



CAPÍTULO 2

Propiedades Físico-Hídricas del Suelo en el Cultivo del Maíz Grano

Alejandro Antúnez B.
Ing. Agrónomo, Ph.D
aantunezb@inia.cl
INIA La Platina

Sofía Felmer E.
Ing. Agrónomo

Marcelo Vidal S.
Ing. Agrónomo

Roberto Morales J.
Ing. Ejecución Agrícola
INIA Rayentué

Enrique Coz L.
Ing. Agrónomo

Francisca Fuentes F.
Ing. Agrónomo, M.B.A.

2.1 Introducción

El deterioro de las propiedades físicas del suelo es uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura moderna. El uso excesivo de maquinaria agrícola, la agricultura intensiva, rotación de cultivos cortos, pastoreo intensivo y la gestión inadecuada del suelo, conducen a una mala calidad física del mismo, generando la compactación y pérdida de estructura. La compactación del suelo se produce en una amplia variedad de suelos y climas. Se ve agravada por un bajo contenido de materia orgánica y por la labranza o pastoreo en un suelo con alto contenido de humedad. La compactación del suelo aumenta la resistencia mecánica y disminuye la fertilidad física a través de la disminución de almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, lo cual acarrea a requerimientos de fertilizante adicional y al aumento de los costos de producción.

Entre las principales propiedades físicas del suelo que influyen en el crecimiento de raíces se encuentran: el medio poroso, la capacidad de aire, la densidad aparente y real de las partículas del suelo, además de indicadores de compactación como resistencia a la penetración e índice de cono.

Por otra parte, factores como la textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y humedad aprovechable, se relacionan con la retención de agua en el suelo y su disponibilidad para las raíces de las plantas.

El suelo ideal para el cultivo de maíz debe ser con más de un metro de profundidad, buen drenaje, sin piedras, pH entre 6,0 y 7,0, nivelado y con adecuados contenidos de materia orgánica (sobre 3%).

El maíz también se adapta a suelos de 50 cm de profundidad efectiva, drenaje con algún grado de imperfección y algo de pedregosidad, pero su potencial de rendimiento se ve limitado.

Suelos muy pesados, por su condiciones de difícil laboreo y alta retención de humedad resultan inconvenientes para el cultivo del maíz, al igual que suelos arenosos por su tendencia a secarse rápidamente.

2.2 Efecto de las propiedades físicas del suelo en el cultivo del maíz

Textura

El término textura es una expresión de la predominancia del tamaño o rango de tamaños de las partículas del suelo, y tiene una connotación cualitativa y cuantitativa. El método típico de caracterización consiste en separarlos en tres grupos (arenas, limos y arcillas), los cuales en este estudio están definidos en su tamaño por el USDA en la Figura 5.



Fuente: (Brissio, 2005).

Figura 5. Escalas granulométricas, Internacional y USDA.

Factores como la facilidad de laboreo del suelo, la cantidad de agua y aire que puede retener, la porosidad y la velocidad de infiltración del agua están, ligadas a la textura del suelo (FAO, 2009). Un suelo con predominio de arena, posee poros de mayor tamaño y menor capacidad de retener agua, lo cual determina baja retención de humedad y permeabilidad excesiva, poca cohesión y plasticidad, además de limitadas reservas de nutrientes. En cambio, si predomina la arcilla, el suelo retiene más humedad, es poco permeable, plástico en húmedo y difícil de laborear. Por último, los suelos de mejor aptitud agrícola poseen texturas medias (francas), contienen un 10 a 20% de arcilla, no más de 50% de arena ni más de un 50% de limo.

2.2.2 Densidad real (Dr) y densidad aparente (DA)

Los suelos minerales poseen una densidad real (Dr) de 2,65 g cm⁻³, correspondiendo este valor a la densidad promedio de las distintas partículas presentes en un suelo. La arena gruesa presenta una Dr de 2,655 g cm⁻³, la arena fina 2,659 g cm⁻³, el limo 2,798 g cm⁻³ y la arcilla 2,837g cm⁻³. Los minerales pesados (óxidos de Fe o minerales ferro magnésicos), presentes en las partículas de suelo, generan que la Dr sea mayor, mientras que un suelo con altos contenidos de materia orgánica posee una Dr menor. La densidad aparente (Da) en cambio, representa un índice de la masa seca de partículas en un volumen total de suelo, que incluye partículas y poros. La densidad aparente es un valor que varía con la textura. Valores de Da para suelos no compactados son: en suelos arenosos de 1,65 g cm⁻³; para suelos franco arenoso, 1,5 g cm⁻³; suelos de textura Franca, 1,4 g cm⁻³; Franco Arcilloso, 1,33 g cm⁻³; Arcillo Arenoso, 1,3 g cm⁻³ y los suelos Arcillosos, 1,25 g cm⁻³. La Da es un parámetro importante a considerar en la clasificación de calidad de un suelo. Suelos con valores altos de Da determinan un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, debido a la poca aireación y una baja infiltración del agua en el suelo (FAO, 2009). Muy relacionado con la Da se encuentra el espacio poroso del suelo (P), que aloja aire o agua. El espacio poroso se desarrolla a partir de la formación del suelo, grietas, cavidades de animales o lombrices y representan los espacios por donde las raíces crecen y absorben agua (FAO, 2009). La porosidad se obtiene a partir de la relación entre la Da y la Dr. La porosidad es un índice del volumen relativo de poros en un suelo y generalmente se presenta en un rango entre 0,3 y 0,6. En un estudio realizado en Estados Unidos se demostró que la densidad aparente de un suelo afecta en gran medida la densidad de raíces de los cultivos. Mientras mayor fue la densidad aparente del suelo, se obtuvo un menor desarrollo de raíces (Unger *et al.*, 1994). El largo de raíces y el rendimiento del maíz se ven afectados por el nivel de compactación del suelo. En un estudio en Pakistán en un suelo franco arcilloso, se demostró que los sitios donde la Da

fue mayor ($1,70 \text{ g cm}^{-3}$), se obtuvo la menor longitud de raíces y bajo rendimiento por unidad de superficie (Ramazan *et al.*, 2007). Estudios realizados en Alabama, en un suelo franco arenoso en donde se analizó el efecto de tres densidades aparentes ($1,2$, $1,4$ y $1,6 \text{ gr cm}^{-3}$) sobre el crecimiento de raíces de maíz, se encontró fuerte relación entre la densidad aparente del suelo y el largo de raíces, lo cual está estrechamente ligado a la densidad de raíces. De esta forma, queda establecido que una densidad aparente alta ($1,6 \text{ gr cm}^{-3}$) afecta negativamente a la densidad de raíces en maíz (Duruoha, 2007).

Retención de agua

La Capacidad de Campo (CDC) queda representada por la cantidad de agua que un suelo saturado es capaz de retener luego de haber sido drenado por 24 a 48 horas y que en la matriz del suelo queda retenida a una tensión de $1/3$ de atmósfera. El Punto de Marchitez Permanente (PMP), es la cantidad de agua que posee un suelo donde las plantas se marchitan permanentemente, sin poder recuperarse, aun habiendo un riego. El agua está retenida a una tensión de 15 atmósferas, muy superior a la tensión que podría generar la raíz de una planta para extraerla. La humedad aprovechable (HA), puede ser definida como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Kirkham, 2005). La HA de un suelo representa entonces todo el contenido de agua que se encuentra en el suelo entre CDC y PMP.

Capacidad de Aire

La capacidad de aire (CA), está determinada por la densidad aparente del suelo y el nivel de retención de agua a CDC. Suelos con compactaciones elevadas no presentan suficiente espacio poroso, ya sea para almacenar agua o aire. Como el suelo en su composición posee poros, los que pueden estar llenos de agua o de aire, el equilibrio entre estos dos elementos afecta

significativamente a la capacidad de aire de un suelo. Para el buen desarrollo de cualquier cultivo, el suelo debe presentar como mínimo un 11% de sus poros con aire. Dexter (1988), plantea como rango límite, entre un 10% a 15% de macroporos para permitir una adecuada respiración e intercambio de oxígeno y dióxido de carbono del suelo con la atmósfera. La presencia de aire en los poros del suelo, ayuda al correcto metabolismo radical (Archer *et al.*, 1971). En el estudio de Gaultney (1981), sobre el efecto de la compactación en el rendimiento del cultivo de maíz, éste menciona que la compactación de los suelos puede reducir el rendimiento del cultivo en un 25%.

Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración representa la fuerza requerida para introducir la punta cónica de un penetrómetro a través del suelo, expresado en Megapascuales (MPa). Un registro común de esta propiedad es el índice de fuerza del suelo llamado índice de cono (IC). La compactación de suelo puede reducir los rendimientos de los cultivos en un 10%. El penetrómetro simula el esfuerzo de la raíz de una planta por elongarse en el perfil de suelo. La penetración de las raíces en un suelo se reduce linealmente con el aumento de la resistencia a la penetración, hasta que se llega a una resistencia de 2,07 MPa (300 psi), donde casi ninguna raíz puede penetrar. Esto es igual para suelos húmedos y secos, independiente de la textura del suelo. La falta de labranza de los suelos, afecta en gran medida a la resistencia a la penetración de los suelos (Duiker, 2013). En la mayor parte de las especies cultivadas, el crecimiento de raíces se verá afectado mientras la resistencia a la penetración sea mayor a 1,4 MPa. El penetrómetro de punta cónica es recomendado para proporcionar un método estandarizado de caracterización de la resistencia a la penetración de los suelos (Riedell *et al.*, 2004).



Foto 1. Penetrómetro utilizado para determinar de la resistencia a la penetración vertical.

En el Cuadro 8, se presenta valores interpretativos de resistencia a la penetración medido en condiciones de capacidad de campo.

Cuadro 8. Categorización de la resistencia a la penetración.

Categoría de Resistencia	Resistencia (Mpa)
Extremadamente Baja	< 0,01
Muy baja	0,01 - 0,1
Baja	0,1 - 1
Moderada	1 - 2
Alta	2 - 4
Muy alta	4 - 8
Extremadamente alta	> 8

Con respecto a la resistencia a la penetración horizontal (RPH), la literatura especializada indica que la RPH disminuye a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo, lo cual ha sido reportado tanto en condiciones de laboratorio como en condiciones de campo (Shafiq *et al.*, 1994).

2.3 Caracterización de propiedades Físico-Hídricas del suelo y crecimiento de raíces en maíz cultivado bajo riego por surcos en la Región de O'Higgins

Se caracterizaron las propiedades físico-hídricas del suelo cultivado con maíz grano, evaluando en paralelo la distribución de raíces en el perfil en siete predios ubicados en: Santa Julia, Graneros; El Carmen, San Fernando; San José de Pataguas, San Vicente de Tagua-Tagua; La Gloria, Nancagua; Las Arañas, Chépica; Santa Amelia, Pichidegua y Rincón de Yáquil, Santa Cruz de la Región de O'Higgins.

En la Figura 6 se presenta la ubicación de los siete predios estudiados en el mapa de la Región de O'Higgins.



Figura 6. Mapa de la Región de O'Higgins con los siete sitios estudiados.

En cada predio se realizó tres calicatas, excavadas en suelo a CDC, situadas sobre la hilera de siembra, dejando la planta de maíz en el centro de la calicata.

En cada calicata se evaluó:

- Densidad aparente y contenido gravimétrico de agua en el suelo.
- Densidad real.
- Humedad aprovechable del suelo.
- Resistencia a la penetración.
- Textura de suelo.
- Densidad de raíces.
- Rendimiento.

En el Cuadro 9 se presenta los porcentajes arena, limo y arcilla de los siete predios bajo estudio.

Cuadro 9. Clase textural y porcentajes de arcilla, limo y arena de siete predios de la Región de O'Higgins.

Localidad	Prof. (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Rango de clase textural
Santa Julia	0-20	34,47	51,33	14,2	Franco Arcillo limoso
	21-40	25,23	34,47	40,3	Arenoso a Franco Arcillo limoso
	41-60	34,03	46,67	19,3	Franco Arcilloso a Arcillo Limoso
S. José de Pataguas	0-20	51,1	40,65	8,25	Arcillo Limoso
	21-40	58,65	33,15	8,2	Arcilloso a Arcillo limoso
	41-60	69,65	26,2	4,15	Arcilloso
Santa Amelia	0-20	15,63	18,13	66,23	Franco Arenoso
	21-40	12,4	10,5	77,1	Franco Arenoso
	41-60	13,87	18,47	67,67	Franco Arenoso
El Carmen	0-20	11,43	38,97	49,6	Franco Limoso a Franco Arenoso
	21-40	11,43	41,57	47	Franco a Franco Arenoso
	41-60	11,97	40,53	47,5	Franco
La Gloria	0-20	34,3	52,03	13,67	Franco Arcillo Limoso
	21-40	38,37	50	29,03	Franco Arcillo Limoso a Arcillo Limoso
	41-60	29,95	58,95	11,1	Franco Arcillo Limoso a Limoso
Las Arañas	0-20	36,37	44,77	18,87	Franco Arcilloso a Franco Arcillo Limoso
	21-40	37,03	43,53	19,43	Franco Arcilloso a Franco Arcillo Limoso
	41-60	36,7	42,37	20,93	Franco Arcilloso a Franco Arcillo Limoso
Rincón de Yáquil	0-20	30,6	50,77	18,63	Franco Arcillo Limoso a Franco Arcilloso
	21-40	50	36,7	13,3	Arcilloso
	41-60	50,2	34,77	15,03	Arcilloso

El predio San José de Pataguas, presentó los porcentajes más elevados de arcilla y los más bajos de arena, mientras que el predio Santa Amelia presentó los valores más elevados de arena y los más bajos de arcilla. Las clases texturales se mantuvieron en rangos semejantes en las distintas profundidades. En los casos San

José de Pataguas y Santa Amelia, se evidenció la predominancia de arcilla y arena respectivamente, lo cual llevó a que su rango de clase textural fuese más acotado. El predio Santa Amelia, presentó proporciones de los tres separados en rangos muy parecidos en las tres profundidades estudiadas, lo cual permitió clasificar todo el perfil en la textura Franco arenoso. Los predios Santa Amelia y El Carmen presentaron clases texturales muy similares, en un rango entre Franco y Franco Arenoso, con los valores de CDC y PMP más bajos.

2.4 Densidad de raíces y rendimiento de los predios bajo estudio

En el Cuadro 10 se presenta la densidad de raíces (Rai), a tres profundidades en siete predios diferentes con el rendimiento promedio del sitio.

Cuadro 10. Densidad de raíces (Rai) y rendimiento a tres profundidades en siete predios cultivados con maíz grano en la Región de O'Higgins.

Localidad	Prof. (cm)	Rai. (mg cm ⁻³)	% Raíces	Rendimiento (g/pl)
Santa Julia	0-20	1,45	65,32	118,66
	21-40	0,66	29,73	
	41-60	0,11	4,95	
San José de Pataguas	0-20	2,39	73,54	176,32
	21-40	0,7	21,54	
	41-60	0,16	4,92	
Santa Amelia	0-20	1,11	88,8	120,08
	21-40	0,12	9,6	
	41-60	0,02	1,6	
El Carmen	0-20	0,72	57,14	143,03
	21-40	0,34	26,98	
	41-60	0,2	15,87	
La Gloria	0-20	0,58	68,24	111,72
	21-40	0,19	22,35	
	41-60	0,08	9,41	
Las Arañas	0-20	1,5	76,14	149,87
	21-40	0,39	19,8	
	41-60	0,08	4,06	
Rincón de Yáquil	0-20	1,53	81,82	126,22
	21-40	0,22	11,76	
	41-60	0,12	6,42	

Densidad raíces, n= 9 (3 cilindros por calcata, 3 calcatas por predio)

Rendimiento, n=30 (10 mazorcas por calcata, 3 calcatas por predio)

En el Cuadro 10, se puede apreciar la importancia de los primeros 20 cm de suelo, pues esta porción del suelo alojó a más del 50% de las raíces, incluso llegando a alojar al 88%, como es el caso del sitio Santa Amelia. El sitio El Carmen es el que presentó la distribución de raíces más equitativa, llegando a tener un 15,8% de sus raíces a 60 cm de la superficie. En cambio en el predio Santa Amelia, claramente se concentraron sus raíces en superficie, y a 60 cm sólo alojó el 1,6% de estas.

La mayor densidad de raíces coincide con el mayor rendimiento de maíz, para la profundidad 0-20 cm. De igual manera, la menor densidad de raíces coincidió con el rendimiento más bajo. Fue significativa la importancia de la densidad de raíces en la estrata superficial del suelo, porque en esta zona se presentó la mayor densidad que en profundidad.

2.5 Porosidad total y capacidad de aire

En el Cuadro 11 se presenta la Porosidad total (P), y la Capacidad de Aire (CA), de los siete predios a tres profundidades de suelo.

Cuadro 11. Porosidad y Capacidad de Aire a tres profundidades en siete predios cultivados con maíz grano en la Región de O'Higgins.

Localidad	Prof. (cm)	Rai. (mg cm ⁻³)	% Raíces	Rendimiento (g/pl)
Santa Julia	0-20	0,43	0,15	118,66
	21-40	0,39	0,06	
	41-60	0,39	0,02	
San José de Pataguas	0-20	0,59	0,15	176,32
	21-40	0,66	0,17	
	41-60	0,75	0,15	
Santa Amelia	0-20	0,38	0,14	120,08
	21-40	0,39	0,16	
	41-60	0,37	0,15	
El Carmen	0-20	0,48	0,17	143,03
	21-40	0,42	0,13	
	41-60	0,41	0,13	
La Gloria	0-20	0,39	0,12	111,72
	21-40	0,39	0,08	
	41-60	0,41	0,09	
Las Arañas	0-20	0,38	0,08	149,87
	21-40	0,36	0,04	
	41-60	0,39	0,07	
Rincón de Yáquil	0-20	0,43	0,05	126,22
	21-40	0,4	0,03	
	41-60	0,4	0,01	

Es conocido que la porosidad total (P), condiciona la capacidad de aire (CA), de un suelo. Al haber menos poros, se reduce la capacidad de un suelo de contener agua o aire. La P fue claramente mayor en el predio San José de Pataguas, en todas las profundidades estudiadas presentando además los valores más altos de CA. El resto de los predios mostraron menor relación entre estos dos factores, como fue el sitio Rincón de Yáquil, el que presentó una P similar a la de otros predios pero aún así, fue el que presentó los valores más bajos de CA.

En el Cuadro 12, se presenta la densidad aparente (Da), resistencia a la penetración horizontal (RPH) y el índice de cono (IC).

Cuadro 12. Densidad aparente, resistencia a la penetración horizontal y el índice de cono de siete predios de la Región de O'Higgins.

Localidad	Prof. (cm)	Da (g cm ⁻³)	RPH (MPa)	IC (MPa)
Santa Julia	0-20	1,45	1,46	
	21-40	1,53	1,84	3,49
	41-60	1,59	1,69	4,98
San José de Pataguas	0-20	0,97	0,73	
	21-40	0,78	1,12	3,65
	41-60	0,57	0,79	4,68
Santa Amelia	0-20	1,69	0,95	
	21-40	1,71	1,63	3,53
	41-60	1,7	2,1	3,93
El Carmen	0-20	1,35	0,49	
	21-40	1,52	2,83	4,03
	41-60	1,52	3,93	4,75
La Gloria	0-20	1,56	1,77	
	21-40	1,58	1,63	3,01
	41-60	1,57	1,4	3,91
Las Arañas	0-20	1,58	0,9	
	21-40	1,64	1,45	2,31
	41-60	1,57	1,09	3,61
Rincón de Yáquil	0-20	1,47	0,52	
	21-40	1,6	0,85	3,41
	41-60	1,62	1,52	4,77

Densidad aparente, n=9 (3 cilindros por calicata, 3 calicatas por predio)

Resistencia a la penetración horizontal, n=6 (2 repeticiones por calicata, 3 calicatas por predio)

Índice de Cono, n= 12 (4 repeticiones por calicata en 3 calicatas por predio)

Las Densidades aparentes (D_a) fueron relativamente altas en todos los predios, a excepción de San José de Pataguas, que presentó D_a bajo $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ en todo el perfil. El predio Santa Amelia tuvo los valores más altos de D_a , evidenciando un suelo con los más altos índices de compactación. Densidades aparentes elevadas como se presentan en seis de los siete sitios estudiados, causan problemas de compactación de suelo, los que repercuten en el rendimiento, disminuyéndolo. Como indica la literatura, la raíz no podrá penetrar un suelo con valores de Índice de cono (IC), cercanos a $5,3 \text{ MPa}$ (300 psi) y el sitio Santa Julia bajo los 40 cm de profundidad, presentó valores cercanos a este umbral, evidenciando serios niveles de compactación de suelo. Los problemas más serios de IC para todos los sitios se presentaron a 60 cm de profundidad, donde el valor fue más elevado. La Resistencia a la penetración horizontal (RPH) presenta más de la mitad de los sitios con los valores más elevados a la profundidad $21\text{-}40 \text{ cm}$, evidenciando una capa compactada con serios problemas de resistencia hacia el crecimiento de raíces (Pie de arado).



Foto 2. Determinación de la densidad aparente mediante el método del cilindro.



Foto 3. Determinación de la resistencia a la penetración horizontal.

2.6 Influencia de la densidad de raíces sobre el rendimiento del maíz.

En el Cuadro 13, se presenta la relación entre la densidad de raíces por profundidad con el rendimiento del maíz.

Cuadro 13. Coeficiente de correlación y regresión de la densidad de raíces (Rai) con el rendimiento.

Propiedad física	Profundidad (cm)	R	R ²
Rai	0-20	0,71	0,5
Rai	21-40	0,59	0,35
Rai	41-60	0,53	0,28

Se puede observar que una alta densidad de raíces se genera mayor rendimiento del cultivo, especialmente en el horizonte superficial (0-20 cm), correlación que disminuye en profundidad. Esto indica que las raíces de los primeros 20 centímetros son esenciales para el buen arraigamiento del cultivo, subrayando la importancia de una buena preparación de suelos en este horizonte previo a la siembra del maíz.

La Figura 10, presenta la relación entre el rendimiento del cultivo de maíz en los siete predios estudiados frente a la densidad de raíces. A mayor densidad de raíces, el cultivo de maíz alcanza un mayor rendimiento.

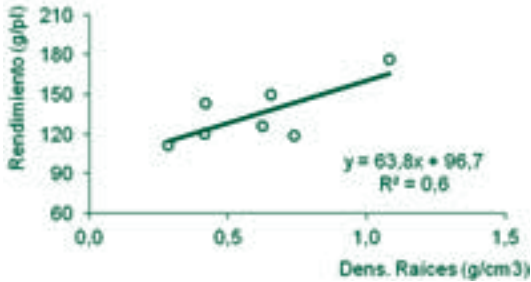


Figura 10. Relación entre densidad de raíces (g cm⁻³) y rendimiento por planta (g pl⁻¹), en siete suelos cultivados con maíz en la Región de O´ Higgins.

El Cuadro 14, presenta los coeficientes de correlación y regresión entre el rendimiento de los siete predios evaluados con distintas propiedades físicas del suelo.

Cuadro 14. Coeficiente de correlación y de regresión entre el rendimiento del sitio analizado (g/pl) y la densidad aparente, porosidad, capacidad de campo *in situ* humedad aprovechable *in situ* y % de arcilla.

Propiedad física	Prof. (cm)	R	R ²
Da	0-20	-0,78	0,61
	21-40	-0,79	0,62
	41-60	-0,83	0,69
P	0-20	0,77	0,59
	21-40	0,77	0,6
	41-60	0,81	0,65
CDC <i>in situ</i>	0-20	0,75	0,56
	21-40	0,67	0,44
	41-60	0,67	0,45
HA <i>in situ</i>	0-20	0,52	0,27
	21-40	0,85	0,72
	41-60	0,87	0,75
% Arcilla	0-20	0,47	0,22
	21-40	0,45	0,2
	41-60	0,58	0,33

La significancia de la relación entre rendimiento y D_a , aumentó a medida que aumenta la profundidad. Los mejores rendimientos se alcanzaron en sitios con menor D_a , aunque en los sitios estudiados los niveles de compactación del suelo fueron mayoritariamente altos. Una alta densidad aparente se relaciona con una menor cantidad de poros, menor infiltración del agua en el perfil y reducida capacidad de aire, lo cual tiene como consecuencia un menor desarrollo radicular.

Es importante señalar que la D_a medida en los siete predios se encontró en un rango similar a los reportados en Pakistán, donde se efectuó un ensayo en nueve sitios con diferentes niveles de compactación. En este estudio, el sitio con menor y mayor compactación, presentaron D_a equivalente a $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,71 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. La D_a en este estudio estuvo muy relacionada con la producción de grano en maíz, pues su aumento repercutió negativamente en el crecimiento de raíces, altura de planta y rendimiento (Ramazan *et al.*, 2007).

La relación entre la porosidad del suelo y el rendimiento aumentó a medida que el suelo se hace más profundo. Esto se explica porque una buena porosidad facilita el flujo de oxígeno hacia las raíces ubicadas en profundidad. Mientras mayor sea la porosidad del suelo, mayor será el rendimiento obtenido. En este estudio la mayoría de los sitios presentaron porosidades bajas en profundidad, y como consecuencia, los rendimientos fueron inferiores al potencial reportado.

La CDC *in situ* al igual que la D_a y P , tiene una correlación importante con respecto al rendimiento del cultivo. Esta relación va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad del suelo, pero siempre se mantiene con valores altos. En general, a mayor CDC *in situ*, se obtiene un mayor rendimiento de maíz grano.

Los valores de HA *in situ* muestran una buena correlación con el rendimiento, especialmente en profundidad ($R^2 = 0,75$, 41-60 cm de prof.). Este nuevo parámetro definido a partir de una medición de campo (CDC *in situ*) y complementado con laboratorio (PMP),

puede ser de gran utilidad en el manejo y programación de riego, aportando una mejor valoración de la retención de agua en el perfil de este.

La Figura 8 presenta la relación entre el rendimiento y la HA disturbada y el rendimiento y HA *in situ*.

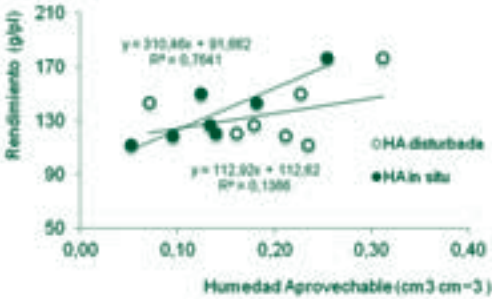


Figura 8. Relación entre la humedad aprovechable disturbada e *in situ* ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y rendimiento por planta (g pl^{-1}), en siete suelos cultivados con maíz en la Región de O´Higgins.

Como se aprecia en el gráfico, la HA *in situ*, presentó una mejor relación con el rendimiento que la HA disturbada. Esta mejor relación entre la HA *in situ* con el rendimiento, se explica porque la muestra de suelo utilizada presenta su estructura natural, con sus macro y micro poros sin disturbar, mientras que para HA disturbada estas propiedades se ven alteradas al ser calculada con la CDC obtenida en laboratorio con la muestra disturbada y tamizada. Otro factor que podría influir aun más, sería el poder obtener el límite inferior, PMP, en campo. Así la muestra presentaría en su totalidad las propiedades físicas y estructurales correspondientes a la realidad de lo que ocurre en campo.

El separado textural de mayor correlación con el rendimiento del cultivo es la arcilla, que presenta coeficientes de regresión mayores que el limo y arena, relación que persiste en profundidad.

Esta relación podría explicarse porque las arcillas contribuyen en la retención de agua en mayor proporción que los limos y arenas, resultando en un suelo con mayor disponibilidad de agua para el cultivo. Además, las arcillas junto con la materia orgánica, están relacionadas con la estructuración del suelo, e influyen en la capacidad de intercambio catiónico, propiedades de un suelo que tienen gran importancia en el rendimiento del cultivo.

2.7 Conclusiones

De este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se encontró que el rendimiento en cada sitio estudiado está muy relacionado con el desarrollo de raíces en el perfil, especialmente en los primeros 20 cm de suelo.
- Entre las propiedades físicas del suelo más relevantes para la producción del cultivo de maíz, están la Da del suelo, relacionada con la Porosidad, y la CDC *in situ* del suelo. Además, pero en menor grado, el rendimiento del cultivo del maíz se relacionó con el contenido de Arcilla del perfil de suelo.
- Por otro lado, las propiedades menos relevantes para la producción de maíz fueron la CDC y PMP disturbada, y su derivada la HA estimada. La CA, RPH, IC y los porcentajes de Limo y Arena.
- Todos, a excepción del predio San José de Pataguas, presentaron Da por sobre el rango adecuado, lo cual repercute en niveles de compactación que limitan el desarrollo de raíces y la producción del cultivo.
- La relación entre el rendimiento del cultivo y la HA es mejor cuando la muestra no ha sido disturbada y presenta todas sus propiedades naturales sin modificaciones.
- Estos resultados determinan que sea necesario diferenciar efectos sobre el manejo del riego y el manejo de la compactación.

Literatura Citada

Archer, J. y Smith, P. 1971. "The relation between Bulk Density, Available Water Capacity and Air Capacity of Soils". *Journal of Soil Science*. 1971. p. 475-480.

Dexter, A. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* 11: p. 199-238.

Duruoha, Ch.; Piffer, R. y Silva, P., 2007. "Corn (Zea mays) Root Length Density and Root Diameter as affected by Soil Compaction and Soil Water Content". *Irriga, Botucatu v. 12 n.1*, p. 14-26, janeiro-março, 2007.

Duiker, W. 2013. "Diagnosing Soil Compaction Using a Penetrometer (soil compaction tester)". *Penn State Extension, College of Agricultural Science*. USA: 2013.

FAO. 2009. "Guía para la descripción de los suelos." Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación, Roma, 2009. Cuarta Edición. Roma: 2009, p. 21-66.

Gaultney, L.; Krutz, G.; Steinhardt, G. y Liljedahl, J. 1981. "Effects of Subsoil Compaction on Corn Yields". *ASAE Paper No. 80-1011*.

Kirkham, M. 2005. "Field Capacity, Wilting point, Available Water and the Non-Limiting Water Range". In: *"Principles of Soil and Plant Water Relations"*. USA: Elsevier Academic Press, 2005.

Riedel, W.; Pikul J.; Osborne, S. y Schumacher, T. 2004. "Soil/Water Research". South Dakota University. "2004 Progress Report". USA: Agricultural Experiment Station, Plant Science Department, 2004.

Shafiq, M.; Hassan, A. y Ahmad, S. 1994. "Soil Physical properties as influenced by compaction under laboratory and field conditions". *"Soil & Tillage Research"*. Elsevier Science, USA, 1994, p. 13-22.

Unger, P. y Kaspar, T. 1994. "Soil Compaction and Root Growth: A Review". *"Agronomy Journal"*, vol. 86, september-october 1994. Usa, *Agron. J.* 86:759-766 (1994).