

## 2. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario

J. Dardanelli, I. Severina y J. Andriani

**Julio Dardanelli:** Estación Experimental INTA Manfredi. (Córdoba, Argentina). Contacto: [juliodardanelli@yahoo.com](mailto:juliodardanelli@yahoo.com)

**Ignacio Severina:** Estación Experimental INTA Manfredi. (Córdoba, Argentina). Contacto: [ignacio\\_severina@hotmail.com](mailto:ignacio_severina@hotmail.com)

**José Andriani:** Experimental INTA. Oliveros. (Santa Fe, Argentina). Contacto: [jandriani@arnet.com.ar](mailto:jandriani@arnet.com.ar)

### 2.1. Introducción

El área sembrada bajo riego suplementario de cultivos que tradicionalmente no se riegan (trigo, maíz, soja, girasol, alfalfa, etc.) se ha incrementado sustancialmente en los últimos años en Argentina. Así, la provincia de Buenos Aires en 2008 tenía bajo riego 48.000 ha (Pecorari, com. pers.). Santa Fe posee actualmente unas 12.000 ha (Andriani, com. pers.); La Pampa 5.000 ha (Quiroga, com. pers.) y San Luis 33.000 ha (Saenz, com. pers.). Información más detallada se presenta para la provincia de Córdoba, cuya superficie bajo riego evolucionó desde 37.000 ha en el año 2000 y 64.000 ha en 2004 (Martelotto et al. 2005), hasta 130.000 ha en 2010 (Martelotto, com. pers.), aunque se podrían regar alrededor de 1,2 millones de ha (Martelotto et al. 2005). Además, la calidad del agua en esta provincia se presenta bajo riesgo de salinidad, con más de un 80% de aguas con conductividad eléctrica menor a 1,5 dS m<sup>-1</sup> y 95% con menos de 2,5 dS m<sup>-1</sup> (Martelotto et al. 2010).

Hay dos factores positivos a tener en cuenta:

- i) La presencia de reservorios subterráneos de agua dulce que permitirían ampliar el área bajo riego.
- ii) El rendimiento potencial con riego de los productos cosechables de cultivos extensivos de secano que se ha incrementado con los avances genéticos. Por ejemplo, en maíz se pueden obtener, en promedio para la región pampeana núcleo sin estrés abióticos, 15 t ha<sup>-1</sup> bajo riego

(Cirilo, com pers) y 9 t ha<sup>-1</sup> en secano (Andrade, com. pers.), con valores extremos en parcelas de ensayo bajo riego de 18 t ha<sup>-1</sup> en siembra del 20 de octubre en Anguil, La Pampa (Funaro, com. pers.). En soja, los rendimientos estimados son, respectivamente, de 5,5 y 3,5 t ha<sup>-1</sup> (Andriani, com. pers.), en tanto que en alfalfa para corte bajo riego se reportan 28,5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (López et al. 1997), y 12 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Racca et al. 2001), respectivamente. En girasol los rendimientos potenciales bajo condiciones de secano con escaso a nulo estrés hídrico y secano se informan 4,88 t ha<sup>-1</sup> como valores máximos para una amplia región productora de Argentina, con un rendimiento promedio de varios híbridos de 3,82±0,27 t ha<sup>-1</sup> para el primer decil, con un coeficiente de variación de 7,2%. El rendimiento promedio que se puede alcanzar en secano es de 2,74±0,30 t ha<sup>-1</sup> (coeficiente de variación = 11,1%). Estos valores son indicadores de que el riego puede no solo incrementar los rendimientos sino además disminuir el riesgo (menor coeficiente de variación). Los valores máximos de girasol en parcelas de ensayo bajo riego fueron de 5,5 t ha<sup>-1</sup> para cultivos sembrados el 10 de noviembre (Funaro, com. pers.). Por otra parte, la variabilidad de las lluvias en la región pampeana oscila entre 18 y 28%, superando un valor de 15% que se considera un umbral de un patrón de lluvias estables, siendo además de elevada intensidad, (Hall et al. 1992). En Uruguay en tanto, la superficie potencial de riego es de 1.760.000 ha, aplicándose efectivamente al regadío 210.000 ha, o sea que solo se utilizaba hace diez años una novena parte del potencial (Aquistat-FAO, 2000).

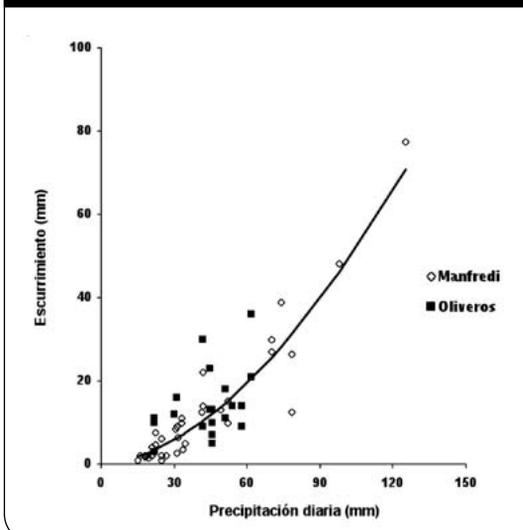
A partir del riego suplementario disminuyen los riesgos de la agricultura en secano y se generan otros escenarios de manejo: i) rango de fechas de siembra independientes del período de lluvias dentro de la ventana propicia en condiciones fototermiales, ii) ubicación del periodo crítico en época de mayor probabilidad y de mayor oferta de recursos como la radiación solar con menos énfasis en la época de mayor déficit hídrico, iii) disminución del riesgo del sistema productivo, circunscripto a variaciones de radiación y temperatura (variables mucho más conservativas que el régimen de lluvias) Aún así, bajo condiciones de riego suplementario sigue siendo importante la fuente de suministro de agua de los sistemas de secano, es decir, una combinación de un recurso presente (agua útil en el perfil), y la capacidad de la planta para extraerlo (profundidad y funcionalidad de raíces). El riego suplementario engloba estos conceptos; siempre el riego suplementará la oferta del ambiente en términos de precipitación efectiva, y aportes de la napa freática, si hubiera. Por lo tanto, este trabajo pondrá énfasis en la funcionalidad de raíces, es decir la capacidad de ellas de aprovechar la oferta del agua del subsuelo como insumo que permita optimizar el aporte del riego suplementario, para el incremento y estabilización de los rendimientos de cultivos de grano, oleaginosos y pasturas perennes.

## 2.2. Resultados

Antes de entrar de lleno en el tema del agua del subsuelo, hay que destacar que el agua, insumo para la transpiración, proviene tanto del riego como de la lluvia y de la napa freática, si la hay. Las pérdidas en términos de agua no transpirada por el cultivo, están constituidas por i) el escurrimiento superficial, ii) la evaporación desde el suelo y iii) el drenaje como flujo saturado o insaturado. La Figura 1 ilustra la importancia que tienen en gran parte de la zona núcleo de producción de cereales y oleaginosos de Argentina las pérdidas por escurrimiento superficial.

Esta Figura sintetiza los datos obtenidos con sucesivas mediciones con sonda de neutrones antes y después de cada evento de lluvia, en suelos bajo siembra directa en cultivos invernales y estivales, barbechos y pasturas, en Manfredi, Córdoba, sobre Haplustoles típicos (Dardanelli et al. 1992), y en Oliveros, Santa Fe, sobre

**Figura 1:** Relación entre el escurrimiento superficial y la precipitación diaria en dos localidades de la región pampeana.



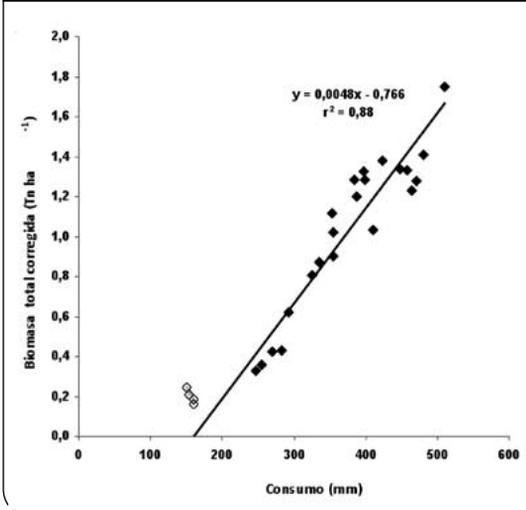
Argiudoles típicos y vérticos. En gran parte de las zonas productoras de cultivos extensivos de las provincias de Santa Fe, Buenos Aires y Córdoba los suelos tienen un horizonte superficial con alrededor del 70% de limo propenso al encostramiento, y aún con prácticas de siembra directa, el escurrimiento es un componente sustantivo de las pérdidas de agua del sistema. Así, de una lluvia de 30 mm se escurrirán en promedio 6 mm y de una de 60 mm, se escurrirán 20 mm.

La evaporación desde el suelo también constituye una pérdida de importancia hasta la completa cobertura de un cultivo bajo riego (Figura 2), de la cual surge que aproximadamente el 30% del agua consumida se perdió por evaporación en etapas tempranas del cultivo.

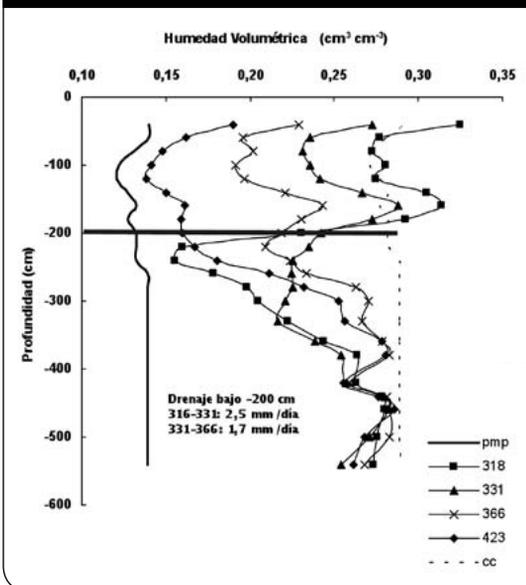
Finalmente, el drenaje por debajo de la zona radical de un cultivo puede ser relevante. La Figura 3 muestra que el flujo de drenaje insaturado entre los días 318 y 366 después de la siembra en un Haplustol típico por debajo de los 2 m de profundidad alcanzó un total de 99 mm, es decir un 30% de los 327 mm de agua útil presentes en ese estrato luego de regado.

La lámina de agua que puede almacenar el suelo es similar en horizontes de diferentes texturas (133 mm m<sup>-1</sup>, Ratcliff et al. 1983), excepto en textura arenosa, donde la capacidad de almacenamiento es menor. En la región pampeana la lámina de agua útil determinada en el rango

**Figura 2:** Relación entre la biomasa corregida por costo energético de un cultivo de maní y el consumo de agua en un Haplustol típico. La intersección entre la línea de ajuste y la ordenada indica la evaporación desde el suelo estimada. Adaptado de Haro et al., (2010).



**Figura 3:** Drenaje por debajo de la profundidad de suelo de 200 cm en un cultivo de alfalfa sembrado en un Haplustol típico. Las cifras de las leyendas indican días después de la siembra.

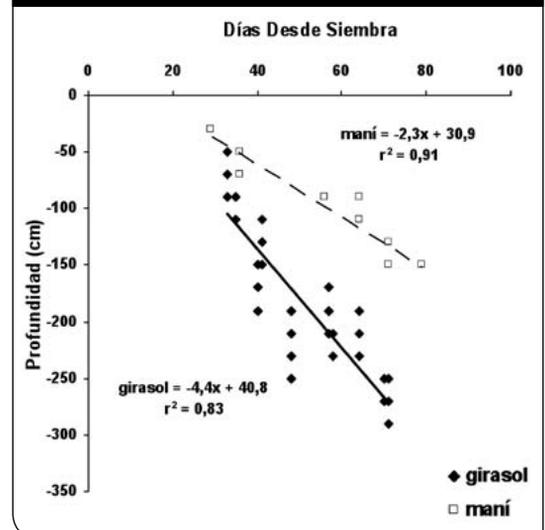


de suelos de franco-arenoso a franco-arcilloso es de 147 mm m<sup>-1</sup> (Dardanelli y Collino, 2002; Dardanelli et al., 2003). Conocida la lámina que se puede almacenar en un suelo, hay que analizar en qué medida el sistema radical del cultivo puede aprovecharla. Su funcionalidad se ha tratado de evaluar a través de mediciones de su

densidad, con escaso éxito. Estudios antiguos (Hamblin and Tennant, 1987), como recientes (Songsri et al., 2008) así lo demuestran. Una técnica mucho más exitosa ha sido evaluar la funcionalidad del sistema radical de determinado cultivo a través de la dinámica del agua en la matriz del suelo en períodos en que la oferta de agua es limitante para el cultivo, en aspectos tales como i) su capacidad potencial para absorber agua, y ii) las limitaciones funcionales del sistema radical debido a la desuniformidad de exploración de la matriz del suelo. La funcionalidad del sistema radical de un cultivo esta dado por la combinación de la velocidad aparente de profundización de raíces (VP) y por la tasa de absorción (TA), una vez que el sistema radical alcanzó un determinado estrato. La VP potencial se puede obtener desde mediciones sucesivas de humedad del suelo en condiciones de sequía luego de rellenado el perfil, graficando la fecha en que se inicia el agotamiento de agua de cada capa de suelo en función del tiempo. Este concepto fue propuesto originalmente por Monteith (1986). En la Figura 4 se puede observar la VP de dos cultivos estivales contrastantes, girasol y maní, que con sus valores de 2,3 y 4,4 cm día<sup>-1</sup>, constituyen los extremos de los cultivos primavera-estivales estudiados en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Dardanelli et. al. 1997).

Por otra parte, la TA se determina por la velocidad de agotamiento de un estrato de suelo una vez que las raíces alcanzaron el mismo. El patrón de agotamiento es exponencial y fue des-

**Figura 4:** Velocidad aparente de profundización de raíces en un Haplustol típico. Adaptado de Dardanelli et al., 1997.



cripto inicialmente por Passioura (1983). En la Figura 5 puede observarse un ejemplo para un cultivo de maní (Severina, datos no publicados).

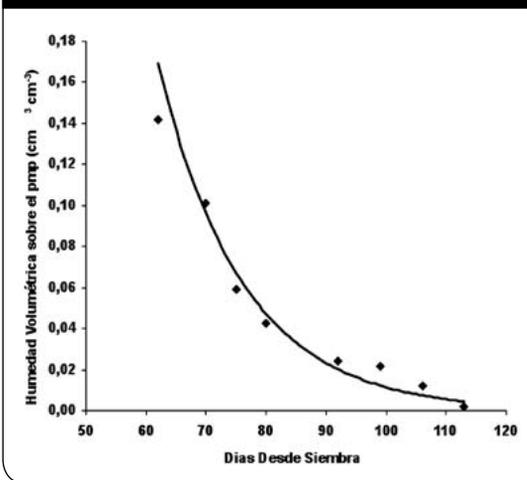
La pendiente de esta curva (cuyo valor se puede obtener por regresión lineal entre el logaritmo natural de los valores de humedad volumétrica sobre el punto de marchitez permanente en función del tiempo), indica cual es la proporción de agua útil remanente que un cultivo puede absorber diariamente. Así por ejemplo, un sistema radical que posea una  $T_A$  de 0,1 en una capa de

20 cm de espesor la capacidad de retención de agua útil es de 30 mm, podría absorber 3 mm día<sup>-1</sup> a capacidad de campo, y 1,5 mm día<sup>-1</sup> si el contenido de agua útil fuera del 50%. En la Figura 6 se pueden observar los valores de  $T_A$  de diversos cultivos en un suelo Haplustol típico, sin limitaciones aparentes para la proliferación de raíces.

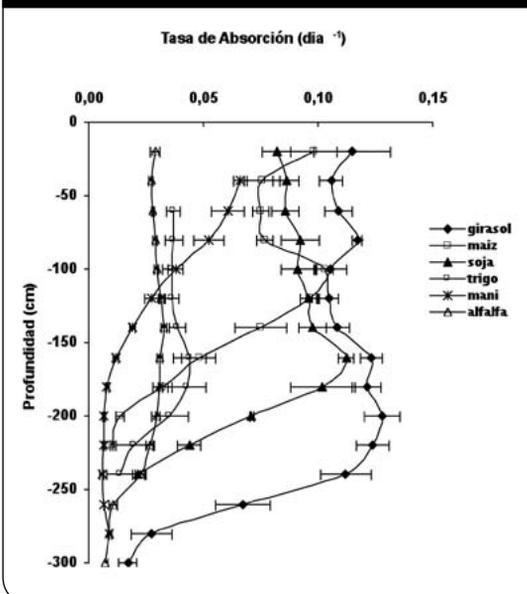
Se advierte que en general, se confirma el supuesto de que no necesariamente la  $T_A$  está relacionada por el decrecimiento de la densidad radical en profundidad, sintetizado en el modelo de extinción exponencial de raíces propuesto por Allan Jones et al., (1991). Se puede inferir entonces una densidad de raíces crítica por encima de la cual la  $T_A$  es máxima, como se observa claramente en cultivos con  $T_A$  contrastantes como girasol y alfalfa. El valor de este parámetro decrece en los estratos profundos donde se pueden esperar densidades de raíces inferiores a un valor crítico. La excepción a tal aseveración la constituye el maní, cultivo que muestra desde las capas superficiales una tendencia decreciente en  $T_A$ , lo que se corresponde aproximadamente con la disminución observada de la densidad de longitud de raíces (Collino et al., 2000). Cabe destacar al girasol con valores de  $T_A=0,11$  día<sup>-1</sup>, (puede absorber el 11% del agua remanente en un día), mientras que el trigo y la alfalfa, con valores entre 0,3 y 0,4 día<sup>-1</sup>. El trigo presenta una estrategia conservativa que condice con el largo tiempo en alcanzar el evento crítico de la antesis (110 días), y que le permite llegar con suficiente agua útil a antesis en climas generalmente deficitarios en invierno-primavera, como el centro y centro-oeste de la región pampeana. La alfalfa sería conservativa por su condición de cultivo perenne lo que le permite sobrevivir durante períodos prolongados de sequía.

La Figura 7 muestra el agua útil remanente después de una sequía terminal de varios cultivos. Se destaca el girasol cuyo sistema radical es el de mayor capacidad de utilización de agua del subsuelo, producto de su elevada  $v_p$  (Figura 4), así como su mayor  $T_A$  (Figura 6). El maní, por lo contrario, hace menor uso de las reservas del subsuelo y deja una cantidad considerable de agua útil en detrimento de su rendimiento bajo sequía y en beneficio del cultivo subsiguiente. La alfalfa presenta un patrón de agua remanente parecido a la mayoría de los cultivos anuales, aunque alcanza mayor profundidad dada

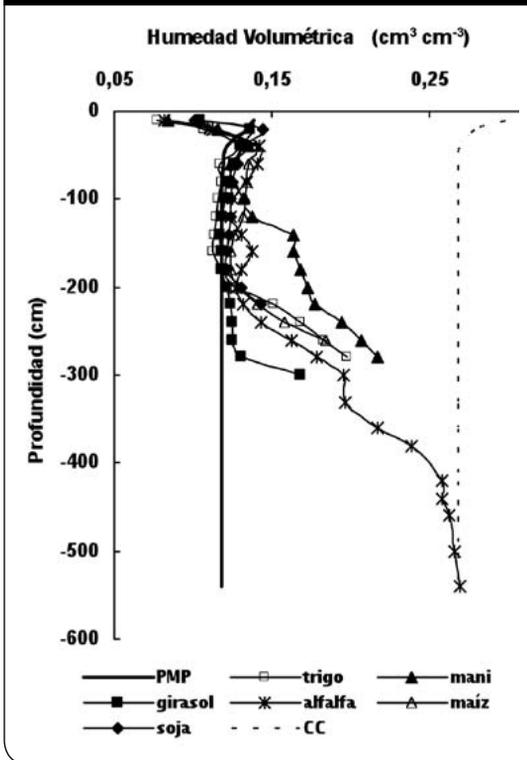
**Figura 5:** Evolución de la humedad volumétrica sobre el punto de marchitez permanente bajo condiciones de sequía en un estrato de suelo Haplustol éntico ocupado por raíces.



**Figura 6:** Tasa de absorción de diferentes cultivos sembrados en un Haplustol típico.



**Figura 7:** Agua útil remanente al final de una sequía terminal en cultivos sembrados en un Haplustol típico.



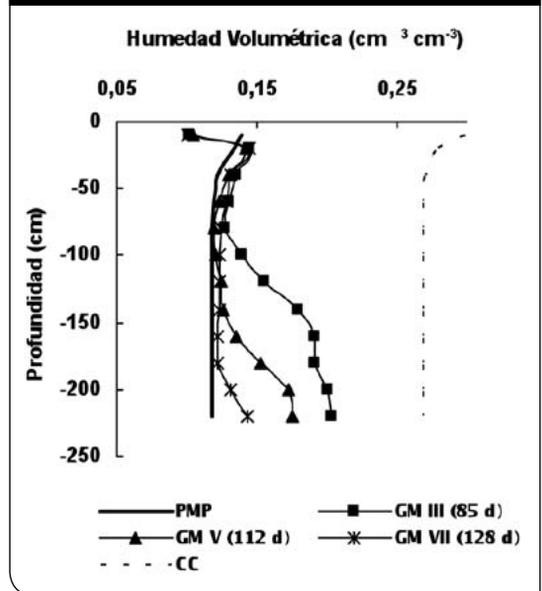
su condición de cultivo plurianual y un prolongado tiempo de siete meses para llegar a sequía terminal (Collino et al. 2005). El trigo compensa su baja  $VP$  de 2,1 cm día<sup>-1</sup> (Cantarero et al., 2008) y su baja  $TA$  con un ciclo largo de 180 días en el caso analizado.

En cuanto a variedades, se observa que el agua útil remanente de la soja depende del grupo de madurez (Figura 8), que condiciona la longitud del ciclo, que es más corto en aquellas variedades de menor grupo de madurez por el menor efecto fotoperiódico (Jones et al., 1991).

Todo lo analizado hasta el momento corresponde a situaciones de cultivos en suelos sin limitaciones por disponibilidad de agua en el subsuelo o impedimentos físicos que pudieran alterar la morfología del sistema radical y disminuir la  $VP$  y/o  $TA$ . En experimentos llevados a cabo en maní por Severina (datos no publicados) se demuestra que la  $VP$  es restringida con escasa agua útil en la profundidad de 60 a 200 cm (Figura 9).

El cultivo con menor agua útil en el subsuelo al inicio de la sequía impuesta no puede absorber

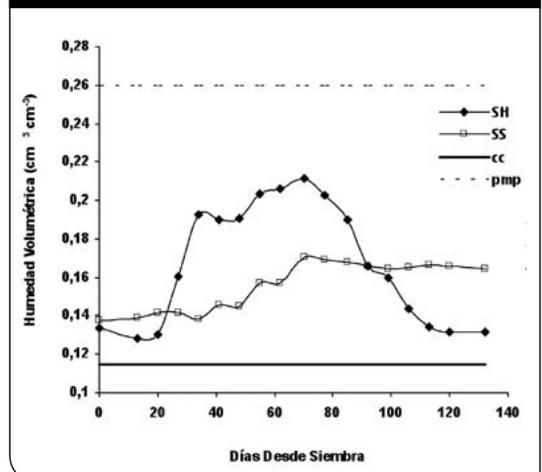
**Figura 8:** Agua útil remanente al final de una sequía terminal en cultivos de soja de diferentes Grupos de Madurez (GM) sembrados en un Haplustol típico. Los números entre paréntesis indican la duración del ciclo para los GM iii, v y vii. Adaptado de Dardanelli et al., 2004)



agua en el estrato 160-180 cm sugiriendo ausencia de raíces, en tanto que aquél con mayor agua útil sí puede hacerlo. Se puede atribuir esta diferencia en la  $VP$  a la resistencia del suelo diferencial sobre la profundización del ápice radical.

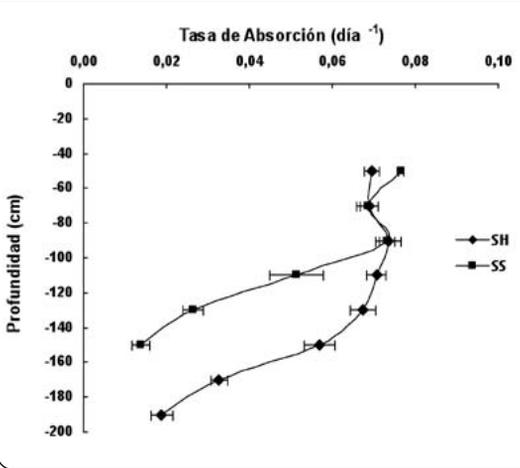
En efecto, Gil (1994) encontró que la resistencia de este suelo aumenta de 15 a 60 kg cm<sup>-2</sup> cuan-

**Figura 9:** Evolución de la Humedad Volumétrica del estrato 160-180 de un suelo sembrado con maní, con sequía impuesta partiendo desde diferentes contenidos de agua útil, contenido alto (SH) y contenido bajo (SS) de agua útil en el subsuelo.



do el agua útil del subsuelo decrece desde capacidad de campo a 20% de agua útil. En concordancia con la disminución de VP, la TA también sufre una reducción importante (Figura 10).

**Figura 10:** Tasa de absorción del cultivo de maní a lo largo del perfil de un Haplustol típico, con sequía impuesta, partiendo desde diferentes contenidos de agua útil en el subsuelo: contenido alto (SH) y contenido bajo (SS).



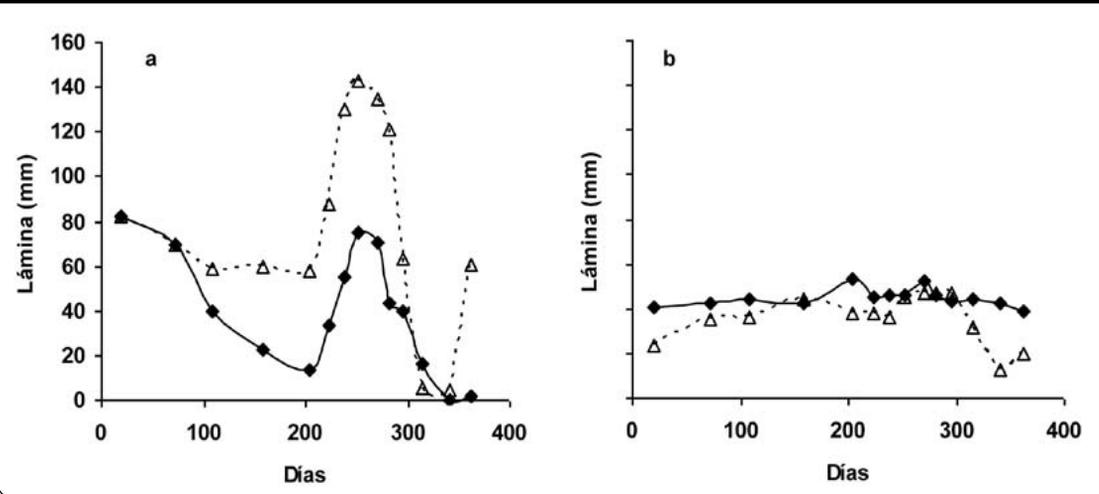
En un experimento llevado a cabo en una microcuencia bajo sistemas de labranza convencional y siembra directa, se observó que en la profundidad 150 a 250 cm el agua útil no puede ser absorbida en el primero de los casos, donde el escurrimiento fue mayor, (Figura 11), porque presumiblemente las raíces no pudieron atra-

vesar capas con bajo contenido de agua y alta resistencia a la penetración.

Con menor cantidad de agua útil en el subsuelo se produce una disminución del rendimiento a través de dos vías; i) la menor disponibilidad hídrica *per se* y ii) la menor capacidad del sistema radical de absorber agua por efecto de la resistencia del suelo. En el Cuadro 1 pueden observarse los efectos de diferentes condiciones de agua en el subsuelo sobre los rendimientos de dos cultivares ASEM 485 INTA, de ciclo corto y mayor partición hacia granos, y FLORMAN INTA, de ciclo más largo y menor partición hacia granos. Siempre ASEM presenta mayores rendimientos, diferencias que se magnifican entre fechas para 70% de agua útil en el subsuelo al inicio de un período de sequía impuesta, porque otros factores como radiación y temperaturas están interactuando. La combinación de radiación decreciente y baja disponibilidad de agua en el subsuelo es una fuerte limitante en fecha tardía en ambos cultivares.

El riego suplementario asociado al agua del subsuelo permitiría optimizar recursos y adelantar fechas de siembra, que en el maní es una práctica de manejo de alto impacto. El relleno del perfil de suelo, que no puede hacerse eficientemente durante el crecimiento del cultivo dado que las raíces interceptan el agua en su descenso a través del perfil, es una estrategia recomendable para el invierno, cuando las posibilidades de pérdidas por evaporación son menores.

**Figura 11:** Lámina de agua útil en dos estratos: a) 0-150 cm y b) 150-250 cm en un suelo Haplustol típico con cultivo de soja seguido de barbecho, bajo sistema de labranza convencional (línea y símbolos llenos), y siembra directa (línea cortada y símbolos vacíos).



**Cuadro 1:** Rendimiento de maní con diferentes porcentajes de agua útil en el subsuelo al inicio de una sequía impuesta (70% y 30%), para fechas de siembra temprana ( $\tau_E$ ) y tardía ( $\tau_A$ ). Los rendimientos máximos provienen de Haro et al., (2007)

Cultivar	Rendimiento, t ha <sup>-1</sup>				Brecha, $\tau_A/\tau_E$		Rend. Max., t ha <sup>-1</sup> *	
	Te 70%	Ta 70%	Te 30%	Ta 30%	70%	30%	Te	Ta
FLORMAN	1,924	1,012	1,018	0,466	0,53	0,46	4,612	3,129
ASEM	2,156	2,464	1,318	0,668	1,14	0,27	5,125	4,546

Comparando dos oleaginosos como maní y soja, hay marcadas diferencias entre ellas en cuanto a funcionalidad de raíces y consecuentemente en el agua residual. En la Figura 12 se observa que la soja posee un valor más elevado de VA expresado en unidades térmicas sobre una temperatura base de 7,8 °C (Jones et al., 1991), respecto a maní considerando una temperatura base de 11°C (Williams and Boote, 1995).

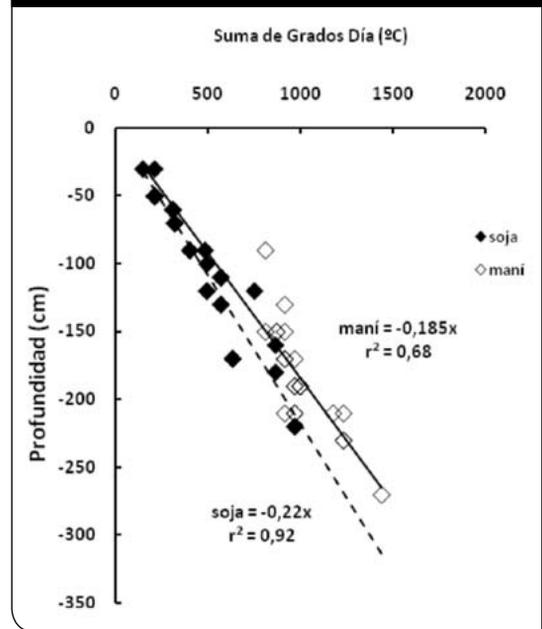
Asimismo, la  $\tau_A$  es mayor en soja, aún comparada con la más elevada  $\tau_A$  del maní en condiciones más favorables de siembra tardía (Figura 13), donde la mayor acumulación de biomasa hasta el inicio de crecimiento de vainas, supone una mayor cantidad de raíces (Severina, datos no publicados).

En consecuencia, la soja presenta un agotamiento total del perfil (densidad de raíces funcionales no crítica) hasta 180 cm de profundidad, mientras que el maní agota el perfil hasta los 120 cm (Figura 14) El agua residual del maní para los primeros 230 cm es de 38, 45 y 56 mm de agua útil, mayor que la soja, que deja solo 13 mm. Por tanto, los riegos suplementarios en maní deberían ser más frecuentes. Hay que pensar que habría una oportunidad de mejoramiento varietal en maní, no solo en precocidad y partición, tal como fuera logrado con la variedad ASEM 485 INTA, sino también en VP y  $\tau_A$  del sistema radical.

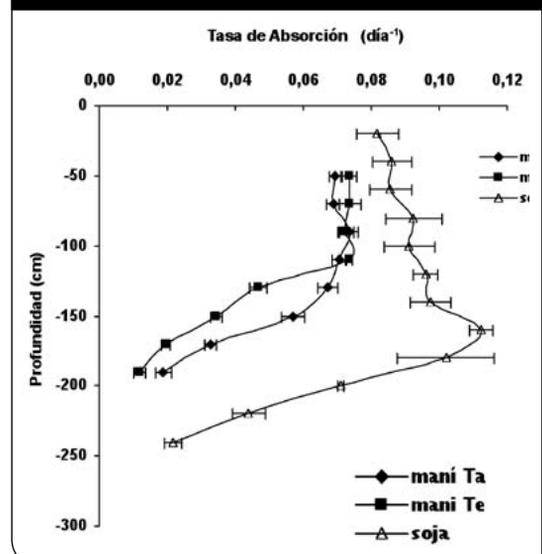
Por último, independientemente de la especie, el tipo de suelo tiene marcada influencia en la distribución de las raíces en el subsuelo que se refleja en las variaciones de  $\tau_A$  presentadas en la Figura 15.

Se puede observar que en un Haplustol Típico no existen impedimentos para la máxima funcionalidad de raíces, en tanto que en un Argiudol típico y más aún en un Argiudol vértico la menor  $\tau_A$  sugiere una distribución desuniforme de raíces en el horizonte B textural, con una recuperación parcial de su distribu-

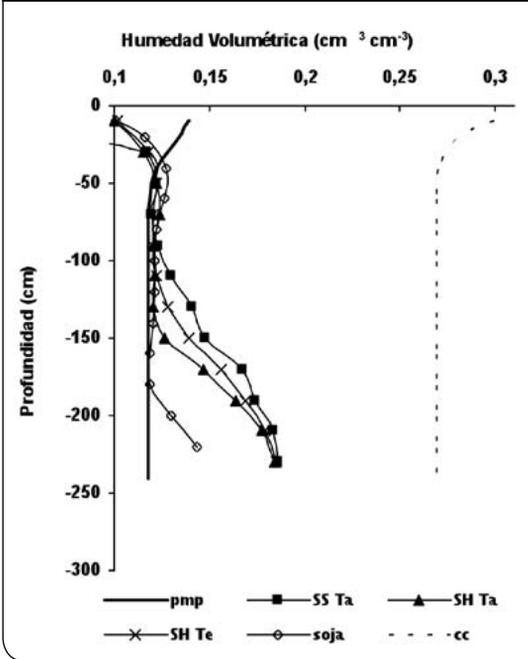
**Figura 12:** Velocidad aparente de profundización de raíces en función de suma de grados días de soja (temperatura base de 7,8°C), y maní (temperatura base de 11°C).



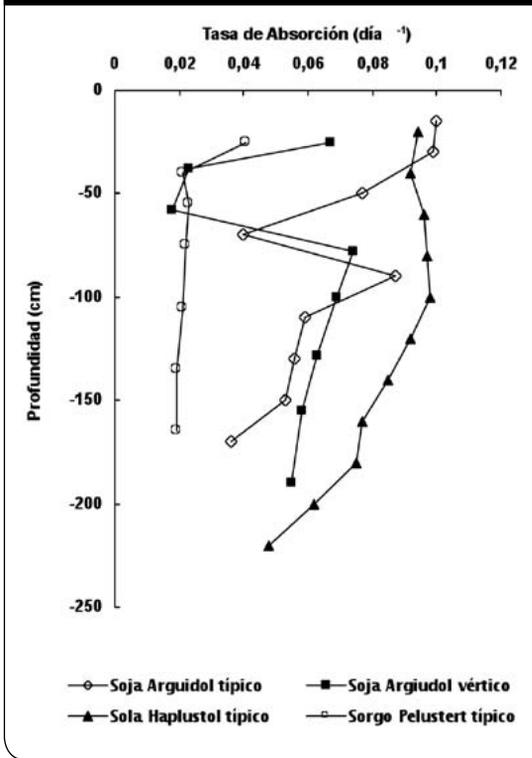
**Figura 13:** Tasa de absorción de soja de maní creciendo sobre un Haplustol Típico en siembra temprana ( $\tau_E$ , cuadrados llenos) y siembra tardía ( $\tau_A$ , rombos llenos), y soja (triángulos vacíos)



**Figura 14:** Agua útil remanente en un suelo Haplustol Entico en cultivos de soja, y maní sometidos a sequía impuesta: en maní se partió desde diferentes contenidos de agua útil en el subsuelo, contenido alto (SH) y contenido bajo (SS) para siembra temprana (TE) y siembras tardías (TA)



**Figura 15:** Tasas de absorción en perfiles de suelo de diferentes tipos.



ción en los horizontes más profundos. Esta disminución de la TA, que es más marcada en los Arguidoles vérticos se atribuye a la formación de un horizonte de iluviación B textural (Vargas Gil, 1973), en particular en los Arguidoles vérticos, permitiendo el paso de las raíces solo a través de las grietas originadas por la acumulación de arcillas expansibles (montmorillonita) en este horizonte (Scoppa y Pazos, 1981). La alteración de la morfología del sistema radical causada por el proceso descrito provoca un efecto sombreado que fuera reportado por Tardieu (1994), por lo cual la TA en los horizontes subyacentes no alcanza los valores que tienen los Haplustoles y Hapludoles a profundidad equivalente (Dardanelli et al., 2004). Es interesante mencionar que la  $v_p$  solo decrece levemente en los Arguidoles vérticos (Dardanelli et al., 2003). Por último en un suelo Pelustert, de la India (Lee, 1996), la distribución desuniforme de las raíces se observa a través de todo el perfil, que contiene 65% de arcilla, mayormente montmorillonita, lo que ocasiona severas restricciones del suelo a ceder agua al cultivo. En este suelo el sorgo presenta una TA uniformemente baja, de alrededor de un 20% del máximo para soja. Esta

baja TA, derivada de la concentración de raíces en las grietas del suelo, causa una rápida entrada a condición de sequía ante ausencia de precipitaciones o riegos, dado que la oferta de agua está severamente restringida por la dificultad del agua de la matriz del suelo para llegar a la zona radical. Este comportamiento sería extrapolable a los Peluderts presentes en el Este de Argentina y en Uruguay, ya que contienen alrededor de 50% de arcillas a lo largo del mismo, en gran parte montmorillonitas expansibles (Imbellone et al., 2010).

La gran mayoría de los suelos agrícolas extensivos de la región pampeana son Haplustoles o Hapludoles, y Arguidoles (Cuadro 2). Hacia el Este se encuentran algunos suelos Peluderts. La suma de Arguidoles y Peluderts en la región pampeana comprende el 45,5 de los suelos agrícolas (Cuadro 2), lo que refleja la importancia de lo desarrollado anteriormente en cuanto a restricciones en la TA de estos suelos. Los Peluderts también se encuentran en parte del Uruguay (Durán et al., 1999), con una superficie aproximada de 900.000 ha (Giménez, com. pers.).

**Cuadro 2:** Superficie correspondiente a los principales grandes grupos de suelos donde se cultiva soja en la región pampeana y categorización según el grado de restricción (GR) que presentan a la proliferación de raíces. (Adaptado de INTA-PNUD, 1990)

Gran Grupo	Superficie millones ha	GR	Suma según GR	Porcentaje según GR
Pelludert	2,91	Alto	2,91	6,5
Arguidol	15,84	Mediano		
Argiustol	1,59	Mediano	17,43	39,1
Haplustol	13,29	Bajo		
Hapludol	11,00	Bajo	24,29	54,4
	44,63			100,0

¿Qué consecuencias tiene todo lo descripto sobre la optimización del riego suplementario? Que el umbral de riego, difundido ampliamente como un criterio para aplicar riego suplementario para evitar déficits hídricos no es estático sino función de: i) la profundidad de las raíces, ii) la proporción del agua aplicada que se destina a transpiración iii) la especie y iv) el tipo de suelo. Además debe tenerse en cuenta la demanda ambiental para la transpiración del cultivo que también influye en el valor del umbral de riego. Las raíces alcanzarán su máxima profundidad efectiva si el subsuelo tiene suficiente agua útil; la evaporación en detrimento de la transpiración se atenuará evitando el riego durante el período de cobertura incompleta, en particular en cultivos primavero-estivales la especie influye por sus diferentes VP y TA, y el tipo de suelo es fundamental porque afecta marcadamente la TA en función de diferentes niveles de restricción a la distribución de las raíces funcionales para la absorción de agua. En consecuencia, el umbral varía día a día, por las características dinámicas tanto por la oferta de agua como por la demanda. Los Cuadros 3 y 4, ilustran, respectivamente, ante diferentes valores de evapotranspiración potencial, las diferencias de umbrales entre

algunas especies en un suelo Haplustol y las diferencias de umbrales de la soja en los tres tipos de suelo antes descriptos. Puede observarse que el maíz, por su funcionalidad radical tiene los umbrales de riego más altos, y el girasol los más bajos (Cuadro 3), y que para la soja, el Pelludert debe ser regado con más frecuencia por presentar un umbral de riego sensiblemente mayor al Arguidol y al Haplustol, que tiene los umbrales menores.

Comentarios adicionales merece la influencia de la napa freática como un complemento del riego para suplir agua a los cultivos en una amplia área de la región pampeana. Se ha observado en alfalfa un efecto sistemático de la napa freática favoreciendo el incremento de la producción de forraje. Por ejemplo en Rafaela (Santa Fe), una napa ubicada a 225 cm de profundidad, contribuyó a satisfacer el 13% de la demanda potencial del cultivo (Dardanelli and Collino, 2002), calculada en base a los resultados reportados por López et al., (1997), mientras que la precipitación efectiva, estimada a partir de la ecuación de ajuste obtenida por Dardanelli et al., (1992), aportó el 45% de la demanda. Es decir que el aporte de la napa no resolvió completamente el déficit de agua del cultivo, siendo necesaria de todos modos la aplicación de riego suplementario.

**Cuadro 4:** Umbrales críticos, expresados como porcentajes de agua útil, por debajo de los cuales la evapotranspiración potencial del cultivo de soja (ETc) no puede ser satisfecha totalmente. Estos umbrales se calcularon para un perfil de 2 metros, asumiendo un sistema de raíces completamente desarrollado. Adaptado de Dardanelli y Andriani (2003).

Tipo de suelo	ETc, mm d-1		
	3	5	7
Haplustol	10-15	20	25-30
Arguidol	15-20	25-30	40-45
Pelludert	35	60	80-85

**Cuadro 3:** Tasa de absorción máxima (TAM), profundidad con raíces que presentan tasas de absorción máxima (PRTAM), profundidad máxima de raíces (PRmax), agua útil hasta PRmax, umbral crítico (en porcentaje y lámina de agua útil), para una evapotranspiración potencial de 8 mm d-1 (ETc8mm d-1) y de 4 mm d-1 (ETc4mm d-1). Adaptado de Dardanelli et al. (2002) en base a Dardanelli et al. (1997).

Especie	Ciclo d	TAM %	PRTAM cm	PRmax cm	AU Mm	ETc8mm d-1 % mm	ETc4mm d-1 % mm
Girasol	105	11,4	250	290	435	18 88	9 44
Soja	140	9,5	190	250	375	26 98	13 49
Maíz	125	8,4	130	210	315	37 117	18 56

rio. Otro tipo de aporte de la napa que podemos considerar “indirecto” fue observado durante el barbecho de soja en un Haplustol típico de Manfredi (Córdoba), donde la napa se encontraba a 420 cm de profundidad. El flujo insaturado durante el barbecho permitió el aporte extra de 133 mm en los 300 cm superiores del perfil, con la ventaja adicional de que se logró una distribución uniforme del agua del subsuelo que previene la ocurrencia de niveles de resistencia del suelo críticos para un óptimo desarrollo del sistema radical.

---

### 2.3. Consideraciones finales

Reforzando el concepto de que el riego es suplementario a otros aportes hídricos en cultivos extensivos tradicionalmente regados en secano, se ha puesto énfasis en primer lugar en las limitaciones del agua de lluvia para suministrar agua a la matriz del suelo, que es fuente de transpiración del cultivo, debido a pérdidas por escorrentía, evaporación desde el suelo y drenaje. Una vez logrado un almacenaje determinado de agua en el subsuelo, se han analizado interacciones de factores a tener en cuenta para la optimización del riego (que es un insumo en general caro), dado que el recurso subterráneo

es el recurso mayoritariamente usado en las superficies incorporadas para este tipo de cultivo. Estas interacciones son complejas pero abordables: tasas potenciales de profundización de raíces y tasas de absorción, dependientes ambas de la especie; limitaciones de suelo para suplir agua al sistema radical, y aportes de la napa freática. La optimización del riego suplementario debe contemplar el relleno del perfil según la profundidad potencial de enraizamiento, pero evitando las pérdidas por drenaje saturado o insaturado, y evitando también la aplicación de láminas en épocas de fuerte evaporación desde el suelo (por ejemplo los períodos tempranos en cultivos estivales). Se enfatiza el concepto dinámico del umbral de riego en función de la profundidad de raíces, la tasa de absorción, el tipo de suelos y la demanda ambiental modal. El riego suplementario optimizado, será una herramienta importante para ampliar las ventanas de siembra, permitiendo ubicar los períodos críticos en períodos de mejor aprovechamiento del recurso que hace al incremento de biomasa, la radiación fotosintéticamente activa. Este trabajo ha pretendido ayudar a desarrollar criterios dinámicos y flexibles del manejo del riego *en pos* del uso equilibrado de los recursos agua del subsuelo y agua proveniente del riego suplementario.