

CAPÍTULO 2

El concepto de la relación Suelo-Agua-Planta

Autora: Dra. Dorota Dec.

Para entender y manejar de la manera correcta el riego bajo un ecosistema agrícola es importante entender sus componentes, como las relaciones entre ellos. Desde el punto de vista agrícola esta relevancia se enfoca principalmente en el análisis de las relaciones que existen entre el suelo- planta - atmosfera (Figura 5), considerando que entre ellos se produce el flujo de energía y masa. El flujo de energía en este *continuum* comienza desde la energía electromagnética proveniente del sol, cual posteriormente se transforma en energía disponible en los enlaces carbono-carbono de los tejidos. Esto ocurre en el proceso de fotosíntesis, en el cual aproximadamente el 50% de la energía proveniente de sol es utilizada y 2% de la energía incidente es la efectivamente absorbida por los tejidos. El restante 98% es usado para la regulación de temperatura (calor sensible) y transpiración (calor latente). Esto indica que existen relaciones directas entre los mencionados componentes de ecosistema agrícola, cual se rige por el flujo de energía y materia; en este caso - agua. El suelo es considerado como el medio natural que sustenta los cultivo, ya que, en él, las raíces se anclan y posteriormente absorben agua y nutrientes. En la agricultura tradicional es la vía de alimentación de los cultivos, por lo cual es el principal factor que debería ser considerado en el momento de establecer el sistema de riego eficiente.



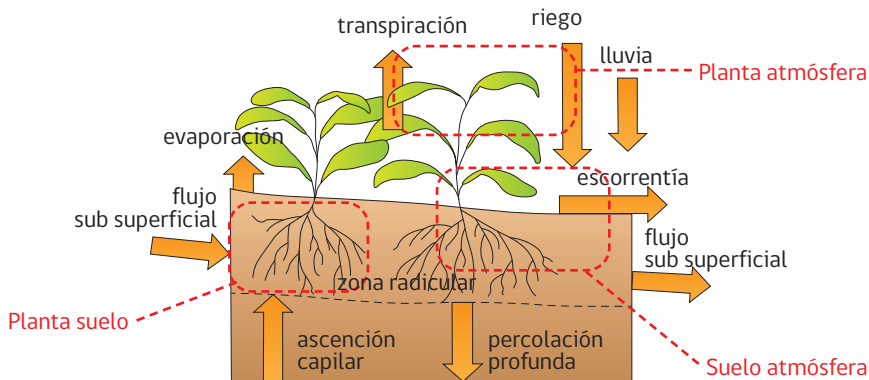


Figura 5. Balance de agua en el suelo de la zona radicular (FAO, 2006).

Estructura del suelo

Según Horn y Smucker (2005) la estructura del suelo se define como la disposición de partículas minerales y sustancias orgánicas, a mayor escala definidas como agregados, que entre ellos forman un sistema poroso. Los agregados se forman debido a procesos de contracción e hinchamiento de un material masivo que movilizan las partículas de suelo, aumentando los puntos de contacto entre ellas y modificando el sistema poroso (Horn y Smucker, 2005), por lo cual las propiedades y característica de un sistema poroso, son usadas en la caracterización de la estructura del suelo (Dörner y Horn, 2006; Pagenkemper et al., 2014).

El desarrollo pedogenético del suelo depende de factores, dentro de cuales destaca el tipo de material parental, clima, topografía y actividad biológica. La interacción entre a través del tiempo permite el desarrollo del suelo y la estructura desde un estado masivo a formación de los agregados, cada vez más estables. (Figura 6). Los cambios en la forma, tamaño y distribución de los agregados implican la formación de la estructura de mejor calidad, funcionalidad y en esta manera- utilidad desde el punto de vista agrícola.

La estructura con mayor grado de desarrollo ofrece mejor flujo del agua a través del sistema poroso. Algunas de las propiedades que ofrece un suelo bien estructurado son: la adecuada disponibilidad y transporte de agua y gases (ADP mayor a 20%; CA > 8%; conductividad hidráulica saturada > 2 log cm día⁻¹; permeabilidad de aire mayor a 1,1 log μm²) como así también una mayor

estabilidad mecánica (Reszkowska et al., 2011) estrictamente conectada con la funcionalidad estructural del suelo. Sin embargo, labores agrícolas como la labranza o pastoreo provocan alteraciones en la relación suelo-agua-aire, generados por una reducción de la acción estabilizante de la materia orgánica y así su efecto sobre la estructura, lo que resulta en la reorganización del tamaño de los poros, afectando el crecimiento de las plantas (Hartge, 2000), las funciones de los poros y, en consecuencia, la dinámica del agua en el suelo (Dörner et al., 2013). Por otro lado, como la formación de la estructura es un proceso de largo plazo, que involucra procesos de secado y mojado, la cementación de las partículas del suelo, la estabilización de la estructura por los procesos biológicos de la macro, meso y microfauna del suelo, y su estado nutricional (Zuñiga et al., 2015) modificando la relación suelo-agua-aire existente originalmente (Hartge, 2000; Bronick y Lal, 2005). Estos constantes cambios indican que para el correcto y eficiente uso del agua con los fines de riego se debería considerar el constante monitoreo del suelo y el ajuste de los parámetros de riego, que consideran la variabilidad temporal y espacial de este medio.

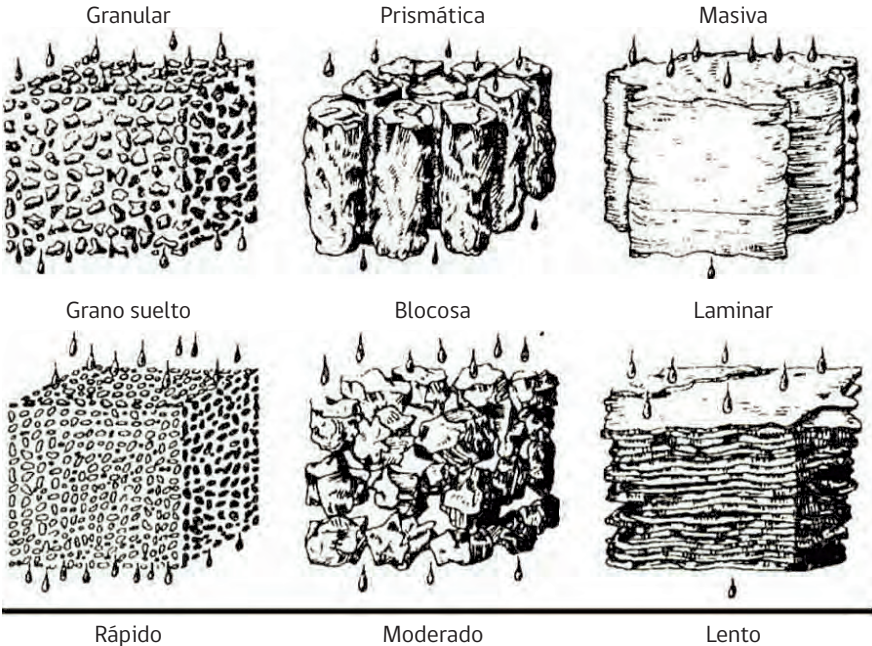


Figura 6. Flujo del agua a través de distintos tipos de estructura del suelo (FAO, 2006)

Textura del suelo y movimiento del agua

El movimiento del agua dentro del suelo es condicionado también por la textura de este, la cual está compuesta por partículas de distinto tamaño y forma, las que poseen variable superficie específica. Lo último es definido como la superficie total de las partículas por unidad de volumen (m^2/m^3) o de masa (m^2/gr), por lo cual la disminución del tamaño de partícula significa el aumento de su superficie específica y la disminución del tamaño de los poros. Mayor superficie específica significa a la vez mayor retención de agua por las partículas, resultando en distinta forma de flujo del agua a través del suelo. La aplicación de la misma lámina de agua en suelos con distintas texturas, p.ej.: suelos franco arenoso y franco arcilloso (Figura 7) traerá consecuencias diferentes en casa caso En el caso de primera, compuesta por partículas y poros grandes, el movimiento de agua se debe principalmente a la acción de gravedad, por lo cual infiltración en la dirección vertical es rápida y el bulbo mojado (corte transversal dentro del perfil del suelo que se humecta después de riego) que se forma es angosto. En el caso de suelo franco arcilloso, con partículas más finas y poros más pequeños, el movimiento de agua se debe principalmente a capilaridad, siendo mayor en dirección horizontal que vertical. Esto resulta en la formación de bulbo mojado más extenso, el cual necesita más tiempo para llegar a la misma profundidad que en primer caso, como presenta Figura 7.

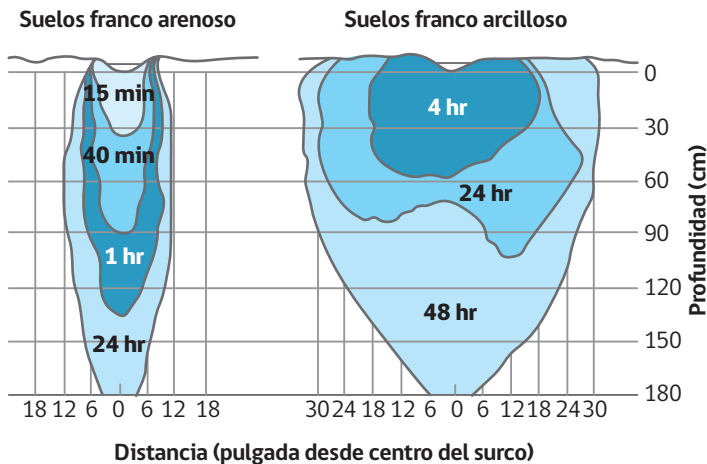


Figura 7. Movimiento del agua de riego para suelo franco arenoso y franco arcilloso dentro del perfil del suelo (riego por surcos; Boman et al., 2021).



Suelo como almacén del agua

El suelo es considerado como medio trifásico, compuesto por la fase sólida, líquida y gaseosa, capaz de transportar y almacenar agua, aire y calor (Dörner y Dec, 2007). La fase sólida está compuesta por una mezcla de arena, arcilla y limo las que tienen distinto tamaño (hasta 2 mm: arena: 0,50 mm limo: 0,002 mm: arcilla), en conjunto con la materia orgánica y otros elementos cementantes forman la estructura del suelo (Hartge y Horn, 2016). Las partículas sólidas no encajan al 100%, formando entre ellos espacios libres – los poros, que son ocupados por el aire y/o agua incidiendo sobre la capacidad del suelo para conducir estas dos fases. La cantidad y el tamaño de estos poros depende de la textura y estructura del suelo, característica para cada tipo del suelo y decide sobre la disponibilidad del aire y del agua para las plantas. Sin embargo, la proporción de las fases, por lo cual, la porosidad cambia continuamente ya que está afectada por el clima, la vegetación y el manejo del suelo (Hillel, 1990). Estos cambios tienen que ser considerados en el momento de determinar los parámetros de riego, de manera de ser eficientes en el uso del agua. Esto debido a que de la porosidad del suelo depende de la capacidad del sistema de almacenar y conducir el agua (Dörner y Dec, 2007) ya que este determina el movimiento de agua en el suelo (Iversen et al., 2001, Dörner y Horn, 2006). En ese contexto, el movimiento de fluidos en el suelo es fundamental para la comprensión de procesos de transporte, como es por ejemplo la dinámica del agua en el suelo, considerada para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos y el volumen del agua óptimo para crecimiento y función de las raíces.

Agua disponible para las plantas

Para lograr que los cultivos expresen su máximo rendimiento, es necesario contar con un óptimo contenido de agua aprovechable/ disponible para las plantas en el suelo, el cual se encuentra entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Sandoval et al., 2012). Ambos puntos se extraen de la Curva de Retención de Agua o Curva pF, obtenida bajo condiciones de laboratorio. Esta curva (Figura 8a) describe la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y la tensión con cual esta es retenida por las partículas del suelo, entregando información sobre la cantidad de la distribución de los poros, tomando en cuenta su diámetro (Cuadro1).

Los macroporos, > 50 μm corresponden a los poros de drenaje rápido (PDR). El movimiento de agua a través de ellos es muy rápido, y por tanto, no puede ser aprovechada por las plantas. Los mesoporos corresponden a los poros de drenaje lento (PDL) (50 - 10 μm) y poros de agua útil (PAU) (10 - 0,2 μm). Estos corresponden el agua disponible para las plantas (ADP); la cual es almacenada entre capacidad de campo (CDC) y punto de marchitez permanente (PMP) (determinación practica descrita en parte "Determinación de curva Retención de Agua").

Capacidad de Campo indica el límite superior de agua aprovechable para la planta y corresponde a cantidad de agua que queda retenida en el suelo en contra de la fuerza de gravedad que corresponde a tensión entre 10 o 330 hPa (60 hPa para Andisoles) y se calcula de la siguiente formula (Hartge y Horn, 2009):

$$CDC = \frac{(P_{sh} - P_{ss})}{P_{ss}} * 100$$

Dónde: Psh corresponde a peso de suelo húmedo a tensión correspondiente a limite mencionado (60 hPa para Andisoles) y Pss a peso suelo seco a 105°C.

El Punto de Marchitez Permanente, corresponde a límite mínimo de agua que puede ser absorbida por las plantas. Superando este límite, la planta presenta síntomas de marchitez irreversible, ya que el agua es atraída por las partículas del suelo con una tensión de 15.430 hPa, que supera la capacidad de las raíces para absorberla. Para su cálculo se usa la formula anterior, con la diferencia que

Psh corresponde a peso de suelo a 15.430 hPa y Pss a peso suelo seco a 105°C (Hartge y Horn, 2009).

Poros que superan este punto corresponden a los microporos <0,2 μm y son denominados como los de agua inútil (PAI) ya que retienen el agua a tensión que impide su absorción. Por lo tanto, el volumen de agua disponible para las plantas (Hartge y Horn, 2009) se determina como:

$$ADP = \theta_{60/330hPa} - \theta_{60/330hPa}$$

Donde: θ_{60hPa} y $\theta_{15430hPa}$: contenido volumétrico de agua a Capacidad De Campo y Punto de Marchitez Permanente respectivamente. Según la Figura 8b, ADP para 5 cm es de 26% y se encuentra entre 49% y 23% de humedad.

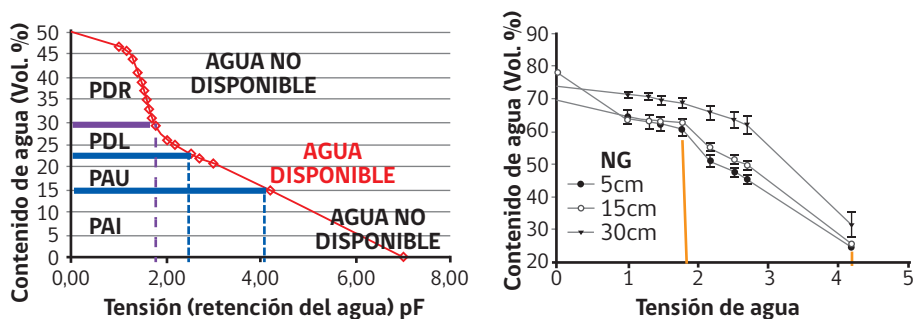


Figura 8: urva de Retención de Agua: a) esquema, b) para Andisol bajo la pradera naturalizada (NG) pata distintas profundidades. Se presentan valores medios \pm 1 y error estándar (n = 7). Dec et al., 2017. Línea roja en b) corresponde a CDC (1,8 pF) y PMP (4,2 pF).

Tabla 1: Distribución de tamaño de los poros

Tensión [hPa]	pF	Diámetro [μm]	Poros
0 - 60	0 - 1,8	> 50	Poros de drenaje rápido PDR (60hPa)
60 - 330	1,8 - 2,5	50 - 10	Poros de drenaje lento PDL (150hPa)
300 - 15000	2,5 - 4,2	10 - 0,2	Poros de retención agua útil PAU (330hPa)
> 15000	> 4,2	< 0,2	Poros de agua inútil PAI (500hPa)

Determinación de la curva de Retención de Agua (CRA o pF)

Para la determinación de la Curva de Retención de Agua (CRA o curva pF) se usan muestras del suelo no disturbada, tomadas a diferentes profundidades dependiendo del cultivo de interés (Figura 9 a-c) a través de registro el contenido de agua a distintos niveles de saturación. Primero las muestras se saturan lentamente con agua por ascenso capilar (para evitar que el aire quede atrapado en los poros del suelo) (Figura 10^a) por el tiempo que permite saturación completa de los poros. Posteriormente las muestras se drenan en bandejas de arena hasta alcanzar tensiones de -10, -20, -30 y -60 hPa por medio de control de columna de agua colgante (Figura 10b), y en ollas de presión a presiones de -150, -330, -500 y -15.000 hPa (Figura 10c). El volumen de poros finos (< 2 μm) se determina en muestras armadas de material disturbado en cilindros de 20 cm³ a tensión de 15.430 hPa en un plato de presión (Figura 10d). Una vez logrado el equilibrio entre tensión aplicada y contenido gravimétrico de agua se registra el peso húmedo de cada muestra para las distintas tensiones. Posteriormente, las muestras se secan a 105°C durante 24 horas para determinar Densidad aparente (D_a) y porosidad total del suelo (Hartge y Horn, 1992). Los valores determinados para la curva pF y distribución de poros se corrige de acuerdo con la contracción que sufre el suelo con el secado (Sandoval et al., 2012)..

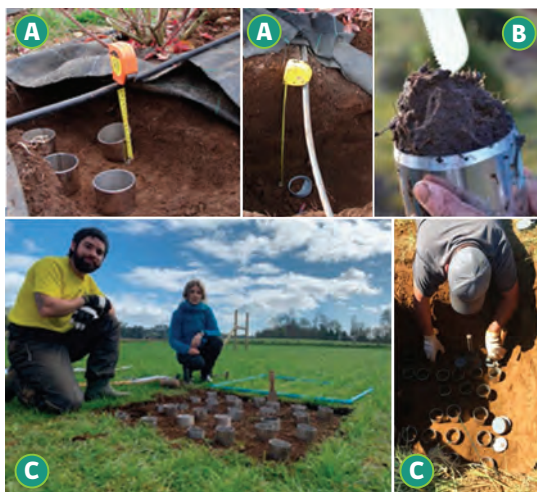


Figura 9: Muestreo físico del suelo: a) determinación de profundidad de muestreo, b) limpieza de la muestra, c) muestreo de la superficie.



Figura 10: Procedimiento de la determinación de la Curva de Retención de Agua (pF): a) saturación por ascenso capilar, b) drenaje a distintas tensiones (a través del cambio de altura: Δh del espejo de agua) en bandejas de arena, b1) vista desde arriba, c) drenaje en olla de presión, d) drenaje en plato de presión.

Capacidad de Aire

Según Dörner y Dec (2007) la caracterización del sistema poroso del suelo es fundamental para conocer su capacidad de almacenamiento de agua y aire. La importancia radica en que se reflejan las condiciones necesarias para que ocurra una adecuada aireación en la zona radicular, necesaria para correcta absorción de los nutrientes y respiración de las raíces. Horn y Fleige (2009) indican el valor óptimo de capacidad volumétrica de aire (CA) superior a un 10%, señalando valor inferior como indicador de problemas de compactación. Los mismos autores señalan que esta propiedad representa la cantidad de macroporos con un diámetro $> 50 \mu\text{m}$, por lo cual puede ser obtenida de la CRA, como sigue:

$$CA = \theta_{sat} - CDC [\%]$$

Donde θ_{sat} corresponde a contenido volumétrico del agua en suelo saturado. Según la Figura 8 CA para 5 cm tiene valor de 21%.

La capacidad de aire es considerada como uno de los parámetros del suelo más susceptible a cambios, ya que corresponde a los macroporos, los cuales, debido a su tamaño, son más susceptible a la deformación y restructuración (Gebhardt et al. 2009, Dörner et al. 2011). Esta restructuración y la sustitución de la macroporosidad por los poros más finos se considera como la modificación de la estructura. Estos cambios afectan el crecimiento de las plantas (Hartge, 2000), las funciones de los poros y a través de esto, la dinámica del agua en el suelo (Dörner et al., 2013). Por lo tanto, y dependiendo de tipo de suelo (su textura y estructura) puede tener efectos positivos o negativos sobre la funcionalidad de este medio. En suelos con alta porosidad gruesa (suelos arenosos) esta restructuración resulta en aumento de porosidad mediana y fina, que favorece la cantidad de agua disponible para las plantas, pero a la vez implica una menor aireación e infiltración de agua (Seguel and Horn, 2006). En el caso de suelos arcillosos, en cuales predominan los meso y microporos, esta reorganización en general lleva a problemas de compactación (Mordhorst et al., 2012) y como resultado de esto, la disminución de ADP, el flujo de agua a través del perfil del suelo (Dörner and Horn, 2006; Dec et al., 2012) y aumenta el exceso de humedad del suelo y posibilidad de estancamiento del agua (Fleige et al., 2016).

El mantenimiento del suelo con correcta cantidad de aire tiene que ser tomada en cuenta en establecimiento de los parámetros de riego cuales deberían considerar el tiempo de riego en sentido de la manera de aporte de agua. Por ejemplo, en el sistema de riego localizado tipo goteo, parte del suelo alrededor de goteo se encuentra en fase saturada, mientras la aplicación de agua. Debido a que, en general, este tipo de riego tiene frecuencia diaria, en los suelos con alta capacidad de retención de agua pueden surgir problemas con aireación del suelo. Efecto adverso ocurre después de riego, cuando el suelo comienza a secarse y en lugar del agua entra aire, aumentando la capacidad y flujo del aire (Dietrich et al., 2005).

Profundidad del suelo

En el año 1997, Forsythe mencionó que la profundidad del suelo como uno de los principales atributos físicos para determinar su capacidad de uso y calidad física,

ya que se relaciona con funciones del suelo como capacidad de retención del suelo y su capacidad para la entrega de agua y nutrientes, que finalmente aporta al crecimiento vegetal. Profundidad del suelo fue también investigada por Dec et al. (2014), quienes la indican como uno de los parámetros que determinan la capacidad del suelo para almacenar aire y agua, relacionada con su porosidad, que varía dentro del perfil. Tomándolo en cuenta y para lograr el uso eficiente del agua, la CRA debe ser determinada para cada horizonte del suelo, considerando además su profundidad efectiva. Relevancia de esto se observa en la Figura 8b, donde se observa que para un tratamiento del suelo (pradera naturalizada), se presencia diferencias entre las profundidades para todos tipos de poros. La porosidad total disminuye en orden: 15 > 30 > 5 cm, la CDC logra máximo valor para 30 cm, seguido por 15 y 5 cm y el PMP 30 cm > 5 y 15 cm. Esta variabilidad influye las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo cobrando la importancia en el momento de establecer la lámina de agua, cual expresada como altura (cm) (Sandoval et al., 2012), debería considerar la profundidad y propiedades de cada horizonte del suelo, para finalmente obtenerla para el perfil/profundidad de interés. Detalles de determinación de la profundidad efectiva del suelo se encuentran en Carrasco et al., (2017).



Variabilidad temporal y espacial de las propiedades del suelo

Un suelo bien estructurado ofrece una mayor conexión entre poros lo que permite un mejor transporte de agua, aire y calor. (Dec, 2006; Bormann y Klaassen, 2008; Dec et al., 2009). Estas propiedades dependientes de la estructura son dinámicas, presentando gran variabilidad en el tiempo y espacio. Esto debido a que son expuestas a fenómenos naturales como ciclos de mojado y secado (M-S) (Peng et al., 2007), descongelación y congelación (Bormann y Klaassen, 2008), actividades humanas como en la gestión de la labranza diferentes prácticas (Strudley et al., 2008, Horn y Fleige, 2009), eventos de pastoreo (Peth y Horn, 2006; Krummelbein et al., 2009), actividad biológica (Fazekas, 2005), planta cobertura y topografía (Zhao et al., 2007), que puede ser modificado localmente por procesos de erosión y deposición. La intensidad de estos factores, condiciones edafoclimáticas de lugar

Como resultado de los ciclos de M-S, el suelo se contrae y se hincha constantemente, mejora su estructura aumentando la resistencia a la tracción de los enlaces entre las partículas del suelo que conducen a la formación de agregados estables al agua y nuevos poros a través de formación de grietas (Horn y Baumgartl, 2002). A esto hay que sumar los factores mencionados previamente, cuales tienen distinta intensidad y así también las interacciones entre ellos. Lo mencionado produce que la estructura de suelo y con ella todas sus propiedades sufra constantes cambios, cada año más intenso, debido a carácter de agricultura del siglo XXI.

La variabilidad espacial de los parámetros hidráulicos del suelo

El conocimiento sobre la dinámica y variabilidad de los parámetros hidráulicos del suelo es importante en cada etapa de del desarrollo del cultivo, ya que influye las relaciones hídricas entre el suelo- agua-planta (Molden et al., 2010). Su consideración toma mayor relevancia si consideramos que a estos cambios se suma la variabilidad de los requerimientos de agua por los cultivos durante su desarrollo. Por ejemplo, Mingeau et al (2001) menciona que en periodo de maduración de la fruta el arándano utiliza casi el 55% del total de los requerimientos hídricos estacionales, que indica que consideración de estos dos

elementos la programación del riego puede ser crucial para la disponibilidad de agua para las raíces (Dec et al., 2014), que depende de varios factores, entre cuales tenemos agua disponible para las plantas y la conductividad hidráulica saturada. La evaluación de esta fue el objetivo de estudio de Dec et al. 2014, quienes en suelo Andisol bajo cultivo de arándanos determinaron p.ej. variaciones entre 4 y 16% para los macroporos llenos con agua (capacidad de aire), entre 1 y 3 log cm d⁻¹ para la conductividad hidráulica saturada (Ks) y rango entre 20 y 50% para el ADP (Figura 11 a-c). Por lo tanto, se observa que, las zonas con mayor cantidad de agua disponible para las plantas se relacionaron con zonas con mayor contenido de agua en condiciones de saturación y campo. El volumen de macroporos (CA) y su continuidad (Ks) depende de la estructura del suelo (Horn y Smucker, 2005), por lo cual esperaba que Ks presentara una alta variabilidad especialmente si consideramos que el volumen de macroporos cambia durante los ciclos de humectación y secado como consecuencia de la formación de grietas (Dörner et al., 2011). Esto último afecta la distribución del agua en la zona de las raíces, un factor importante en el diseño y manejo de sistemas de riego eficientes (Dec et al., 2014). La correcta determinación de Ks se vuelve significativa especialmente en el riego por goteo, ya que este aporta una pequeña cantidad de agua, pero con alta frecuencia.

Tomando en cuenta los efectos de cambio climático y conjunto con este aumento de presión sobre los recursos naturales, obliga cada vez más fuerte al diseño de los sistemas de riego eficientes que exhiban un uso sostenible del agua. Estos necesitan la consideración de varios elementos que van desde la formación del suelo, a través de su uso, cultivo de interés, clima y su variabilidad en tiempo y espacio. La importancia de esto se refleja en hecho que ambas condiciones de estrés hídrico: su falta y exceso tienen impactos positivos o negativos en el rendimiento. En este sentido, una de las primeras investigaciones sobre el uso eficiente de los recursos hídricos en ecosistemas prateros del sur de Chile se desarrolla en el marco del proyecto FONDECYT 1181515 "Irrigation of pasture system on volcanic ash soils in southern Chile: effect on pasture productivity, water use efficiency and soil structure dynamics", donde los primeros resultados demuestran que al aplicar riego deficitario (déficit de 25%) no se observó diferencias significativas entre praderas regadas con la lámina completa (con criterio de riego de 50%).

Un ejemplo de variabilidad del suelo presenta Figura 12.

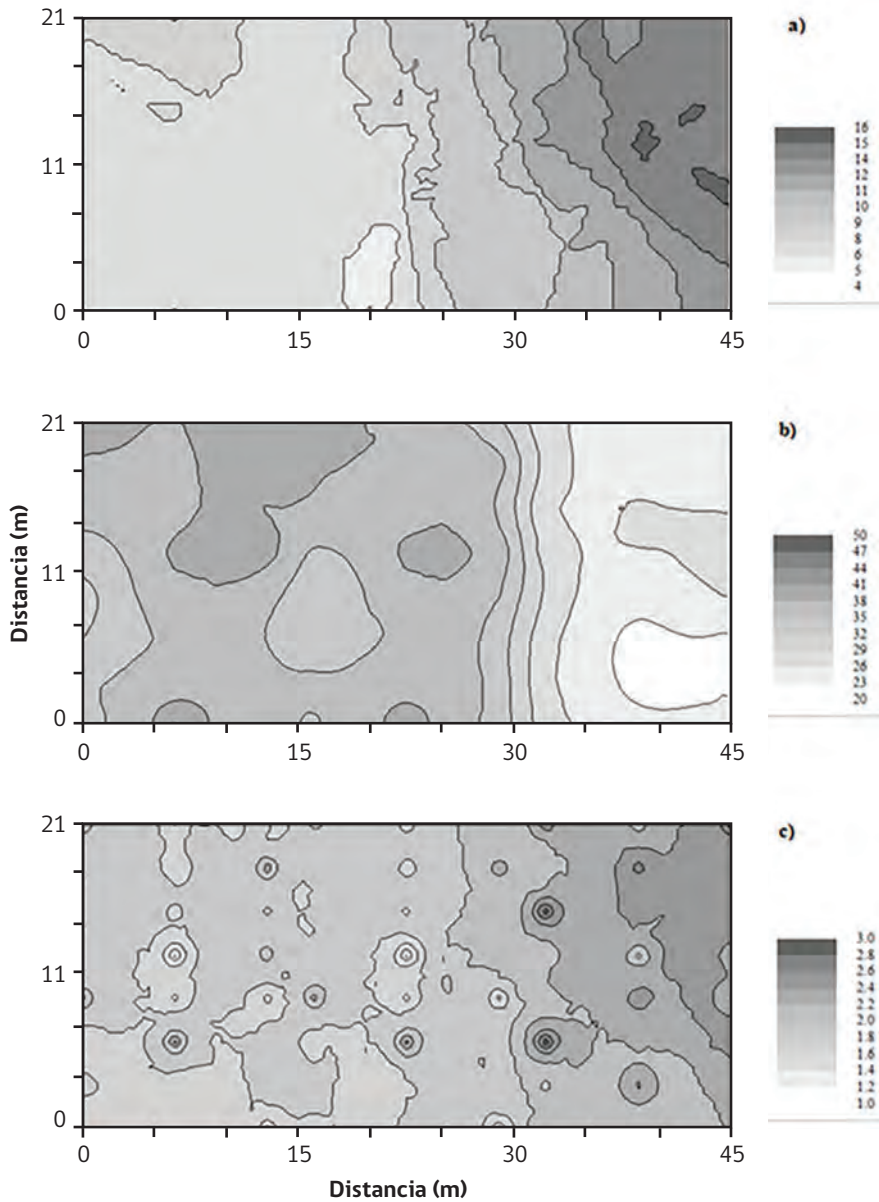


Figura 11. Variabilidad espacial de: (a) macroporos llenos de agua (o Capacidad de Aire) en suelo no-saturado [Vol. %], (b) Agua Disponible para las Plantas [Vol. %] y (c) conductividad hidráulica saturada [$\log \text{ cm d}^{-1}$] (Dec and Dörner, 2014).



Figura 12. Variabilidad del suelo. Condiciones hídricas en superficie y dentro del perfil del suelo: a,a1) suelo Ñadi; b,b1) Andisol, serie Valdivia.

Bibliografía

Boman, B., Parsons, L., Obreza, T., Stover, Ed. 2021. Chapter 17. Citrus Water Use and Irrigation Scheduling.

Bormann, H., Klaassen, K., 2008. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two German soils. *Geoderma* 145, 295–302.

Bronick, C. y R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3–22.

Carrasco, M., Dec, D., Valle, S.R, Zúñiga, F., Dörner, J. 2017. Historial de uso de un suelo Ñadi: consecuencias sobre la capacidad efectiva de almacenamiento de agua/aire y la continuidad del medio poroso. *Agro Sur* 45(1): 39–51.

Dec, D. 2006. Thermal properties in Luvisols under conventional and conservation tillage treatment. 120 p. Thesis Dissertation, University Christian Albrechts, Kiel, Germany.

- Dec, D., Dörner, J., Horn, R. 2009. Effect of soil management on soil thermal properties. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9(1): 26-39.
- Dec, D., Dörner, J., Balocchi, O., Lopez, I. 2012. Temporal dynamics of hydraulic and mechanical properties of an Andosol under grazing. *Soil & Tillage Research* 125: 44-51.
- Dec, D., Dörner, J. 2014. Spatial variability of the hydraulic properties of a drip irrigated Andisol under blueberries. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 14 (3): 589-601.
- Dietrich, P., Helmig, R., Sauter, M., Hötzl, H., Köngeter, J., Teutsch, G., 2005. *Flow and Transport in Fractured Porous Media*. Springer, New York.
- Dörner, J., Horn, R. 2006. Anisotropy of pore functions in structured stagnic luvisols in the weichselian moraine region in Northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(2): 213-220.
- Dörner, J. y Dec, D. 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7(2): 1-13.
- Dörner, J., Horn, R. 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 102: 225-232.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., Horn, R. 2011. Effect of the land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil & Tillage Research* 115-116: 71-79.
- Dörner, J., Zúñiga, F., López, I. 2013. Short-term effects of different pasture improvement treatments on the physical quality of an Andisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(2): 381-399
- Fazekas, O. 2005. *Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulch" saat*. 170 p. Thesis Dissertation. University Christian Albrechts, Kiel, Germany.
- Fleige, H, Beck-Broichsitter, S, Dörner, J, Goebel, M.-O, Bachmann, J, & Horn, R. 2016. Land use and soil development in southern Chile: Effects on physical properties. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(3), 818-831. Epub 00 de julio de 2016. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000058>
- Forsythe, W. 1997. Las condiciones físicas, la producción agrícola y la calidad del suelo. *Agronomía Costarricense* 21:35-47.

- Gebhardt, S., H. Fleige, and R. Horn. 2009. Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172:601–614. German Federal Soil Protection Law. 1998.
- Hartge, K.H., Horn, R. 1992. *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 177 p.
- Hartge, K. H.; Horn, R. 1999. *Einführung in die Bodenphysik*. Enke, Stuttgart, 304 p.
- Hartge, K. H. 2000. The effect of soil deformation on physical soil properties. A discourse on the common background. P. 32–43. In R. Horn et al. (ed) *Subsoil compaction–distribution, processes and consequences*. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany.
- Hartge, H., and R. Horn. 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung*. 178 p. 4. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.
- Hartge, K. H., & Horn, R. 2016. *Essential soil physics*. Stuttgart: Schweizerbart Publishers.
- Hillel, D. 1990. *Introduction to Environmental Soil Physics*. 511p.
- Horn, R., and T. Baumgartl. 2002. Dynamic properties of soils. In Warrick, A.W. (ed.) *Soil physics companion*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Horn, R., and Smucker, A. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82:5–14.
- Horn, R., Fleige, H., 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Till. Res.* 102, 201–208.
- Iversen, B. V., Moldrup, P., Schjønning, P., & Loll, P. 2001. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Science*, 166(10), 643–659.
- Krümmelbein, J., Peth, S., Zhao, Y. and Horn, R. 2009. Grazing-induced alterations of soil hydraulic properties and functions in Inner Mongolia, PR China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172:769– 776.
- Mingeau, M., Perrier, C., Améglio, T. 2001. Evidence of drought sensitive periods from 21 flowering to maturity on highbush blueberry. *Scientia Hort.* 89; 23–40.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., Kijne, J. 2010. 23 Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water 24 Management*. 97; 528–535.

Mordhorst, A., Zimmermann, I., Peth, S., Horn, R. 2012. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem, *Soil and Tillage Research*, Volume 125. Pages 3–13, ISSN 0167–1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.008>.

Pagenkemper, S.K., Uteau Puschmann, D., Peth, S., Horn, R. 2014. Investigation of Time Dependent Development of Soil Structure and Formation of Macropore Networks as Affected by Various Precrop Species, *International Soil and Water Conservation Research*, Volume 2, Issue 2. Pages 51–66, ISSN 2095–6339, [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30006-X](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30006-X).

Peng, X., Horn, R. 2007. Anisotropic shrinkage and swelling of some organic and inorganic soils. *European Journal of Soil Science*, 58 (1) (2007), pp. 98–107

Peth, S., and R. Horn. 2006. 11 Consequences of grazing on soil physical and mechanical properties in forest and tundra environments. *Ecological studies* Vol. 184. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

Reszkowska, A., Krümmelbein, J., Zhao, Y., Peth, S., Horn, R., Gan, L., 2011. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant Soil* 340, 59–72.

Reynolds, W.D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., Yang, X. M. 2009. Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152 (3–2 4); 252–263.

Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., Rivera, D. 2012. métodos de análisis físico de suelos. Sociedad chilena de la ciencia del suelo. <http://www.trapananda.uach.cl/proyectos/desarrollo/lib/exe/fetch.php?media=proyectos:metodos_analisis_fisico_suelos.pdf>

Seguel, O., and Horn, R. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregatebeds due to wetting–drying cycles. *Journal of soil science and plant nutrition*. 169(2): 221–232

Strudley, M. W., Green, T.R., Ascough, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science, *Soil and Tillage Research*, Volume 99, Issue 1, Pages 4–48, ISSN 0167–1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>.

Zúñiga, F., Ivelic-Sáez, J., López, I., Huygens, D., Dörner, J., 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil Till. Res.* 145, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.014>. ISSN 0167–1987.