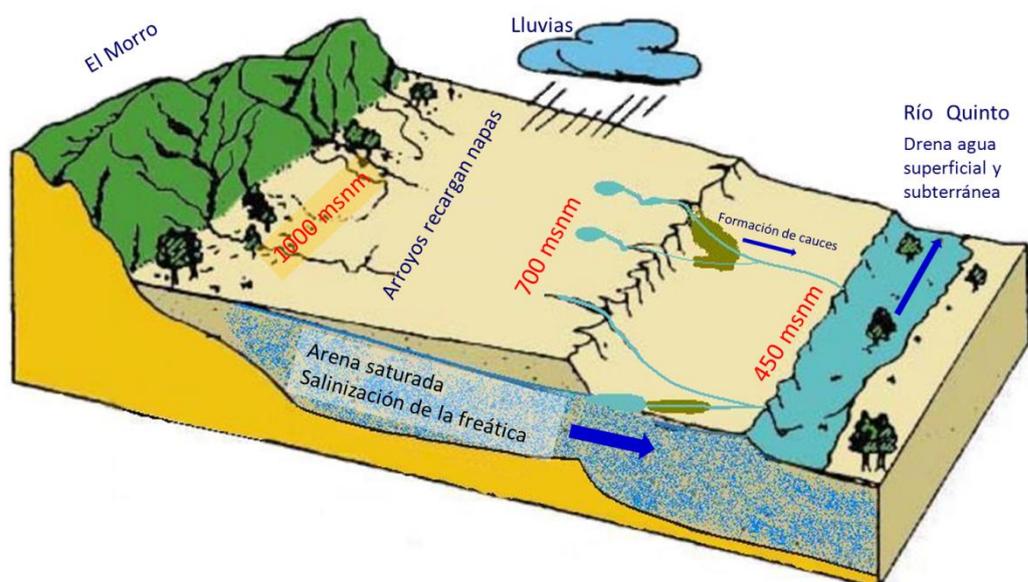


Figura 4: Representación de la Cuenca El Morro.

Entre las causas que generan este proceso podemos mencionar la acumulación de excedentes hídricos producto de un incremento en las precipitaciones, a razón de 2 mm año^{-1} durante el último siglo; una predisposición geológica y un cambio en el uso de la tierra (Consejo Federal de Ciencia, Técnica, Desarrollo e Innovación, 2015). Este cambio de uso de la tierra representó un avance de la frontera agrícola y el incremento de especies anuales en la rotación de cultivos, principalmente motivada por cambios tecnológicos ocurridos durante la década del 90 mediante la adopción del sistema de siembra directa en nuestra zona.

El análisis temporal (a partir de fotografías aéreas de 1962) muestra un progresivo reemplazo de la vegetación natural por cultivos implantados (Galván y otros, 2010). Actualmente en esta área el 77 % de la superficie es agrícola, el 21 % es no agrícola compuesto por zonas de bosque, salinizadas o afectadas por los cursos de agua y 2 % de pasturas en base a alfalfa que se encuentran principalmente en la parte baja de la cuenca.

Tanto las causas de la problemática de la cuenca como las medidas de mitigación son múltiples. Para atenuar los excesos hídricos, una de las principales herramientas que podemos utilizar es el bio-drenaje, es decir el aumento del consumo de agua por parte de la vegetación, en toda la cuenca y durante todo el año.

Esto implica la aplicación de coberturas verdes intercaladas entre los cultivos de verano, un incremento de la superficie destinada a praderas perennes, y la estabilización de los cursos de agua y las vaguadas mediante pasturas y forestación.

La incorporación de cultivos de cobertura (CC) invernal como alternativa a los barbechos largos de invierno es una herramienta de mejora al balance hídrico regional. En la región se pueden utilizar cereales de invierno, de ellos el centeno es el que mejor se adapta. Los cultivos de cobertura tienen múltiples beneficios. Consumen agua del perfil durante el invierno, permiten anclar los rastrojos de los cultivos de verano reduciendo los riesgos de erosión eólica, realizan un aporte importante de carbono al suelo, principalmente a través de sus raíces. En el caso de cebadilla criolla las raíces representan el 73 % de su biomasa total (Lucero Blangetti, 2012).

Se ha comprobado una influencia significativa de la inclusión de CC sobre la población de malezas, lo cual permitiría un menor uso de herbicidas (frecuencia de aplicaciones y/o dosis). La utilización de gramíneas como cultivo de cobertura resulta más eficiente en el control de malezas que la utilización de una leguminosa como vicia (Fernández y otros, 2007).

Las praderas de alfalfa puras o consociadas constituyen un recurso muy importante para consumir agua, ante la presencia de napa freática cercana a la profundidad de sus raíces, logran consumos de agua y rendimientos a niveles cercanos a condiciones sin restricciones hídricas (Salgado, 2011). La alfalfa puede consumir agua del perfil del suelo hasta una profundidad de 3,5 m (Amorena y Demin, 2010). Se ha determinado que en la pampa húmeda las pasturas perennes en base a alfalfa tienen un consumo de 1075 mm año⁻¹, mientras que el uso de agua por parte de los cultivos anuales es de 679 mm año⁻¹ (Nosetto y otros, 2016).

Modelizaciones realizadas sobre la cuenca indican que el drenaje profundo bajo pasturas de alfalfa tendría un comportamiento similar al de los bosques semiáridos, por lo que representan una alternativa de uso de la tierra en rotación con cultivos anuales que evitaría generar cambios drásticos en la recarga de la freática en el largo plazo (Santoni, 2012).

En la cuenca las pasturas de alfalfa se pueden consociar con agropiro o festuca lo que potenciaría el consumo de agua y por ende la producción de materia seca durante el invierno. En la cuenca media y alta la utilización de megatérmicas como pasto llorón o digitaria permitiría disminuir la erosión estabilizando las áreas cercanas a los cauces. El uso de tecnologías de fertilización sobre estas pasturas permite duplicar el rendimiento de materia seca, mejorando su palatabilidad y aporte de proteínas a la ganadería.

Otra alternativa para estabilizar la cuenca es la inclusión de especies forestales. Estas efectúan un importante uso de agua de lluvia y freática y un aporte a la estabilización del suelo. Si bien existe poca información de consumo de agua por árboles en nuestra región. En los pastizales del Río de la Plata se observó que el establecimiento de forestaciones de eucalipto aumenta las pérdidas evapotranspirativas entre 40 y 80%, en comparación con los pastizales (Nosetto y otros, 2005). Estas diferencias están

explicadas en gran medida por un consumo de agua freática que llega a suplementar las precipitaciones entre 25 y 50% (Engel y otros, 2005; Jobbágy y Jackson, 2007).

La incorporación de bosques implantados debe ser estudiada. En pastizales subhúmedos alteran la dinámica de las napas freáticas, debido al mayor consumo de agua de estas plantaciones, generando procesos de salinización de aguas y suelos. En un relieve plano, los cambios en el uso de la tierra afectarían en forma intensa y difícil de anticipar el transporte vertical y horizontal de agua subterránea y sales. Esta vulnerabilidad hidrológica exige comprender y manejar los ciclos del agua y las sales desde una perspectiva eco-hidrológica y plantea el desafío de desarrollar una agronomía del agua capaz de contribuir a la regulación de los niveles freáticos a través del manejo de los ecosistemas naturales y cultivados (Jobbágy y otros, 2008).

El consumo de agua por parte de los eucaliptos es importante, principalmente por tratarse de árboles de hojas perennes que consumen agua durante todo el año. La velocidad de crecimiento de sus raíces (*Eucalyptus camaldulensis*) es de 2,5 m por año (Calder y otros, 1997) y consumen 22 % más agua que los pinos (Myers y otros, 1995).

En el caso de especies nativas, las especies del género *Prosopis* desarrollan un sistema radical dimórfico con una raíz leñosa de trayecto vertical, de rápido crecimiento en relación al crecimiento aéreo (Dalmaso y otros, 1994; Roig, 1985), y una corona de raíces superficiales laterales (Guevara y otros, 2010). Este les permite absorber agua freática (localizada entre 7-13 m de profundidad) y agua de lluvia en distintas proporciones dependiendo de su disponibilidad (Jobbágy y otros, 2008).

En la Cordillera sur de Chile se estimó la evapotranspiración anual durante tres años en plantaciones jóvenes establecidas de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*. El consumo de agua representó el 32, 23 y 58 % en *E. globulus*, y 33, 21 y 58 % en *P. radiata* respecto de las precipitaciones registradas (Oyarzún y Huber, 1999). Por otro lado, Hall y otros (1998), utilizando métodos de flujo de savia en álamos encontró que la transpiración media ascendía a un máximo de 6 mm día⁻¹ en verano. En sistemas silvopastoriles se halló consumo de agua más allá de los 2 m de profundidad del suelo (Aragón y otros, 1990).

Balance hídrico de cultivos

Se realizó el balance hídrico por subcuenca utilizando como modelo de simulación la Planilla de Balance Hídrico para Riego desarrollada por INTA Manfredi (Martellotto y otros, 2004). Esta herramienta permite realizar un balance hídrico para cada cultivo considerado.

Con esta herramienta se utilizaron los datos meteorológicos históricos de INTA San Luis, con los que se calculó el año meteorológico típico (Domínguez y otros, 2015). Los datos usados para el balance se presentan en el anexo.

Para determinar el consumo de agua de cada cultivo en relación a la evapotranspiración potencial se utilizaron los valores de kc de cultivo propuestos por FAO 2002 (Tabla 1).

Tabla 1: Valores de Kc de cultivos en distintas etapas fenológicas (FAO, 2002).

Cultivo	Estados de desarrollo del cultivo (kc)				Kc medio
	Inicial	Estado vegetativo	Media estación	Etapas avanzadas	
Alfalfa	0,3-0,4				0,85-1,05
Maíz	0,3-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	0,8-0,95	0,75-0,9
Soja			1,15		0,5
Trigo	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,8-0,9

Se modelaron los balances hídricos para los dos cultivos agrícolas principales que se realizan en la cuenca, soja y maíz, para cuatro fechas de siembra posibles. Los resultados de estos balances se promediaron para cada cultivo.

En años promedio, al finalizar los cultivos de verano se generan excedentes hídricos durante el otoño que producen la recarga de las napas freáticas, por lo que se sugiere en la superficie destinada a agricultura, el uso de cultivos de cobertura invernal para utilizar estos excedentes. Para el cálculo de consumo de agua por los cultivos de cobertura invernal se utilizaron los valores para trigo, cotejándolos con datos de campo obtenidos localmente en ensayos de cultivos de cobertura.

Estos excedentes hídricos de otoño, sumados a las precipitaciones durante el invierno no alcanzan a cubrir la demanda potencial de los cultivos de cobertura por lo que sufren déficit hídrico y alcanzan un consumo medio de 133 mm, aunque su capacidad potencial de consumo es de 336 mm. Esta situación nos permitiría afrontar excesos hídricos en inviernos húmedos mejorando la cobertura, mejorando las condiciones de piso a cosecha y aportando carbono al suelo.

A los efectos de iniciar el balance, para los cultivos agrícolas se consideraron 80 mm de agua útil disponibles en el perfil al momento de la siembra y en el caso de cultivos de cobertura 16 mm.

Se modeló el balance hídrico en praderas en base a alfalfa y consideramos que el consumo de agua de una pradera es similar a la del monte nativo o forestación, con la salvedad que las especies forestales tienen la posibilidad de extraer agua de la napa desde una mayor profundidad. En el caso de praderas en base a alfalfa la limitante es la temperatura invernal debido a que la alfalfa consume agua durante todo el año, mientras que los bosques nativos son perennifolios y no consumen agua durante el invierno.

Las pasturas de alfalfa se pueden consociar con especies de invierno como agropiro, cebadilla o festuca de modo de incrementar su consumo de agua durante el invierno. En este caso no se tuvo en cuenta el agua útil presente en el perfil al momento de la

siembra por tratarse de una pastura perenne con una duración de 4 años. Se puede considerar que el balance corresponde al 2 año por lo que se estimó el consumo a partir de septiembre.

La alfalfa tiene un kc medio de 0,95 y sus raíces exploran el perfil hasta 3,5 m de profundidad. Dentro de la cuenca las zonas con la freática a menos de 5 m de profundidad contienen agua salina por lo que restringen la producción de forraje y el consumo de agua freática por parte de la pastura aproximadamente en un 50 %.

A los fines de realizar el balance hídrico de la pastura de alfalfa se considera que tiene potencial de evapotranspirar el total de la lluvia media anual de 804 mm. A este consumo de agua se le suma el uso de agua desde la napa, considerando que por ser salina representa 258 mm año⁻¹, es decir el 50 % de la diferencia entre la Eto anual y la precipitación media anual. Por lo antes dicho se considera que el consumo anual de un cultivo de alfalfa en la cuenca es de 1062 mm. Se sugiere la incorporación de alfalfa en sectores con napa cercana a la superficie.

En la Tabla 2 se presenta el resultado de los diferentes balances hídricos simulados. La evapotranspiración del cultivo (Etc), representa el consumo hídrico de cada cultivo.

Tabla 2. Balance hídrico para los principales cultivos de la cuenca. Agua útil a la siembra (AUs), evapotranspiración del cultivo (Etc), precipitaciones durante el ciclo (PPc), precipitaciones anuales (PPa) y Balance hídrico anual (BHa). Todos los datos están expresados en mm.

Cultivo	Fecha de siembra	AUs	Etc	PPc	PPa	BHa
Soja	15-Oct	80	644	564	804	160
	01-Nov	80	574	494	804	230
	15-Nov	80	527	447	804	277
	01-Dic	80	580	500	804	224
Maíz	15-Oct	80	522	442	804	282
	01-Nov	80	517	437	804	287
	15-Nov	80	527	447	804	277
	01-Dic	80	580	500	804	224
Alfalfa	01-Sep	0	1062	804	804	-258
Cultivo de cobertura	01-Abr	16	149	133	0	0

Balance hídrico de la cuenca

Para mitigar la problemática de la cuenca, se deben tener en cuenta las condiciones meteorológicas medias y tomar medidas que favorezcan el consumo regional de agua. El impacto de estas medidas se debe evaluar a escala de cuenca. Mientras que la sumatoria de las decisiones de manejo predial contribuirá al consumo total de agua.

A modo de realizar un balance general a nivel de cuenca. Se evaluaron diferentes combinaciones de uso de la tierra bajo distintos escenarios. Se convirtió el resultado del balance hídrico por cultivo, llevándolo de lámina anual (mm) a volumen de agua consumido por hectárea ($\text{hm}^3 \text{ ha}^{-1}$). En el caso de los cultivos de soja y maíz se promedió el balance hídrico de las diferentes fechas de siembra analizadas. En la Tabla 3 se presenta el consumo hídrico en $\text{hm}^3 \text{ ha}^{-1}$ para los diferentes tipos de cultivo.

Tabla 3. Consumo hídrico para los principales cultivos de la cuenca.

Cultivo	Consumo de agua ($\text{hm}^3 \text{ ha}^{-1}$)
Soja	0,00566
Maíz	0,00536
Alfalfa	0,01062
Cultivo de cobertura	0,00133

Situación actual de la cuenca

En la Tabla 4 se presenta la superficie total de cada subcuenca y la proporción y superficie no agrícola estimada de acuerdo a imágenes satelitales actuales de Google Earth y Landsat Viewer. Se entiende como superficie no agrícola el bosque natural, zona de bajos con vegetación natural y superficie de pasturas implantadas. La superficie con pastura en base a alfalfa se estimó por separado.

Tabla 4. Superficie total y no agrícola por subcuenca.

Subcuenca	Superficie (ha)	No agrícola (%)	No agrícola (ha)
Zanjón del Cerro Negro	67821	9,5	6104
La Guardia	46161	23,5	10155
Río Nuevo	56125	27,5	11225
El Quebrachal - Villa Mercedes	43229	37,5	15130
Total	213336	23,0	42614

Actualmente en la cuenca existe un 77 % de agricultura, los dos cultivos agrícolas principales, soja y maíz representan 60 % y 40 % respectivamente de la superficie agrícola. Del resto, 21 % es área no agrícola y completan la situación 2 % de pasturas en base a alfalfa que se encuentran principalmente en la parte baja de la cuenca.

En el Anexo 3 se presenta el balance hídrico general de la situación actual, así como la de dos escenarios de mejora que se proponen más adelante en este trabajo. El resultado del balance hídrico de la cuenca se expone como volumen medio de agua excedente, actualmente es de 284 hm³ lo que representa un caudal excedente de 9 m³ s⁻¹ que escurren hacia el río Quinto generando la problemática actual (Figura 5).

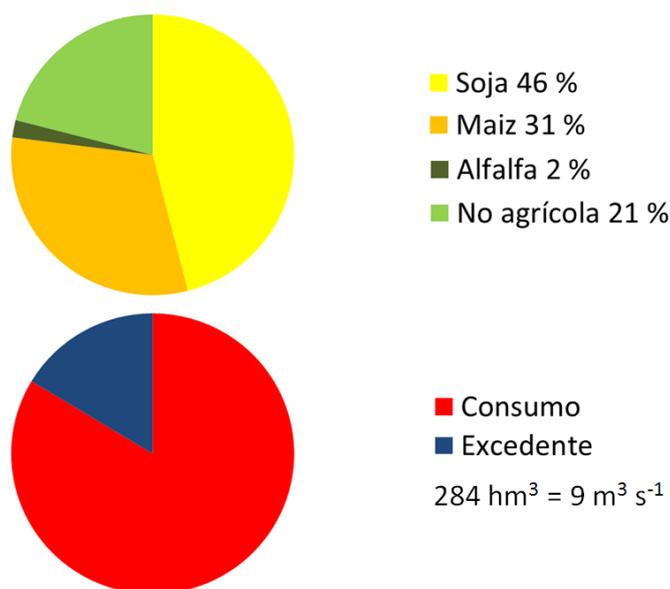


Figura 5: Porcentaje de uso del suelo en el gráfico superior y balance hídrico de la situación actual de la Cuenca El Morro en función del aporte de las precipitaciones medias.

Propuestas de mejora

Escenario 1: Esta propuesta considera modificaciones al uso actual del suelo, la incorporación de forestación en el 5 % de la superficie de la cuenca y la incorporación de cultivo de cobertura como sucesor de la totalidad del cultivo de soja que se realiza anualmente (Anexo 3).

A los efectos de generar el balance hídrico de la situación propuesta se considera que la forestación tiene un consumo de agua similar a una pastura de alfalfa, en el caso de especies perennifolias como por ejemplo el género Eucaliptus, pero esto variará en función de la especie forestal. Se considera que la superficie forestal se implantará 3 % sobre superficie no agrícola y 2 % sobre superficie agrícola, por ende la superficie no agrícola se incrementara 2%. Esta propuesta permitiría reducir 52 % los excedentes hídricos de la cuenca, como se muestra en Figura 6, donde el caudal excedente será de $4,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Esto demuestra que la inclusión de cultivos de cobertura en una superficie importante de la cuenca regula los excedentes hídricos ya que evitan que entre 100 y 200 mm año^{-1} recarguen las napas (Quiroga, 2016). Si bien esto concuerda con los trabajos que afirman que utilizando cultivos anuales no es suficiente para revertir completamente los excesos hídricos (Bertram y Chiachera, 2016), la utilización de los mismos tiene la ventaja de producir efectos en el corto plazo.

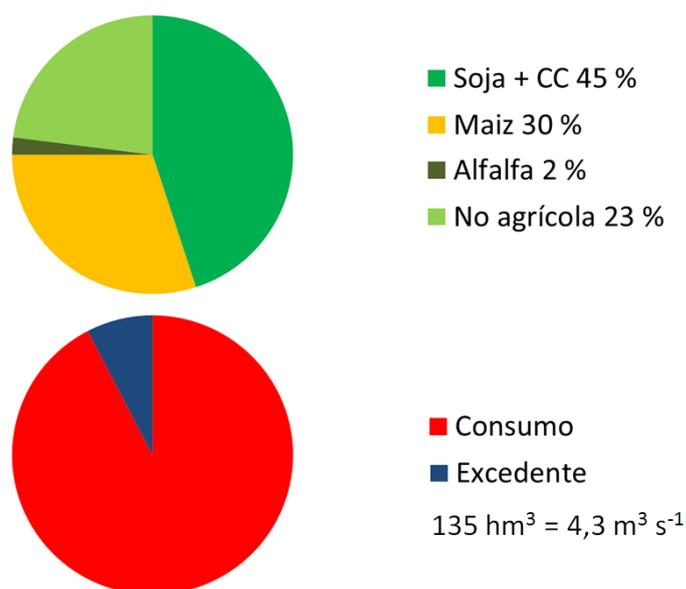


Figura 6: Porcentaje de uso del suelo en el gráfico superior y balance hídrico del Escenario 1 en función del aporte de las precipitaciones medias.

Escenario 2: La segunda alternativa de mejora evaluada, se presenta en el Anexo 3, es utilizar cultivos de cobertura como cultivo sucesor en el 70 % de la superficie sembrada con soja. Mantener el 5 % de la superficie forestada, principalmente con el objetivo de estabilizar los sedimentos dentro de los cauces, e incrementar la superficie destinada a pasturas perennes en base a alfalfa hasta un 20 % de la superficie de la cuenca. En

zonas con la freática a 1,5 - 3 m de profundidad puede utilizarse alfalfa pura, donde la freática este a menor profundidad se puede consociar alfalfa con agropiro o festuca para incrementar el consumo de agua y favorecer el balance salino en la superficie del suelo.

El balance hídrico de la combinación planteada para este escenario permite eliminar los excedentes hídricos, logrando un balance hídrico neutro (Figura 7). La comparación de sitios bajo pasturas perennes con sistemas basados en cultivos anuales de grano en regiones sub-húmedas muestra que los primeros poseen una mayor evapotranspiración, una mayor profundidad del nivel freático y menor riesgo a inundaciones (Nosetto y otros, 2015). Este tipo de pasturas en base a alfalfa permitirían incrementar en poco tiempo la evapotranspiración desde la cuenca mitigando la problemática actual, alcanzando dentro del año su potencial de consumo de agua. Son utilizadas actualmente en los sistemas productivos de la región, principalmente destinadas a ganadería. Para llevar a la práctica un incremento en la superficie de pasturas es necesario contar con políticas públicas que favorezcan la actividad ganadera. O en su defecto la incorporación de agroindustria local que utilice alfalfa como insumo, esto generaría una mayor demanda local que sería favorable para incrementar su uso.

En las pasturas de alfalfa se debe tener en cuenta el consumo de nutrientes desde el perfil del suelo, especialmente fósforo (P), la alfalfa es muy demandante de este nutriente y es necesario reponerlo para mantener la capacidad productiva del suelo. Se han obtenido buenas respuestas a la fertilización cuando se aplica a la siembra todo el fosforo que requerirá el cultivo en su vida útil (4 años).

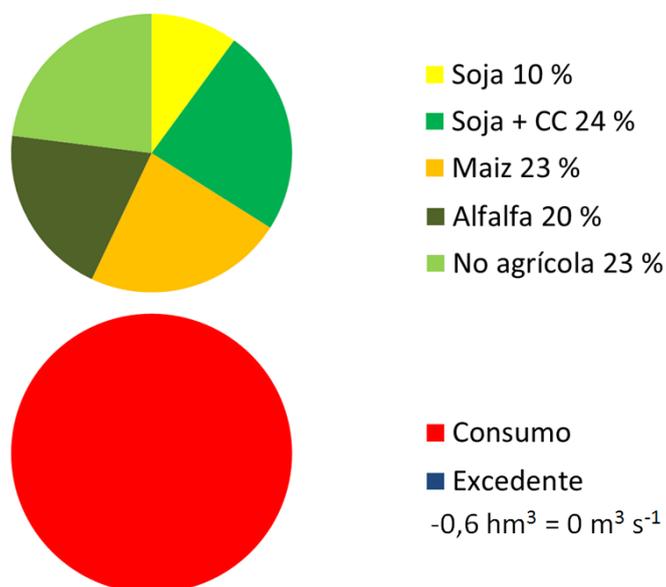


Figura 7: Porcentaje de uso del suelo en el gráfico superior y balance hídrico del Escenario 2 en función del aporte de las precipitaciones medias.

Consideraciones finales

El siguiente trabajo muestra una aproximación teórica al balance hídrico de la cuenca El Morro y simula el efecto de la incorporación de cultivos de cobertura y pasturas. Mediante diferentes combinaciones se reduciría el excedente hídrico en el corto y mediano plazo, proponiendo algunas alternativas para incentivar la adopción de estas tecnologías.

La orientación de los sistemas productivos de la cuenca hacia alguna de las propuestas planteadas deberá ir regulándose en función del monitoreo de los niveles freáticos, de modo de ir regulando en el tiempo el consumo de agua subterránea y el uso productivo de los excedentes hídricos.

Agradecimientos

A Nicolás Bertram por las sugerencias realizadas al manuscrito.

Bibliografía

- Aguilera, M.O. y Panigatti, J.L. 2003. Con las metas claras. La estación Experimental Agropecuaria San Luis 40 años en favor del desarrollo sustentable, capítulo 1, pp. 15.
- Amorena, J. y Demín, P. 2010. Producción de Alfalfa con Recursos Hídricos Eventuales en la Provincia de Catamarca, Argentina. V Jornadas de Riego y Fertirriego. Mendoza. Agosto 2010.
- Aragón, A.; Mac Donagh, P.M. y Marlats, R.M. 1990. Dinámica comparada del agua edáfica bajo bosque y pradera. Análisis de un caso y sus connotaciones regionales. Actas del I Congreso Latinoamericano Internacional de Manejo y Ordenación de Cuencas Hidrográficas. Santiago de Chile. Chile: 290-299.
- Bertram, N. y Chiacchiera, S. 2016. Ascenso de napas en la Región Pampeana: ¿Consecuencia de los cambios en el uso de la tierra? Informe técnico. Disponible en: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_napas_mjz_13.pdf.
- Calder, I.R.; Rosier, P.T.W.; Prasanna, K.T. y Parameswarappa, S. 1997. Eucalyptus water use greater than rainfall input - possible explanation from southern India. Hydrol. Earth Syst. Sci. 1:249-256.
- Consejo Federal de Ciencia, Técnica, Desarrollo e Innovación. 2015. Nuevos Cursos de agua en la cuenca de El Morro. Descripción del fenómeno y pautas para su gestión. Gobierno de la Provincia de San Luis, Conicet, Universidad Nacional de San Luis, INTA y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Dalmaso, A.; Masuelli, R. y Salgado, O. 1994. Relación vástago-raíz durante el crecimiento en vivero de tres especies nativas del Monte, *Prosopis chilensis*, *P. flexuosa* y *Bulnesia retama*. Multequina, 3: 35-43.
- Domínguez, A.; Martínez-Romero, A.; Garbero, M. y Saenz, C. 2015. El Riego Deficitario Controlado como una Estrategia para Incrementar la Eficiencia en el Uso del Agua y la Rentabilidad de los Cultivos Extensivos. En: Gestión del suelo

y el agua en sistemas productivos de la provincia de San Luis. Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-625-9.

- Engel, V.; Jobbágy, E. G.; Stieglitz, M.; Williams, M. y Jackson, R. B. 2005. The hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. *Wat. Resour. Res.* 41:104-109.
- FAO. 2002. Yield response to water. Part A of Irrigation and drainage paper N° 33. Disponible en: <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/parta.stm>
- Fernández, R.; Frasier, I. y Quiroga, A. 2007. Cultivos de cobertura. Efectos sobre la población de malezas. Capítulo V del Manual de Fertilidad y Evaluación de Suelos. Publicación Técnica N° 71. EEA Anguil.
- Galván, M.J. y Collado, D.A. 2010. Esgurrimientos Hídricos Superficiales en la Cuenca Hidrográfica de El Morro, Provincia de San Luis. Información Técnica N° 175. ISSN 0327-425X. INTA EEA San Luis.
- Guevara, A.; Giordano, C.V.; Aranibar, J.; Quiroga, M. y Villagra, P.E. 2010. Phenotypic plasticity of the coarse root system of *Prosopis flexuosa*, a phreatophyte tree, in the Monte Desert (Argentina). *Plant Soil* 330:447-464.
- Hall, R.; Allen, S.; Rosier, P. y Hopkins, R. 1998. Transpiration for coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 275-290.
- Ivkovic, K.I.; Kingham, R.; Lawrence, C.; Chartres, C. J.; Mullen, I.; Johnston, R.; Please, P. y Pestov, I. 2000. Los Recursos Hidrológicos Subterráneos de la Provincia de San Luis, capítulo II, pp.17.
- Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B. 2007. Groundwater and soil chemical changes under phreatophytic tree plantations. *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences* 112:G02013.
- Jobbágy, E.G.; Noretto, M.D.; Villagra, P.E. y Jackson, R.B. 2008. Water subsidies from mountains to deserts: Their role sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape. *Ecol. Appl.* 21(3):678-694.
- Jobbágy, E.G.; Noretto, M.D.; Santoni, C.S. y Baldi, G. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18(3):305-322.
- Lucero Blangetti, M.F. 2012. Caracterización del crecimiento y producción de biomasa de Cebadilla criolla (*Bromus catharticus* (Vahl)) en la región de Río Cuarto. Tesis de Grado. UNRC.
- Martellotto, E.; Salas, P.; Salinas, A.; Giubergia, J.P.; Ligua, S. y Lobera, E. 2004. Planilla de Balance Hídrico para Riego. INTA Estación Experimental Manfredi.
- Myers, B.J.; Theiveyanathan, S.; O'Brien, N.D. y Bond, W. J. 1995. Growth and water use of *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations irrigated with effluent. *Oxford Journals Science & Mathematics Tree Physiology* 16(1-2): 211-219.
- Noretto, M.D.; Jobbágy, E.G. y Paruelo, J.M. 2005. Land use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina. *Global Change Biology* 11:1101-1117.
- Noretto, M.D.; Paez, R.A.; Ballesteros, S.I. y Jobbágy, E.G. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agric. Eco. & Environ.* 206:60-70.
- Oyarzún, C. y Huber, A. 1999. Water Balance in Young Plantations of *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata* in Southern Chile. *Terra* 17(1):35-44.

- Quiroga, A. 2016. Utilización de cultivos invernales para mitigar excedentes hídricos. Resúmenes del VIII Congreso Nacional de Trigo. Pergamino.
- Roig, F.A. 1985. Árboles y bosques de la región árida centro oeste de la Argentina (Provincias de Mendoza y San Juan) y sus posibilidades silvícolas. Forestación en zonas áridas y semiáridas. Segundo encuentro regional CIID. América Latina y el Caribe. Santiago - Chile. CIID. 145-188.
- Saenz, C. 2008. Respuesta del cultivo de maíz y las características físico químicas del suelo al riego complementario con agua subterránea salina en la región semiárida pampeana. Tesis de posgrado de riego y drenaje presentada en la FCA. Universidad Nacional de Cuyo.
- Salgado, R. 2011. Respuesta del cultivo de alfalfa a diferentes estados hídricos del suelo. Tesis de Maestría de Riego y Drenaje. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.
- Santoni, C.S. 2012. Circulación vertical del agua y su relación con la vegetación en zonas áridas y semiáridas. Tesis para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires. Área Ciencias Agropecuarias.

Anexos

Anexo 1. Evapotranspiración de referencia diaria del año meteorológico típico (Domínguez y otros, 2015).

	<i>Ene</i> <i>1986</i>	<i>Feb</i> <i>1991</i>	<i>Mar</i> <i>2005</i>	<i>Abril</i> <i>2006</i>	<i>May</i> <i>1986</i>	<i>Jun</i> <i>2000</i>	<i>Jul</i> <i>1972</i>	<i>Agos</i> <i>1994</i>	<i>Sep</i> <i>1974</i>	<i>Oct</i> <i>1980</i>	<i>Nov</i> <i>1983</i>	<i>Dic</i> <i>1980</i>
1	5,78	6,64	4,18	3,49	2,95	1,54	0,67	2,29	2,53	3,30	4,97	6,64
2	6,69	5,29	4,76	2,89	2,70	1,82	0,83	1,73	2,96	4,00	4,97	6,61
3	5,75	7,07	5,20	3,24	2,37	2,02	1,57	2,54	3,31	4,40	6,26	7,25
4	6,93	4,47	5,70	3,04	2,84	2,05	1,76	2,87	1,59	4,90	6,93	5,54
5	6,67	5,05	3,56	1,67	1,90	1,20	1,53	2,99	0,80	5,25	6,73	7,01
6	7,06	6,03	5,86	2,61	1,68	1,15	1,23	3,16	1,58	4,60	1,56	5,41
7	6,01	5,84	2,61	3,40	2,42	1,81	1,15	0,98	1,54	3,28	5,94	7,43
8	6,57	4,28	3,32	2,55	2,67	2,02	1,56	1,35	2,22	4,74	6,49	7,52
9	7,59	6,30	4,96	3,25	1,80	1,72	1,76	1,97	2,66	5,35	3,23	5,86
10	7,23	3,99	5,08	3,49	2,36	1,56	2,24	2,79	3,22	4,05	5,48	8,43
11	7,52	5,25	4,78	3,55	1,72	1,95	2,24	3,17	3,39	4,73	2,30	6,02
12	4,53	5,93	2,65	3,52	1,78	1,69	1,22	2,17	2,73	5,51	4,34	6,97
13	6,08	2,04	4,40	1,78	1,53	2,28	1,64	1,97	3,30	5,87	4,19	5,43
14	6,50	4,97	5,23	2,10	1,96	1,54	1,47	1,58	3,80	5,91	5,28	6,26
15	6,54	5,94	5,17	2,53	2,03	0,81	1,62	2,07	4,23	6,31	6,33	6,34
16	3,23	5,52	5,07	2,86	1,38	0,82	1,84	2,46	4,50	5,01	5,88	8,11
17	3,39	4,59	3,71	3,02	1,31	0,75	1,65	2,51	3,67	3,63	4,71	6,11
18	5,66	6,11	4,06	2,75	2,14	0,72	1,85	2,45	3,86	3,99	5,67	4,33
19	5,51	5,16	4,56	3,44	1,85	1,20	1,08	1,84	4,24	4,19	6,54	4,34
20	5,94	4,80	4,63	2,57	2,44	1,42	0,79	2,58	4,62	3,27	3,53	5,58
21	7,23	5,89	3,35	2,84	2,49	1,60	1,42	2,54	4,71	3,19	3,90	6,59
22	7,67	5,70	4,01	3,58	2,40	1,75	2,16	1,92	4,69	2,84	6,60	6,98
23	7,68	5,93	4,83	3,88	2,19	1,47	1,90	2,74	4,01	3,03	7,11	7,56
24	5,34	6,66	5,07	3,73	1,60	1,62	2,04	3,03	3,93	3,87	4,80	7,65
25	7,95	6,36	4,82	2,80	2,21	1,64	2,04	2,03	3,35	4,92	6,60	6,00
26	5,60	6,76	4,84	3,95	2,63	1,94	2,55	2,90	4,13	5,36	6,01	6,99
27	2,67	2,87	1,70	3,83	2,37	1,84	2,02	3,22	4,01	5,04	7,22	4,98
28	4,99	4,22	3,55	3,39	1,66	1,62	1,92	3,34	2,95	5,96	6,89	7,22
29	6,08	-	3,39	2,71	1,59	1,54	2,13	1,09	2,99	3,41	7,32	5,50
30	6,15	-	2,62	2,60	2,05	2,25	2,44	1,26	3,45	4,43	5,09	5,89
31	3,80	-	2,99	-	2,40	-	2,12	0,46	-	5,33	-	3,86

Anexo 2. Precipitación diaria del año meteorológico típico (Domínguez y otros, 2015).

	Ene 1986	Feb 1991	Mar 2005	Abril 2006	May 1986	Jun 2000	Jul 1972	Agos 1994	Sep 1974	Oct 1980	Nov 1983	Dic 1980
1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	11,8	0	0	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	17,4	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0,4
5	0	0	0	0,2	0	0	0	0	11	0	0	0
6	0	0	0,2	32,5	0	0	0	0	12,2	0	14	13
7	0	0	34,6	0	0	0	0	0,3	0	0	7,6	0
8	0	1	0	30	0	0	0	21,5	0	0	0	0
9	0	0	0	0	3,4	0	0	0	0	0	0	1,3
10	0	5,6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0,5	9	0
12	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	12	0
13	0	5,3	3,4	2,2	0	0	0	0	0	0	0	16,5
14	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	1,1	0	0	0	0	0	0
16	65	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
17	7,1	0,6	3,8	0	0	0	0	0	0	38,6	16,6	0,7
18	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	2,2	0	0
19	0	17,6	0	0	0	0	0	0	0	2,8	0	0,4
20	0	0	0	0	0	0	13	0	0	19,5	0	0,2
21	0	0	1,8	0	0	0	0	0	0	4,4	6,8	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0
24	0	0	0	0	6,8	0	0	0	15	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,8
26	6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	3,7	38,3	3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,1
28	29	3,5	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	5,3
29	0,6	-	0	0	0	0	0	0	0	14,7	0	12,8
30	0	-	5,8	0	0	0	0	0	0	0	3,3	0
31	0	-	0,2	-	0	-	0	7,2	-	0	-	36,3

Anexo 3. Balance hídrico para la cuenca sur de El Morro, situación actual.

Área (ha)	PP (hm ³)	Soja (hm ³)	Soja + CC (hm ³)	Maíz (hm ³)	Maíz + CC (hm ³)	Alfalfa (hm ³)	Monte (hm ³)	Consumo (hm ³)	Balance (hm ³)	Caudal (m ³ s ⁻¹)
Situación actual		46 %	0 %	31 %	0 %	2 %	21 %			
213336	1715	555	0	354	0	45	475	1430	284	9,0
Escenario 1		0 %	45 %	30 %	0 %	2 %	23 %			
213336	1715	0	671	343	0	45	521	1580	135	4,3
Escenario 2		10 %	24 %	23 %	0 %	20 %	23 %			
213336	1715	121	356	263	0	453	521	1716	-0,6	0

La aparición de nuevos cursos de agua en la cuenca de El Morro (San Luis) está generando una serie de impactos negativos en el territorio y presenta serias amenazas a los productores de la cuenca, la ciudad de Villa Mercedes y las principales obras viales que atraviesan esta cuenca, entre la que se destaca las RN 7 y 8, principales corredores viales E-O del país. La causa principal de este proceso es un cambio en el balance hídrico, en el cual los nuevos excesos hídricos serían producto de un aumento en las precipitaciones y una disminución de las pérdidas evapotranspirativas, a causa de cambios de cobertura vegetal en la cuenca. En este marco, el gobierno de San Luis ha dictado una ley de emergencia ambiental basada en la aplicación de planes de manejo de suelos y forestación. Dentro de estos se destaca la aplicación de prácticas de manejo tendientes a incrementar el consumo de agua, como la inclusión de cultivos de cobertura invernales luego del cultivo de soja y la forestación del 5% de la superficie de los establecimientos, además de la aplicación de pasturas perennes. Si bien existe información del efecto de estas prácticas en el consumo de agua a nivel de punto o parcela, a nivel de cuenca el impacto es más incierto. Es por ello que el objetivo del siguiente trabajo fue modelizar el efecto de la aplicación de una práctica de manejo tendiente al ordenamiento hidrológico de la cuenca de "El Morro".



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación