



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola

Obtención de mapas de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego.

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola mención
Recursos Hídricos

WALTER ANDRÉ VALDIVIA CEA
CHILLÁN - CHILE
2015

Profesor Guía: Dr. Eduardo Holzapfel Hoces
Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

**Obtención de mapas de suelo con fines de diseño y
manejo de sistemas de riego.**

por

WALTER ANDRÉ VALDIVIA CEA

Tesis presentada a la

ESCUELA DE GRADUADOS

DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Para optar al Grado de

MAGISTER EN INGENIERIA AGRICOLA

CON MENCION EN RECURSOS HIDRICOS

CHILLAN, CHILE

2015

Obtención de mapas de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego.

Aprobada por:

Eduardo Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Profesor Guía

Jorge Jara Ramírez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Evaluador Interno

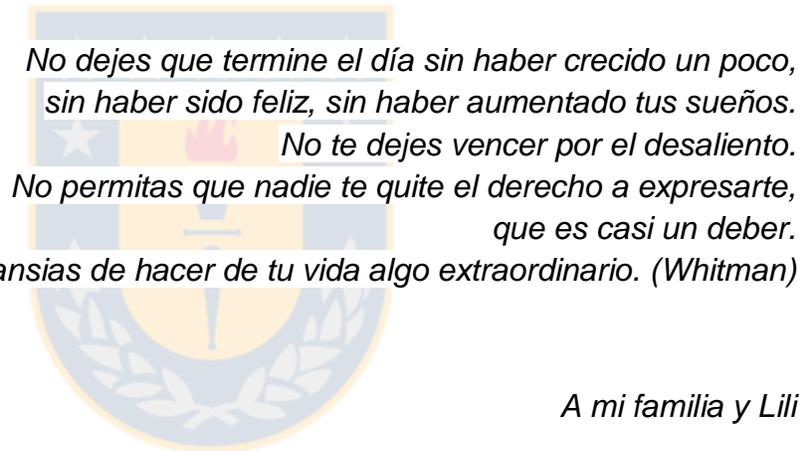
Diego Rivera Salazar
Ingeniero Civil, Doctor

Evaluador Interno

María E. González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Directora de Programa





*No dejes que termine el día sin haber crecido un poco,
sin haber sido feliz, sin haber aumentado tus sueños.*

No te dejes vencer por el desaliento.

*No permitas que nadie te quite el derecho a expresarte,
que es casi un deber.*

No abandones las ansias de hacer de tu vida algo extraordinario. (Whitman)

A mi familia y Lili

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos al profesor Dr. Eduardo Holzapfel H., por sus consejos y apoyo durante la realización de esta tesis. Sin dejar de lado su eterna paciencia, en las correcciones y espera de los avances.

Al Dr. Jorge Jara por sus acertados consejos en la corrección del escrito, y apoyo en todo el proceso del magíster.

Al Dr. Diego Rivera por el apoyo en el procesamiento de los datos y desarrollo de las figuras, y la confianza que ha depositado en mí en estos años en la Universidad.

A Carlos Cea y Felipe Racabal por su apoyo en terreno.

A mi familia por el incondicional apoyo en todo este proceso lejos de casa.

A Tamarita por estar siempre, y alentarme en los tiempos difíciles

A mis buenos amigos, los *Diablos*: Hernán, Julio, Pancho y Gabriel; y todos los compañeros del postgrado de Ingeniería Agrícola, con los que hemos pasado tiempos buenos y también difíciles.

A Alejandra, Clarita y Loreto, porque siempre hubo una sonrisa al llegar, y siempre tienen una solución a TODO.

Al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería FONDAP 15130015 por el financiamiento en el desarrollo del estudio.

A todos... INFINITAS GRACIAS...

INDICE

	Pág.
RESUMEN	
1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
5. CONCLUSIONES	48
6. BIBLIOGRAFÍA	50
7. ANEXOS	53



ÍNDICE DE TABLAS

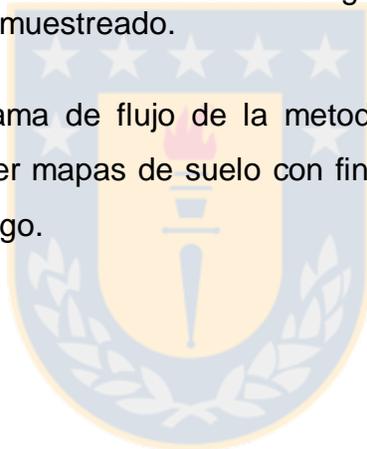
		Página
TABLA 1.	Número de calicatas, área y superficie de influencia por calicata en cada zona considerada homogénea.....	17
TABLA 2.	Estadística descriptiva para las propiedades hidrofísicas del suelo analizadas para los horizontes superficial, subsuperficial y en profundidad (n=31).....	25
TABLA 3.	Coefficientes asociados a las funciones de pedotransferencia original y calibradas.....	35
TABLA 4.	Bondad de ajuste del modelo original y su calibración para la predicción del contenido de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	36
TABLA 5.	Coefficientes asociados a las funciones de pedotransferencia propuestas.....	39
TABLA 6.	Bondad de ajuste del modelo propuesto para la predicción del contenido de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)...	39
TABLA 7.	Promedio, desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente (Da) y la humedad aprovechable (HA) del suelo obtenidos con el método <i>in situ</i> (MIS) y la clase de capacidad de uso (CCU).....	42
TABLA 8.	Comparación de costos de las tres metodologías descritas para 197 hectáreas.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio. Predio Los Abedules – Carsol Fruit S.A. Coihueco, Chile.	9
FIGURA 2.	Área de estudio en Predio Los Abedules – Carsol Fruit S.A. Coihueco, Chile.	15
FIGURA 3.	Puntos de muestreo con barreno y series de suelo presentes en el predio (MBU: Mebuca, GAL: Gallipavo, AYN: Arrayán, TQP: Talquipén, CYL: Chacayal) (a), y zonas identificadas como homogéneas y ubicación de las calicatas. (Los números 1 al 9 corresponden a la zona identificada en el Cuadro 2) (b)	16
FIGURA 4.	Clases de Capacidad de Uso obtenido con estudio agrológico según Soil Survey y SAG, y ubicación de las calicatas. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.	20
FIGURA 5.	Aptitud frutal obtenida con estudio agrológico según Soil Survey y SAG, y ubicación de las calicatas. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.	21
FIGURA 6.	Unidades cartográficas obtenido con estudio agrológico según Soil Survey y SAG y ubicación de calicatas. AYN-2: Arrayán fase 2; CYL-2: Chacayal fase 2; GAL-2: Gallipavo fase 2; MBU: Mebuca fase 2. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.	23
FIGURA 7.	Histograma de las variables densidad aparente (D_a), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) para las diferentes estratas.	26
FIGURA 8.	Proporción de arcilla, arena y limo, para las diferentes estratas en los diferentes puntos de muestreo	

	(columnas en blanco son las zonas donde no se pudo muestrear)	26
FIGURA 9.	Densidad aparente (Da) categorizada de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado	28
FIGURA 10.	Figura 10. Humedad aprovechable del suelo (HA) categorizada de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.	30
FIGURA 11.	Porcentaje de arcilla categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.	32
FIGURA 12.	Porcentaje de arena categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado	33
FIGURA 13.	Porcentaje de limo categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.	34
FIGURA 14.	Capacidad de retención de agua medida y estimada con el modelo "Características hídricas del suelo", $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje. a) Capacidad de campo (FC), y b) punto de marchitez permanente (WP).	35
FIGURA 15.	Capacidad de retención de agua a capacidad de campo (FC) medida y estimada con el modelo "Características hídricas del suelo", $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.	36
FIGURA 16.	Capacidad de retención de agua a punto de marchitez permanente (WP) medida y estimada con el modelo "Características hídricas del suelo", $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.	37

FIGURA 17.	Capacidad de retención de agua a capacidad de campo (FC) medida y estimada con el modelo propuesto, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.	40
FIGURA 18.	Capacidad de retención de agua a punto de marchitez permanente (WP) medida y estimada con el modelo propuesto, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje	41
FIGURA 19.	Clase de capacidad de uso y densidad aparente medida (Da) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la Da. N/S es no muestreado.	35
FIGURA 20.	Clase de capacidad de uso y humedad aprovechable medida (HA) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la HA. N/S es no muestreado.	44
FIGURA 21.	Diagrama de flujo de la metodología propuesta para obtener mapas de suelo con fines de diseño y manejo del riego.	47



RESUMEN

Uno de los problemas que se presentan al momento de diseñar y posteriormente manejar los sistemas de riego es su sectorización. Se necesita que el riego ocurra en unidades de suelo que sean espacialmente homogéneas, principalmente desde el punto de vista hidrofísico. Actualmente en Chile para determinar las unidades de suelo homogéneas, clasificación de capacidad de uso, aptitud frutal y como base para el diseño de los huertos frutales se utilizan estudios agrológicos sistemáticos empleando como guía el Soil Survey Manual y la Pauta para la Clasificación de Capacidad de Uso de Suelo de SAG. Sin embargo, estos estudios consideran ciertas características del suelo que son necesarias, pero no suficientes para caracterizarlos hidrofísicamente y, por lo tanto, para su sectorización. Se busca proponer una metodología que permita identificar objetivamente los suelos, en base a un análisis cuantitativo de los parámetros hidrofísicos necesarios para un adecuado diseño y manejo de sistemas de riego. Se recopiló información de terreno necesaria para evaluar los suelos del área de estudio mediante tres metodologías: 1) basado en el manual de SAG, 2) muestreo de las características hidrofísicas del suelo *in situ*; y 3) con la información recopilada se calibró un modelo de pedotransferencia para estimar algunas propiedades hidrofísicas del suelo. Se encontraron diferencias entre las metodologías en cuanto a la representación de las características hidrofísicas del suelo útiles en el diseño y manejo de sistemas de riego; también se encontraron altas diferencias entre los costos asociados. La metodología basada en SAG no es adecuada para mapeo de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego. Es posible calibrar modelos de pedotransferencia de los suelos derivados de cenizas volcánicas para estimar sus características hidrofísicas y así reducir los costos de laboratorio.

Palabras clave: mapa, suelo, pedotransferencia, características hidrofísicas, sistemas de riego.

ABSTRACT

One of the problems that arise when design and management of irrigation systems, is its sectorization. Irrigation must be done in soil units that are spatially homogeneous, mainly from the hydro-physical point of view. Currently in Chile to determine the homogeneity of soil units, use the actual soil capacity, fruit aptitude, and for the orchard designing agro-ecologic systematic studies are used, based on the guide of Soil Survey Manual and SAG's guideline for classification of soil use capacity. However, these studies consider certain soil characteristics that are necessary, but not enough for its hydro-physical parameters required for irrigation design and therefore its sectorization. We propose a methodology to objectively identify the soil, based on a quantitative analysis of the hydro-physical parameters that are necessary for an appropriate design and management of irrigation systems. The collected land information required to evaluate the soil of the studied area through three methodologies: 1) based on the SAG's manual, 2) sampling the *in situ* hydro-physical characteristics of the soil; and 3) with the collected information was calibrated a pedotransfer model to estimate some soil hydro-physical properties. Methodologies differences were found regarding the hydro-physical soil characteristics useful for design and management of irrigation systems; also high differences were found between the associated costs. SAG-based methodology is not suitable for land mapping pursuing the design and management of irrigation system purposes. It's possible to calibrate pedotransfer models of soils derived from volcanic ashes to estimate their hydro-physical characteristics and reduce laboratory costs.

Key words: map, soil, pedotransfer function, soil water characteristics, irrigation systems.

I. INTRODUCCIÓN

El éxito de la agricultura de riego se basa en gran parte en una buena planificación y manejo del agua, la cual debe considerar la elección y el diseño de métodos de riego bajo criterios de manejo y operación adecuados. Esto debe permitir que los requerimientos de agua del cultivo se apliquen en forma correcta, con frecuencias y tiempos de riego, acorde con el suelo, la planta y la disponibilidad de agua.

El buen uso del agua a nivel predial debe tener como fundamentos básicos el conocimiento de las condiciones de campo, entre las que podemos considerar las características de suelo, topografía, cultivo y disponibilidad de agua entre las más relevantes. Una de las condiciones de campo fundamentales a conocer es la variabilidad espacial del suelo. Iqbal *et al.* (2005) señalan que la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dependerá de su génesis, debido a factores de formación geológicos y pedológicos. Sin embargo, esta variabilidad también está influenciada por las prácticas de manejo como el laboreo, rotación de cultivo y manejo del riego.

En Chile, desde hace unos 50 años, existe una clasificación de suelos desarrollada por CIREN como resultado del Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID, en el cual se entrega un material esencialmente cambiante, como es el mapa interpretativo de las capacidades de uso, ligado a los antecedentes de suelo, geología y geomorfología, entre otras características. Estas descripciones de suelos detallan sus características más esenciales, entregando un perfil modal utilizado para clasificarlos, los cuales están constituidos por mapas de suelos, descripciones e informes de laboratorio en cuanto a sus características físicas y químicas, entre los más relevantes.

En general, esta clasificación se utiliza como base para la descripción de suelos con fines de futuros proyectos silvoagropecuarios y, sin lugar a duda, son útiles para tener una idea de los que se puede encontrar en terreno. Además, se han estandarizado los criterios para una mejor clasificación de capacidad de uso, categoría y aptitud frutal de los suelos (Casanova, 2010; SAG, 2001). Sin embargo, no hay un criterio establecido para diferenciar unidades de suelos homogéneas respecto a sus características hidrofísicas, que sirvan de base para el diseño y manejo de sistemas de riego.

Una de las problemáticas al momento de diseñar y, posteriormente, manejar los sistemas de riego es precisamente su sectorización, de tal forma que el riego

simultáneo ocurra en unidades de suelo que sean espacialmente homogéneas, principalmente desde el punto de vista hidrofísico. Actualmente, en el país se utilizan estudios agrológicos sistemáticos utilizando como guía el Soil Survey Manual (Soil Survey Division Staff, 1993) y la Pauta para la Clasificación de Capacidad de Uso de Suelo (SAG, 2001) para determinar las unidades de suelo homogéneas, clasificación de capacidad de uso, aptitud frutal y como base para el diseño de los huertos frutales. Sin embargo, estos estudios consideran características del suelo que no serían suficientes para caracterizar hidrofísicamente los suelos y permitir una adecuada sectorización.

Entre las características que consideran estos estudios de suelo está la profundidad, textura, pendiente, drenaje y pedregosidad. En general estos datos son determinados subjetivamente en base a un análisis cualitativo, donde es fundamental la pericia y experiencia del encargado del estudio. Otra práctica habitual es que una vez que ya se han establecido unidades de suelo homogéneas en base al estudio, se realiza una toma de muestra para ser analizada en el laboratorio. Generalmente, éstas son compuestas y no son representativas de la variable a analizar; es decir, se toman muestras del perfil completo y se mezclan, o bien se toma una baja cantidad de datos, y asume a priori la homogeneidad de las unidades de suelos descritas.

En base a los problemas metodológicos expuestos, se busca proponer una metodología que permita identificar objetivamente los suelos en base a un análisis cuantitativo de los parámetros hidrofísicos necesarios para un adecuado diseño y manejo de sistemas de riego. Esta información es fundamental para constituir la base de datos de un sistema de soporte de decisión que preste apoyo a los agricultores y profesionales, que permita medir y manejar la variabilidad desde un punto de vista espacial para así aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

El presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología que permita obtener mapas del suelo en función de variables hidrofísicas que impactan directamente en el diseño y manejo de sistemas de riego intrapredial.

1.1. Objetivos

El objetivo general es proponer una metodología que permita obtener un mapeo de suelos acorde a las necesidades de diseño y operación de sistemas de riego a nivel predial.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Evaluar, a través de un estudio de caso, tres metodologías de obtención de mapas de suelo para ser utilizados en el diseño y manejo de sistemas de riego a nivel predial.
2. Comparar el costo de las tres metodologías para obtener mapas de suelo con fines de diseño y manejo del riego.
3. Establecer los datos básicos requeridos para generar mapas de suelo que permitan un adecuado diseño y manejo de los sistemas de riego.



II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mapeo de suelo

Los mapas de suelo y separación de unidades espacialmente homogéneas se puede realizar mediante tres metodologías:

2.1.1. Clasificación de capacidad de uso (CIREN).

SAG (2001) desarrolló una pauta para la clasificación de la capacidad de uso del suelo que permite establecer unidades homogéneas. Utilizando esta metodología se pueden identificar los suelos que presentan características similares en su aptitud frutal y bajo su respuesta a un mismo tipo de manejo. Para esto se efectúa una agrupación de las series de suelo y sus variaciones, tomando como base los antecedentes entregados por el estudio agrológico del área. Los factores que se consideran para esta ordenación son fundamentalmente: textura, profundidad, drenaje, naturaleza del sustrato, topografía (SAG, 2001), lo que no necesariamente es información suficiente para considerar un correcto mapeo de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego.

La agrupación de suelos según su capacidad de uso es indicada por el número romano que va de I a VIII, donde estos valores tienen relación con crecientes limitaciones en su uso y manejo. El grupo I presenta aptitud para todos los cultivos y el grupo VIII posee una capacidad de uso restringida. Además, se puede obtener otras clasificaciones como la aptitud frutal, la cual define las limitaciones de los suelos estudiados, pero siempre está asociado con las características del frutal de interés, principalmente relacionado con la variedad y el portainjerto. Se clasifica desde 1 a 4, donde 1 es un suelo con una aptitud frutal sin limitación, mientras que 4 es un suelo con limitaciones severas.

En relación a lo anterior, las variables utilizadas en la confección de mapas con esta metodología, no entregan información para realizar un análisis de las características hidrofísicas del suelo; sin embargo, Saxton and Rawls (2006) indican que es posible obtener estimaciones adecuadas de las propiedades hidrofísicas del suelo, a partir de variables determinadas a un bajo costo como lo es la textura del suelo y el contenido de materia orgánica.

2.1.2. Modelo “Características Hídricas del Suelo” (Soil Water Characteristics, SWC).

Según Saxton and Rawls (2006) las propiedades hidrofísicas del suelo pueden ser estimadas a través de variables de fácil obtención y bajo costo. Tomando como base los antecedentes descritos por el modelo SWC, se puede considerar el porcentaje de arcilla, arena, y limo, además del contenido de materia orgánica del suelo, para estimar las características hidrofísicas del suelo.

2.1.3. Método *in situ* (MIS).

Esta metodología se basa en la medición de los parámetros de interés. Para el caso de obtención de mapas de suelo, se necesita medir las variables hidrofísicas que tengan un alto impacto en el diseño y manejo en sistemas de riego y asociarlas con la profundidad de extracción de agua por las raíces.

2.2. Antecedentes relevantes para un adecuado diseño y manejo de sistemas de riego.

La selección y diseño del método de riego se ve influenciada por factores del suelo tales como textura, estructura, profundidad, infiltración y capacidad de retención de agua. Además, otros factores a considerar son la topografía y la susceptibilidad a la erosión (Thompson *et al.*, 1981). Estos parámetros se deben integrar con aspectos asociados al cultivo, y de esta forma cualquier toma de decisiones se hará en función de la interacción de criterios vinculados entre estas variables.

2.2.1. Cultivo.

Para un adecuado diseño y manejo del riego se deben considerar los aspectos tanto fisiológicos como anatómicos de las plantas. El criterio más apropiado para un buen manejo del agua tiene estrecha relación con el volumen y profundidad de raíces extractantes, ya que el riego será eficiente siempre y cuando el agua se distribuya sólo en la zona radical de extracción. Si se sobrepasa la profundidad radicular efectiva se estará perdiendo el recurso por percolación profunda y se aumenta el potencial de contaminación de las aguas de los acuíferos. Holzapfel (2010) indica que la zona de extracción radicular y de exploración de las raíces es un factor crucial en el manejo y aplicación del agua, y se debe asociar al tipo de suelo. La exploración radicular y el tipo de suelo determinan la cantidad de agua que es factible de aplicar y la frecuencia de riego. Otro factor importante y fundamental en el manejo de frutales es establecer la profundidad de raíces extractante para saber la zona de absorción de agua y fertilizantes. Autores como

Holzapfel (2010), Girona *et al.* (2002) y Andreu (1997) han encontrado para diversos frutales que la profundidad de extracción es hasta los 0,6 a 0,7 m de profundidad y que más allá de esto, la actividad es casi nula.

2.2.2. Textura del suelo

Los componentes de la fase sólida del suelo son arena, limo y arcilla, los cuales difieren en su tamaño. La proporción respecto del total en que se encuentren estas partículas determina la textura, característica que se asocia a la capacidad de retención, velocidad de infiltración, curva característica de desorción y conductividad hidráulica. Una de las formas precisas y cuantitativas de determinar este parámetro es mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, considerando el triángulo textural del Sistema Internacional o del USDA (Vidal 1997).

2.2.3. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa de suelo seco y el volumen que ocupa dicha masa. El volumen incluye tanto las partículas sólidas como el espacio poroso existente entre ellas, definido en gran medida por la textura del suelo y por el grado de agregación entre las partículas o estructura del suelo. A diferencia de la textura, la densidad aparente es una propiedad dinámica, que varía con las condiciones estructurales del suelo, las que dependen de condiciones de manejo, tales como el paso de maquinaria u otras labores agrícolas. Este parámetro puede servir como un indicador del grado de compactación que tiene el suelo y la restricción relativa al desarrollo radical de las plantas (Selles *et al.*, 2012).

2.2.4. Capacidad de retención de agua por el suelo.

Esta característica, asociada a la zona de exploración y extracción de agua por las raíces, determina el volumen de agua que el suelo es capaz de almacenar y determina, entre otras cosas, el volumen máximo a aplicar. Esto tiene a su vez impacto en el tiempo y frecuencia de riego. Al no separar unidades de suelo homogéneas, existirán zonas donde habrá una diferencia de capacidad de retención de agua del suelo. Así, al tener la misma frecuencia y tiempo de riego, en las zonas con mayor capacidad de retención de agua se presentarán posibles problemas de exceso de humedad y en aquellas con menor capacidad de retención tendrán una menor cantidad de agua, y lo que a su vez influencia en el rendimiento de los cultivos o frutales. La capacidad de retención determina el criterio del manejo, en términos del tipo de frecuencia y volumen de riego a aplicar:

- Si se consideran suelos de texturas finas, con alta capacidad de retención, se deberá preferir bajas frecuencias de riego, lo que permitirá una adecuada infiltración y aireación de la zona radical, evitando someter al cultivo a asfixia.
- Si se consideran suelos de texturas gruesas, con una baja capacidad de retención, se deberá preferir altas frecuencias de riego debido a que tiene la capacidad de retener lo aplicado y no existirían problemas de aireación debido a su alta velocidad de infiltración.

2.2.5. Velocidad de infiltración

Este parámetro es importante desde el punto de vista del diseño en el caso de sistemas de riego presurizado, influyendo en la elección del emisor (elemento fundamental en el equipo de riego). Una mala distribución de las unidades de suelo respecto de este parámetro influirá en que existirán zonas donde se produzcan pérdidas de agua y, en consecuencia, disminución de la eficiencia del método por efecto de escorrentía superficial. Esto ocurre cuando el caudal de descarga del emisor es superior a la velocidad de infiltración del suelo siempre cuando sean terrenos con pendiente, ya que en el caso de terrenos planos, el exceso de agua producirá encharcamiento.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la región del Biobío, provincia del Ñuble, comuna de Coihueco, en el predios Los Abedules perteneciente a la empresa Carsol Fruit S.A. (Figura 1) que tienen una superficie total de 250 ha, distribuidas entre cultivo de arándanos (120,2 ha), cultivos anuales (71,9 hás), bosque de pinos (29,2 hás), esparraguera (9,4 hás), y construcciones diversas (19,3 hás). Se ubica en la latitud 36°37'20" sur, longitud 71°54'06", uso 19, con altitud de 227 m.s.n.m. a 15 km de la ciudad de Chillán, en la ruta que une esta ciudad con la comuna de Coihueco.

En estudios anterior desarrollados por Soto (2007) y Rivera (2012) en la parte noreste del predio, se indica que predominan los suelos franco, siguiendo en su orden los franco arcillosos, con un promedio de humedad aprovechable de 66 mm y 195 mm a 30 y 90 cm de profundidad del perfil del suelo, respectivamente. Así mismo, la densidad aparente de los primeros 30 cm varía de 0,89 a 0,95 g cm⁻³, valores que se mantienen relativamente constantes hasta los 90 cm de profundidad, condición que facilita el drenaje y la retención de agua.

Según CIREN los suelos presentes en el predio corresponden a la serie Arrayán (50,3% de la superficie), serie Gallipavo (15,1%), serie Mebuca (15,1%), serie Chacayal (13%), y serie Talquipén (6,5%). Todas las series presentes en el predio fueron descritas en el Mapa de Reconocimiento de Suelos de la Región del Bío-Bío (Sector Norte) (Santis 2005). Sus respectivas descripciones con las fases asociadas a cada serie se indican en el Anexo 1.

El clima es mediterráneo con estaciones secas y lluviosas, precipitación anual de 1.200 mm, extendiéndose la estación lluviosa entre abril y agosto. El mes más caluroso es enero con una temperatura media de 19,7°C y el mes más frío corresponde a julio con una temperatura media de 7,6 °C.



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Predio Los Abedules – Carsol Fruit S.A. Coihueco, Chile.

3.2. Georeferenciación del predio

Se seleccionaron zonas características, que corresponden a vértices del predio, construcciones, límites de potreros o estructuras destacadas las que fueron georeferenciadas en base a una imagen óptica con una resolución radiométrica y espacial de 8 bits y 0,5 m, respectivamente. Posteriormente se crearon capas temáticas con todas las observaciones y se incorporaron a un SIG.

3.3. Análisis preliminar del suelo.

Se realizó un análisis a priori de la variabilidad espacial del suelo para definir unidades relativamente homogéneas y establecer, inicialmente, el número y ubicación de las calicatas.

A partir de la información de las series de suelo presente en el predio obtenida de CIREN contenida en un archivo ESRI ShapeFile, además del manejo agronómico, pendiente y sistemas de cultivo, se definieron unidades de suelo que se presume son homogéneas. Para estos efectos se realizó un muestreo con barreno en el predio, que buscó coherencia entre la información de CIREN y lo observado en terreno; de esta forma se obtuvo una visión preliminar de la variabilidad espacial del suelo. Este análisis fue el punto de partida para la evaluación de las metodologías propuestas y posterior generación de mapas de suelo.

3.4. Estudio previo de características hidrofísicas del suelo.

Se contó con una descripción del suelo realizado por Soto (2007), que detalla algunos sectores del predio en base a características hidrofísicas de interés en este estudio.

3.5. Estudio agrológico

El perfil se caracterizó en base al Manual Soil Survey (USDA 1999) y SAG (2001), para luego comparar la información levantada en terreno con el Mapa de reconocimiento de los suelos de la Región del Bio Bio (Sector Norte) (Santis 2005) y el archivo digital de las series de suelo. De esta forma se obtuvieron tres mapas de suelo con información de unidades cartográficas, clase de capacidad de uso, y clases de aptitud para frutales.

3.6. Evaluación y calibración del modelo “Características Hídricas del Suelo”

El modelo propuesto por Saxton and Rawls (2006) se ha considerado como una alternativa para predecir el contenido de agua del. De esta forma se podrían reducir en forma sustantiva los costos del estudio de suelo, ya que los análisis de laboratorio de los parámetros de entrada del modelo tienen un valor inferior (textura y materia orgánica) a los de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

El modelo SWC tiene como datos de entrada los porcentajes de arcilla (% A) y arena (% a), además del porcentaje de materia orgánica (% MO), y como resultado se obtiene contenido de agua del suelo a 33 kPa (CC), a 1500 kPa (PMP), densidad aparente (Da), y conductividad hidráulica saturada (Ks).

El modelo propuesto por Saxton and Rawls (2006) corresponde a un polinomio de segundo orden en tres variables, y las ecuaciones que usan para la predicción de las características hídricas del suelo se presentan a continuación.

$$FC = \theta_{33} = \theta_{33t} + [A(\theta_{33t})^2 + B(\theta_{33t}) + D] \quad \text{Ec. 1}$$

con

$$\theta_{33t} = a + bS + dC + eOM + f(S * OM) + g(C * OM) + h(S * C) \quad \text{Ec. 2}$$

donde FC es contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) expresado en porcentaje; S y C es el contenido de arena (%) y arcilla (%), respectivamente; OM es el contenido de materia orgánica (%); A, B, D, a, b, d, e, f, g y h, corresponden a los coeficientes del polinomio.

Para el caso del punto de marchitez permanente las ecuaciones que utilizan son las siguientes:

$$WP = \theta_{1500} = \theta_{1500t} + [A(\theta_{1500t})^2 + B(\theta_{1500t}) + D] \quad \text{Ec. 3}$$

con

$$\theta_{33t} = a + b S + d C + e OM + f (S * OM) + g (C * OM) + h (S * C) \quad \text{Ec. 4}$$

donde WP es contenido de agua en el suelo en punto de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) expresado en porcentaje.

Se evaluó la capacidad de predicción de contenido de agua del suelo a 33 kPa (CC) y a 1500 kPa (PMP) del modelo SWC tomando como indicador de bondad de ajuste el coeficiente de determinación (R^2), el root mean square error (RMSE) y las diferencias relativas para determinar el error del modelo.

Además, se consideró realizar un ajuste del modelo por medio de la técnica de los mínimos cuadrados (MC), donde dado un conjunto de pares ordenados: variable independiente, variable dependiente, y una familia de funciones, se pretende encontrar una función continua, dentro de una familia, que mejor se aproxime a los datos de acuerdo al criterio de mínimo error cuadrático acumulado.

3.7. Determinación de las características hidrofísicas del suelo.

Los análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo se llevaron a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Agronomía, y en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, Campus Chillán.

La ubicación y número de las 31 calicatas en el estudio, estuvo determinada por el análisis preliminar del suelo obtenido con el barreno y los antecedentes de CIREN. Se tomaron muestras para determinar las principales características físicas del suelo, y los parámetros analizados fueron las siguientes:

- **Capacidad de retención de agua (humedad aprovechable, HA).** Correspondió a la determinación del rango de humedad del suelo, del cual la planta es capaz de extraer agua. Este rango se define como la diferencia entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Para determinar dichos parámetros, las muestras de suelo se secaron al aire para, posteriormente, dejarlas embebiendo en un plato de cerámica por 24 horas. Las muestras embebidas se colocaron en una olla a presión a 0,03 MPa por 24 horas para determinar el valor de capacidad de campo y a 1.5 MPa por 48 horas para el punto de marchitez permanente. Posteriormente, las muestras se pesaron para determinar la masa de agua inicial y luego se pusieron al horno a 105°C durante 24 horas. Después del periodo de secado las muestras se volvieron a pesar para

obtener la masa del suelo seco. El diferencial entre ambas mediciones determinó la cantidad de agua retenida en cada muestra. Para determinar la humedad aprovechable (HA) se utilizó la siguiente expresión:

$$HA = \frac{(CC-PMP)}{100} \rho_b Z \quad \text{Ec. 5}$$

donde *CC* y *PMP* corresponde a contenido de humedad a capacidad de campo (0,33 MPa) y a punto de marchitez permanente (1,5 MPa), respectivamente (g/g), ρ_b es densidad aparente (g/cm), y *Z* es profundidad (mm).

- **Textura.** Se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, para luego utilizar el triángulo textural del sistema USDA y así obtener una mayor diferenciación de los distintos tipos de suelo (Vidal 1997). Se obtuvieron los porcentajes de arcilla (A), limo (L), y arena (a); dichos valores también se incorporaron al análisis de la variación espacial como capa temática.

- **Densidad aparente.** Se determinó con el método del terrón, utilizando la siguiente expresión:

$$Da = \frac{P_{ss}}{Vd - \frac{S - P_{ss}}{Dp}} \quad \text{Ec. 6}$$

donde *Da* es densidad aparente (g/cm³), *Dp* es densidad de la parafina (g/cm³) que varía entre 0.85 y 0.90, *P_{ss}* es peso del terrón de suelo seco (g), *S* es peso del terrón más parafina en (g), y *Vd* es el volumen desplazado por el terrón cubierto de parafina en (cm³).

- **Velocidad de infiltración.** Corresponde a la velocidad de penetración vertical del agua en el suelo. Este parámetro depende de la textura, contenido de humedad inicial, cubierta vegetal, contenido de materia orgánica y grado de compactación. Inicialmente la velocidad de infiltración es alta, pero a medida que transcurre el tiempo, disminuye hasta que se hace relativamente constante, valor al cual se le denomina velocidad de infiltración básica. Para determinar la velocidad de infiltración se utilizó el método del cilindro infiltrómetro con poseta, y dos repeticiones en cada punto de muestreo. El criterio para obtener la velocidad de infiltración básica fue la medición a los 120 minutos.

3.8. Espacialización de los datos.

La distribución espacial de las características hidrofísicas del suelo se realizó a partir de los datos medidos en terreno. A partir de esto se obtuvo datos estimados en ubicaciones no muestreadas. La estimación espacial se realizó a través de interpoladores o métodos de interpolación, los cuales dicen relación con la primera ley de la geografía de Tobler: “Todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes” (Tobler, 1970).

La forma de representación gráfica de los valores obtenidos a través de los métodos de interpolación fue por medio de mapas y contornos de tendencia. Cabe destacar que para efectuar la interpolación, se debió crear una malla que abarcara por completo el área que posee la información recogida de terreno, formando celdas y nodos x,y . Se asignó el tamaño de la celda ($\Delta x, \Delta y$), lo que determinó la densidad de la malla y el grado de resolución con el que se efectuó la estimación. Los datos tomados en terreno de las propiedades hidrofísicas fueron espacializados a través del método de Kriging (Hengl, 2009) obteniendo los mapas para los parámetros analizados.

Hengl (2009) menciona que los métodos geoestadísticos se pueden clasificar en modelos de predicción mecánicos y estadísticos. En el primer grupo, se puede ubicar los métodos Inverso a la Distancia y Vecino más Cercano, los cuales se caracterizan principalmente por no incorporar conceptos de estadística y probabilidad en el proceso de estimación, además de utilizar parámetros arbitrarios o empíricos. En los modelos de predicción estadísticos, donde se puede encontrar el método del Kriging, los parámetros se estiman comúnmente de una manera objetiva y las predicciones se acompañan con la estimación del error, es por esto que se eligió este último.

La espacialización de las propiedades hidrofísicas de los suelos, debe entregar información con la cual se pueda tomar decisiones, ya sea de corrección de algún parámetro, manejo o planificación. La obtención de mapas, está definida por varios factores, entre los cuales se tiene el método por el cual se realiza la interpolación y el número de datos medidos.

Para la presentación de los mapas de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego, se debió seleccionar la discretización de los valores analizados, para así definir los sectores de manejo que son homogéneos en sus propiedades hidrofísicas. Respecto a esto último, se seleccionaron índices de calidad física de los suelos según lo menciona Rabbi *et al.* (2014). Los índices son: el contenido de

arcilla debe ser menor o igual a un 40%, y la densidad aparente debe variar entre 0,9 y 1,2 g cm⁻³.

Respecto a estos indicadores, USDA (2009) indica que un contenido de arcilla mayor o igual a un 40% impide el movimiento y redistribución del agua en el suelo. A su vez, Reynolds *et al.* (2003) mencionan que en suelos de texturas finas densidades aparentes menores a 0,9 g cm⁻³ pueden proporcionar contacto insuficiente entre el suelo y las raíces, mientras que densidades aparentes mayores a 1,2 g cm⁻³ pueden impedir la elongación de las raicillas y se reduce la aireación del suelo.

3.9. Análisis de las metodologías utilizadas.

Las metodologías CIREN, SWC y MIS fueron evaluadas y se realizó una comparación entre ellas. Estas relaciones se analizaron con un Sistema de Información Geográfica de código libre, donde se almacenaron los datos obtenidos y generaron capas temáticas para obtener los mapas con las diferentes metodologías y su categorización.

Para analizar la calidad de los datos se realizaron comparaciones entre las metodologías descritas y la categorización de los mapas. Para esta comparación se utilizó el coeficiente de variación, que se determina de la siguiente manera:

$$CV (\%) = \frac{SD}{|\bar{X}|} * 100(\%) \quad \text{Ec. 7}$$

donde CV es el coeficiente de variación (%), SD es la desviación estándar y $|\bar{X}|$ es el promedio.

Para tener una referencia de los costos asociados a los estudios de suelo, se realizó una encuesta a diferentes empresas consultoras del rubro y a laboratorios especializados para el caso de los análisis de los parámetros físicos del suelo.

3.10. Georreferenciación y análisis preliminar del área de estudio.

La Figura 2 muestra la delimitación del predio, cultivos anuales, frutales, y bosques existentes. Se observa que los arándanos se encuentran en la zona norte del predio, y en la zona oeste y sur predominan los cultivos anuales y bosques, zona en la cual se proyectan nuevas plantaciones.

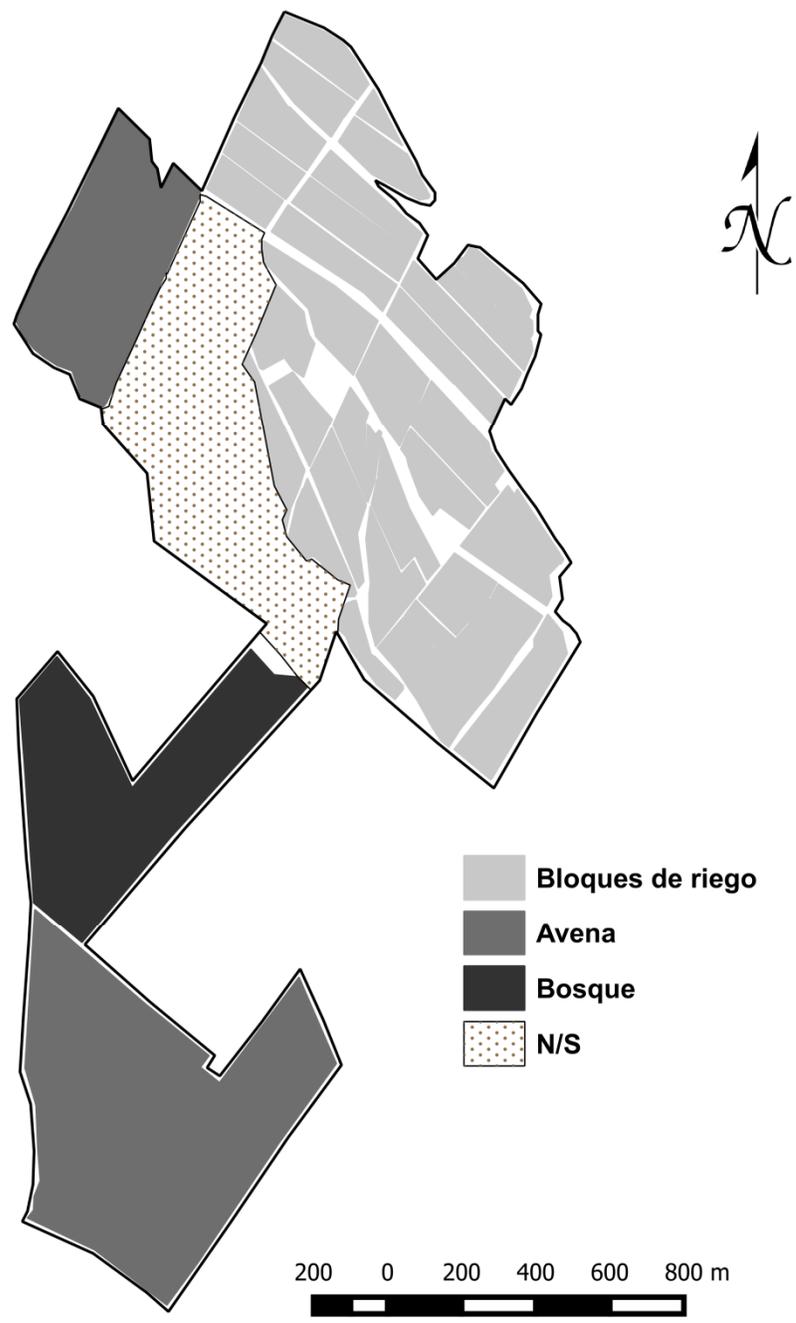


Figura 2. Área de estudio en Predio Los Abedules – Carsol Fruit S.A. Coihueco, Chile.

En general, la delimitación de zonas con características similares coincide con el cambio de pendiente, material parental, uso y manejo. A partir de la información

obtenida de CIREN contenida en el archivo ESRI ShapeFile con las series de suelo presente en el predio y considerando el manejo agronómico, pendiente y sistemas de cultivo, se realizó un análisis preliminar de las características del suelo a través de un monitoreo con barreno del predio, tomando como primera referencia de muestreo las series de suelo. Posteriormente, se incorporó la información recolectada en terreno referente al manejo agronómico, pendiente y sistema de cultivo. De esta forma, con las diferencias encontradas con el muestreo con barreno, se definieron las unidades de suelo que se asumieron inicialmente homogéneas. La Figura 3 muestra las series de suelo presentes en el predio, los puntos de monitoreo con barreno y las zonas consideradas homogéneas.

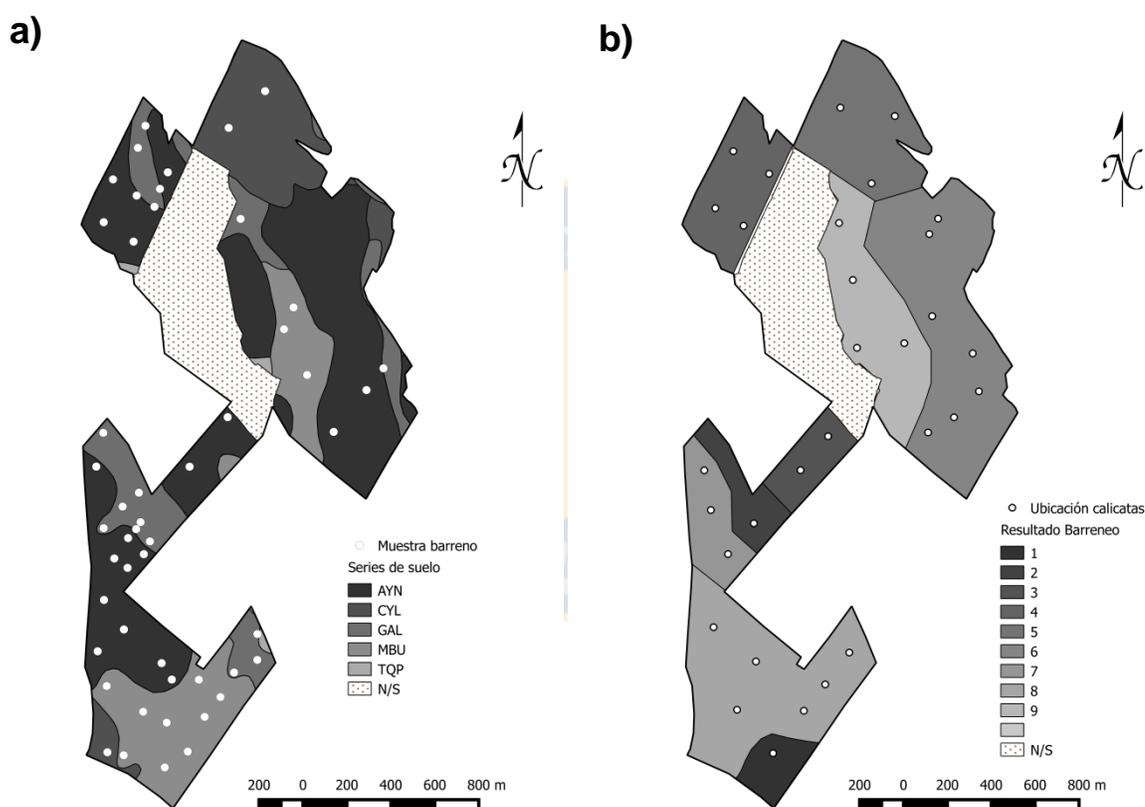


Figura 3. a: Puntos de muestreo con barreno y series de suelo presentes en el predio (MBU: Mebuca, GAL: Gallipavo, AYN: Arrayán, TQP: Talquipén, CYL: Chacayal). b: Zonas identificadas como homogéneas y ubicación de las calicatas. (Los números 1 al 9 corresponden a la zona identificada en el Cuadro 2).

Tomando como base las zonas homogéneas determinadas, se observó que la información contenida en el archivo ESRI Shape de CIREN que contiene las series de suelo no es fiel reflejo de lo que ocurre en la realidad en terreno, al establecer que en algunas zonas difieren espacialmente a lo observado. Esto ocurre, generalmente, en los límites de las series, y se atribuye al error que se da en los

métodos de espacialización de la información recogida en terreno. En general, los suelos del área de estudio cumplen con las características de las series descritas por Santis (2005).

Las áreas definidas que se consideraron inicialmente homogéneas se presenta en la Figura 3b, en las cuales el criterio para su espacialización fue el muestreo con barreno realizado en base a las series de suelo, profundidad aproximada, cambios de estrata, textura al tacto, color, presencia de nivel freático. Adicionalmente se muestra la ubicación de las calicatas realizadas (22 puntos de muestreo), que complementada con la información descrita por Soto (2007), se logró describir 31 puntos del área en estudio.

Se realizó un análisis de la superficie y número de calicatas por zona y se obtuvo, además, la superficie de influencia de cada calicata, lo que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de calicatas, área y superficie de influencia por calicata en cada zona considerada homogénea.

Zona homogénea	Nº de calicatas	Área (há)	Superficie/calicata (há/cal)
1	1	6,9	6,6
2	1	8,5	8,5
3	2	9,1	4,6
4	4	19,7	4,9
5	3	27,4	9,1
6	7	53,1	7,6
7	3	12,3	4,1
8	6	44,7	7,5
9	4	29,7	7,4

En general se observa que el área de influencia por calicata fue menor a 10 há, no incluyéndose en el análisis el área que está ocupada por construcciones (packing, casa, oficina, bodegas), terrenos sin uso y plantaciones sin interés para este estudio. La ubicación de las calicatas dentro de las zonas fue asignada dependiendo de las condiciones de cultivo, tomando la precaución que estuvieran alejadas de caminos, arboledas y los más equidistante posible entre ellas.

En general, los estudios de suelo consideran indiscriminadamente un alto número de calicatas y de forma sistemática con un arreglo de grilla cuadrículado. La mayoría de las veces se considera una calicata por hectárea o más, lo que no se justificaría en el caso de que existiese una homogeneidad en el suelo. Es por esto

que se realizó el análisis preliminar con barreno, caracterizando el terreno para disminuir los costos asociados al estudio.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Mapeo de suelo.

A continuación se presentan los resultados del estudio de suelo realizado con las tres metodologías propuestas.

4.1.1. Clasificación de capacidad de uso (CIREN).

En el predio se determinó la presencia de las series de suelo Arrayán, Mebuca, Gallipavo y Chacayal en sus diferentes fases (sus descripciones se encuentran detalladas en el Anexo I).

En el predio se observó que la clase II tiene una superficie de 149,3 ha, con suelos que presentan ligeras limitaciones que reducen la elección de los cultivos o requieren moderadas prácticas de conservación. Son suelos planos, con ligeras pendientes, profundos o moderadamente profundos de buena permeabilidad y drenaje, de texturas que según SAG (2001), pueden variar desde suelo arenoso franco fino (aFf) a franco arcilloso (FA). En cuanto a la clase de capacidad de uso III, el predio tiene una superficie de 65,4 ha, siendo suelos que tienen limitaciones moderadas para su uso (profundidad del suelo y excesiva humedad que restringe el crecimiento de las raíces por presencia de napa freática) y restringen la elección de cultivos. Sin embargo, existen cultivos que aceptan este tipo de suelo o labores para corregir estas limitaciones. Poseen una topografía que varía de plana a moderadamente inclinada, lo que dificulta severamente el regadío para sistemas gravitacionales y su permeabilidad varía de lenta a muy rápida (Figura 4)

En el predio se encontraron clases de aptitud frutal 1 (sin limitación) y 4 (limitación severa). En esta última clase se observó que las principales limitaciones fueron la profundidad y la clase de drenaje (las clases de drenaje que se encontraron son W3 y W2 = drenaje imperfecto y pobremente drenado, respectivamente) (Figura 5). El área que se encontró para la clase de aptitud frutal 1 fue de 152 hás, y para la clase 1 fue de 60,8 hás. Sin embargo esta última clase puede ser mejorada por lo menos en una categoría con la preparación de camellones y sistemas de drenaje subsuperficiales, para aumentar la profundidad efectiva y controlar la napa freática alta.

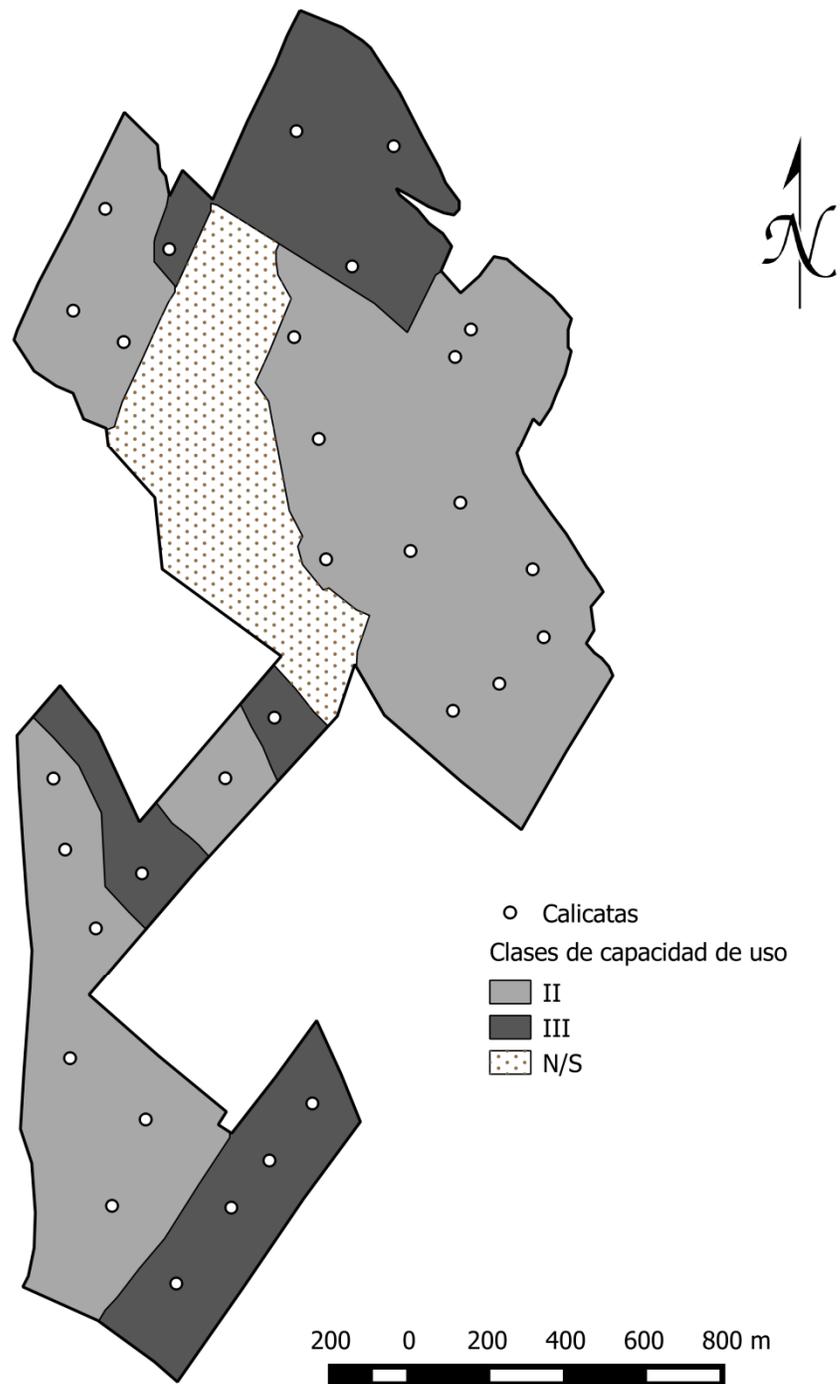


Figura 4. Clases de Capacidad de Uso obtenido con estudio agrológico según Soil Survey y SAG, y ubicación de las calicatas. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.

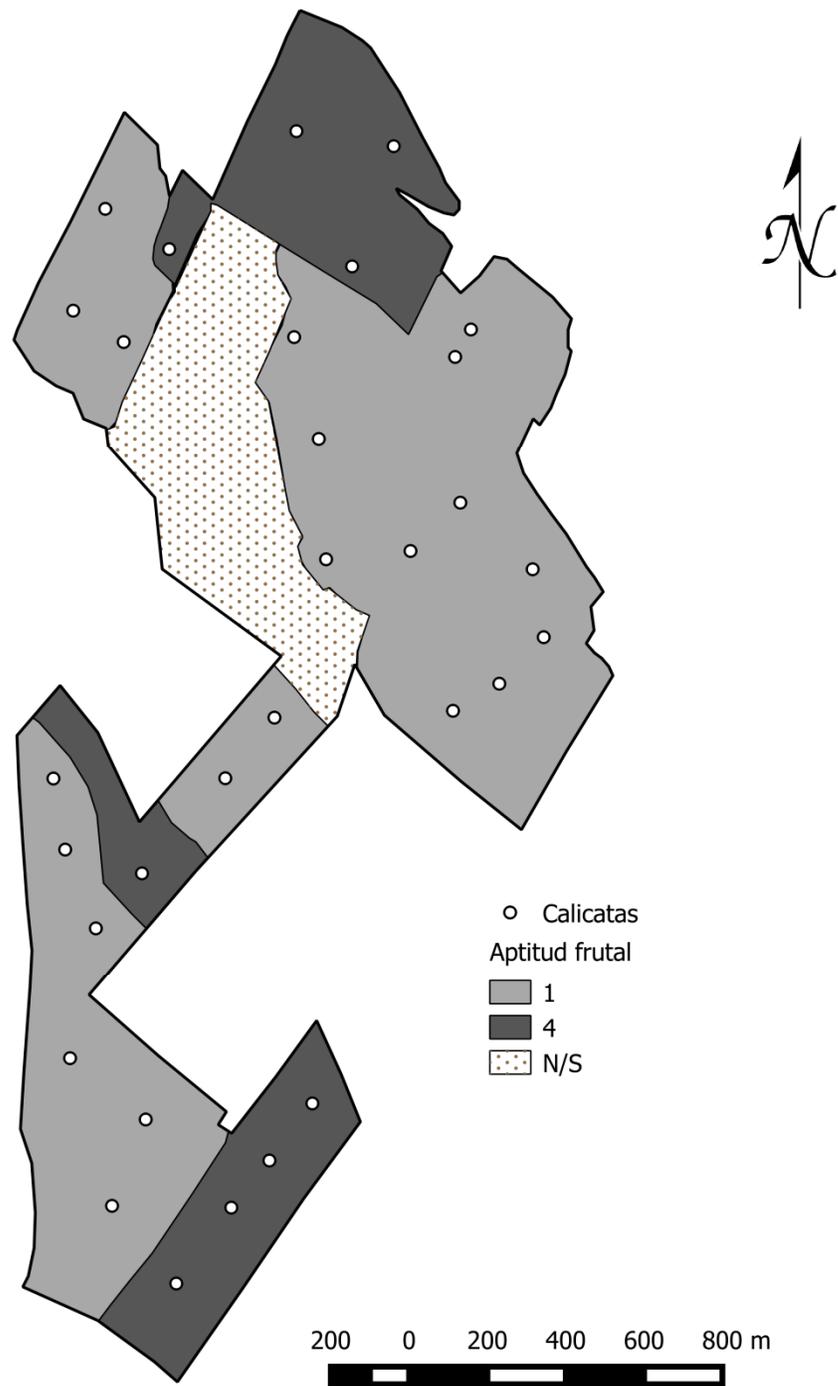
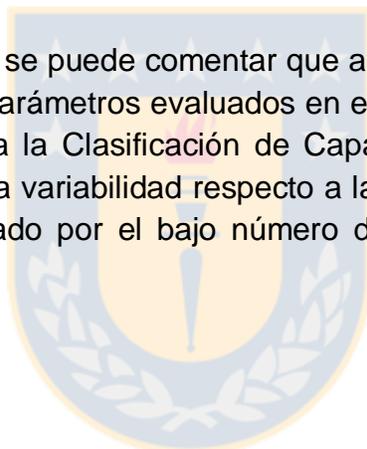


Figura 5. Aptitud frutal obtenida con estudio agrológico según Soil Survey y SAG, y ubicación de las calicatas. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.

Respecto a las unidades cartográficas encontradas (Figura 6), en el Anexo 1 se encuentra una descripción modal de estas. Se observó, que existen suelos de la serie Arrayán en su fase 2 (AYN-2) que ocupa una superficie de 152,4 ha, serie Mebuca fase 2 (MBU-2), con 17,4 ha, serie Gallipavo fase 2 (GAL-2) con 15,1 ha, y serie Chacayal fase 2 (CYL-2) con 28,4 ha.

Los estudios agrológicos entregan información relevante para caracterizar suelos con el fin de realizar correcciones de fertilidad, eliminar problemas de compactación, mejorar condición de drenaje, o realizar una preparación diferencial de suelo, asociado a los factores limitantes. Una vez que se llega a estas unidades cartográficas de suelo se establece un manejo homogéneo de ella, por lo que generalmente se toman muestras para ser analizadas en laboratorio, pero su número no es suficiente ya que como la unidad de suelo se determinó homogénea solo se toma una o dos muestras que se supone son representativas de la unidad cartográfica.

En función de lo anterior, se puede comentar que así como existe una variación de suelo en función de los parámetros evaluados en el estudio agrológico, que tienen como guía la Pauta para la Clasificación de Capacidad de Uso de Suelo (SAG 2001), también existe una variabilidad respecto a las propiedades hidrofísicas que podría no ser representado por el bajo número de muestras tomadas con este método.



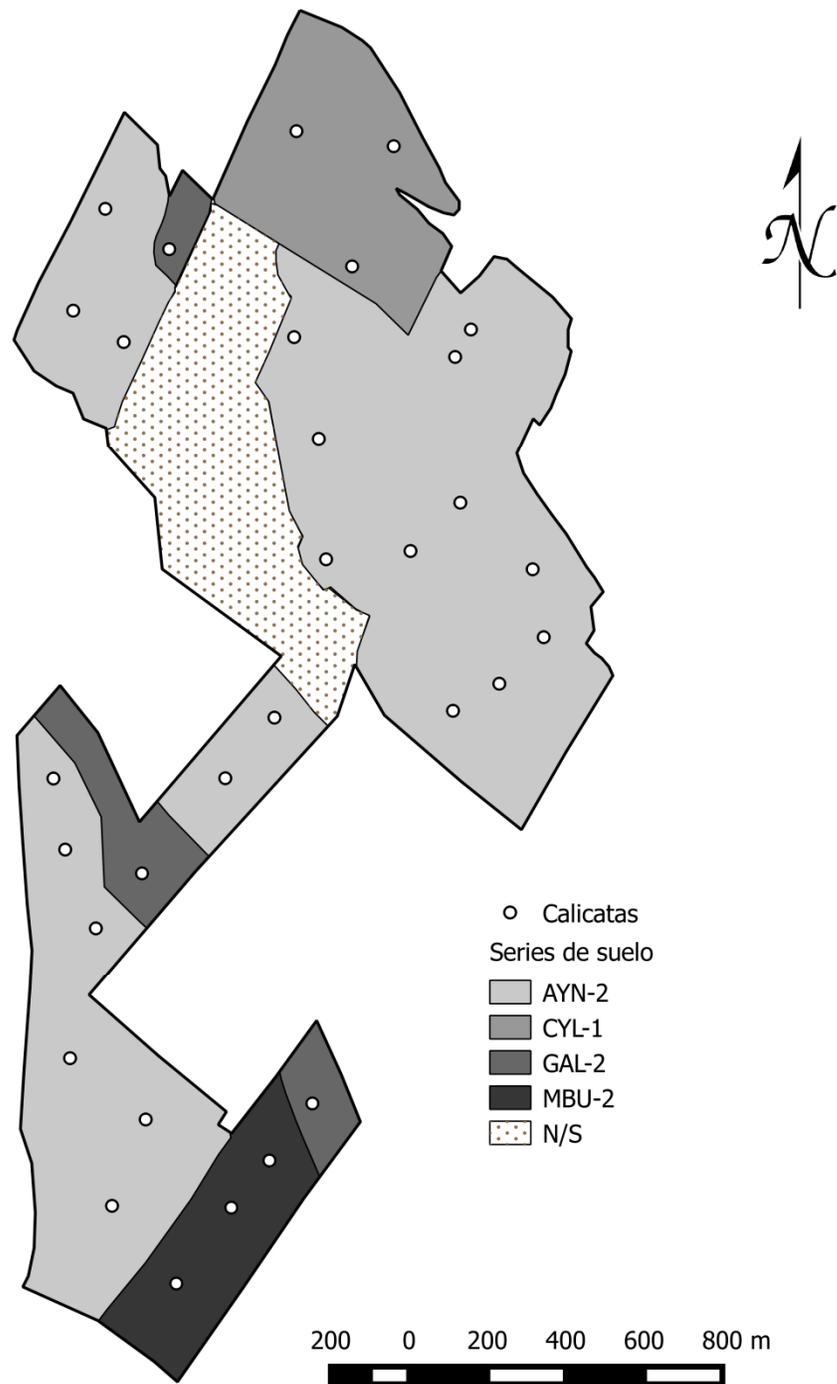


Figura 6. Unidades cartográficas obtenido con estudio agrológico según Soil Survey y SAG y ubicación de calicatas. AYN-2: Arrayán fase 2; CYL-2: Chacayal fase 2; GAL-2: Gallipavo fase 2; MBU: Mebuca fase 2. N/S corresponde a la zona donde no se tomaron muestras.

4.1.2. Método “*In Situ*”.

Se consideraron 31 puntos de muestreo y, dependiendo de las condiciones o características del suelo, se tomaron muestras en tres profundidades las que se establecieron en función del perfil del suelo, cabe destacar que la profundidad de los horizontes en el perfil variaron entre: primer horizonte varió entre 0 – 0,6 m (superficial), segundo horizonte varió entre 0,2 – 0,8 m (sub-superficial), y tercer horizonte varió entre 0,5 – 1 m (profundidad). Es importante mencionar que en algunos puntos no se pudieron tomar muestras debido a presencia de nivel freático o material parental no consolidado. Para realizar la interpolación y confeccionar los mapas de las características hidrofísicas analizadas, se consideró la información de las características de un total de 31 puntos de muestreo.

La Tabla 2 muestra la estadística descriptiva para las propiedades hidrofísicas de las muestras de suelo analizadas.

En general, se observa que en el caso de la densidad aparente los valores mínimos son similares en todos los horizontes. Sin embargo, cuando se analiza el promedio se puede observar que existe una leve alza de este valor en profundidad, lo que puede estar originado por el aumento de la fracción de arena, la que tiene una mayor densidad de partículas (Alvarado y Forsythe, 2005). Otro factor que afecta, puede estar asociado a las alteraciones producto de las actividades que se desarrollan en el suelo lo cual produce modificaciones en su estructura, como por ejemplo el laboreo, lo que hace que en superficie disminuya la densidad aparente debido a la presencia de raíces y aplicación de materia orgánica proveniente de poda o enmiendas. Por otro lado, en profundidad habría un aumento debido a que la presión que ejerce el paso de maquinaria se transmite a las estratas más profundas.

En cuanto al coeficiente de asimetría, se observa que las estratas presentan un sesgo positivo lo que indica una mayor concentración de los valores en la parte izquierda de la curva de distribución, lo que significa una predominancia de valores bajos de densidad aparente, que disminuye a medida que se avanza en profundidad (Figura 7).

Tabla 2. Estadística descriptiva para las propiedades hidrofísicas del suelo analizadas para los horizontes superficial, subsuperficial y en profundidad (n=31).

Variable	Horizonte	Min	Máx	Promedio	Mediana	Desv. Est	Sesgo
Da (gr cm ⁻³)	Superficial	0,90	1,24	1,04	0,99	0,11	0,61
	Subsuperficial	0,91	1,44	1,07	1,00	0,15	0,94
	Profundidad	0,91	1,32	1,10	1,12	0,14	0,11
CC (m ³ m ⁻³)	Superficial	0,28	0,63	0,48	0,49	0,10	-0,43
	Subsuperficial	0,25	0,63	0,49	0,51	0,11	-0,51
	Profundidad	0,35	0,60	0,48	0,50	0,09	-0,33
PMP (m ³ m ⁻³)	Superficial	0,15	0,33	0,25	0,26	0,05	-0,49
	Subsuperficial	0,13	0,34	0,26	0,26	0,05	-0,51
	Profundidad	0,18	0,34	0,25	0,26	0,05	-0,07
Arcilla (%)	Superficial	13,7	40,5	25,8	27,6	8,6	0,07
	Subsuperficial	7,0	43,4	24,6	24,1	10,5	0,03
	Profundidad	8,0	32,3	20,3	21,7	6,7	-0,13
Arena (%)	Superficial	15,3	40,5	29,9	29,6	5,5	-0,90
	Subsuperficial	23,2	48,9	31,6	30,8	6,2	1,14
	Profundidad	26,4	69,4	38,7	34,9	11,2	1,74
Limo (%)	Superficial	30,0	58,2	44,2	43,0	9,0	0,12
	Subsuperficial	29,6	64,1	43,7	44,3	11,2	0,21
	Profundidad	19,8	60,8	41,0	43,4	11,5	-0,32
LA (mm)		74,23	262,82	160,36	160,46	45,93	0,19
VIB (cm min ⁻¹)		0,01	0,70	0,16	0,10	0,18	2,35

* Da: densidad aparente, CC: capacidad de campo (contenido de agua a -0,33 MPa), PMP: punto de marchitez permanente (contenido de agua a -1,5 MPa), LA: lámina de agua contenida entre CC y PMP, VI_b: velocidad de infiltración básica.

Para el caso de la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente los valores promedio en todos los horizontes presentan una magnitud similar, variando entre 0,48 a 0,49 m³ m⁻³ y 0,25 a 0,26 m³ m⁻³. Sin embargo, cuando se analizan los máximos y los mínimos se observa un rango bastante amplio. Por ejemplo, en la estrata superficial el valor mínimo de CC es de 0,28 m³ m⁻³, y el máximo de 0,63 m³ m⁻³, y el valor mínimo de PMP es de 0,15 m³ m⁻³ y el máximo de 0,33 m³ m⁻³. Si se observan los antecedentes expuestos, existe un traslape de los valores mínimos de CC y máximos de PMP; por lo tanto, es imprescindible que se considere un número de muestras que explique espacialmente el comportamiento de estas propiedades, ya que con ellas se obtiene un parámetro de diseño y manejo de riego, como lo es la Humedad Aprovechable (HA). Ambos parámetros tienen un coeficiente de asimetría negativo en todo el perfil, lo que indica una concentración de los datos en valores altos de la distribución de frecuencia (Figura 7).

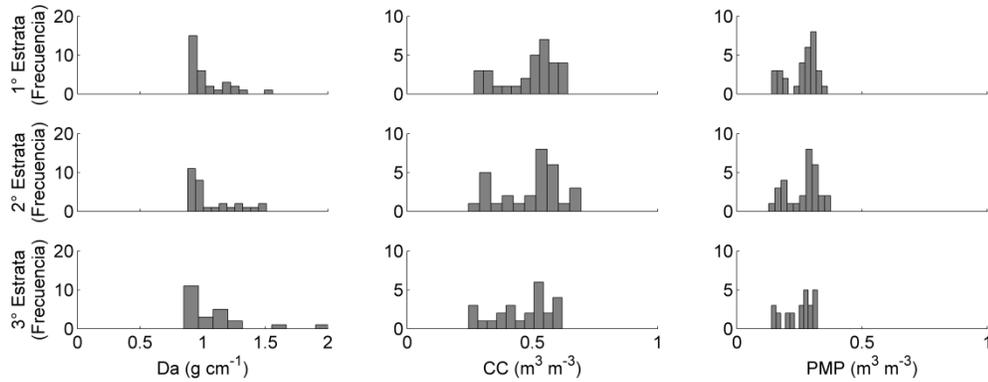


Figura 7. Histograma de las variables densidad aparente (Da), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) para las diferentes estratas.

Para el caso de porcentajes de arcilla, limo y arena, se observa que en promedio en todos los horizontes presentan valores altos de limo (Figura 8), con texturas entre franco a franco arcillo limoso.

En cuanto a las texturas, tanto espacialmente como en profundidad, predominó la clase textural Franco (F) con un 50,8%, lo sigue la clase textural Franco Arcilloso (FA) con un 22,0%, Franco Limoso (FL) con un 18,6%, para finalizar con las clases texturales Franco arenoso (Fa) y Franco Arcillo Limoso (FAL) con un 5,1% y 3,4%, respectivamente. Lo anterior indica que si bien existe una concentración de valores de clase textural en torno a la clase Franco, no se puede asociar textura a un contenido de humedad aprovechable derivado de las determinaciones de CC y PMP. Esta variación puede estar asociado principalmente a los usos y manejos que se les han dado a los sectores, ya que la intensidad de paso de maquinaria, incorporación de materia orgánica, y laboreo altera las propiedades del suelo.

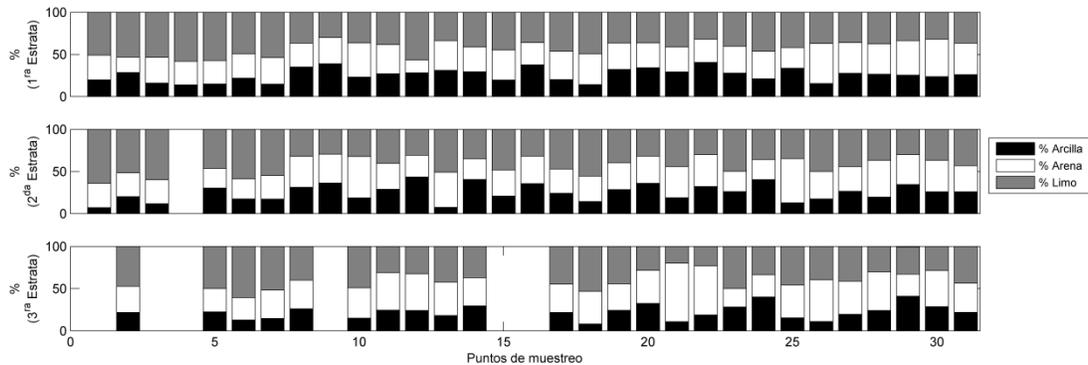


Figura 8. Proporción de arcilla, arena y limo, para las diferentes estratas en los diferentes puntos de muestreo (columnas en blanco son las zonas donde no se pudo muestrear).

4.1.3.2. Mapas de las características hidrofísicas del suelo.

El mapa categorizado de la densidad aparente (D_a) medida en terreno (Figura 9) muestra que predominan valores entre $0,85$ y $1,08 \text{ g cm}^{-3}$. Esto se presenta en la zona sur del predio, donde existe mayor variación, no así en la zona norte, donde actualmente hay una plantación de arándanos en plena producción y se observa una menor variación de la densidad aparente. En la zona central del predio se observa un aumento del valor de la D_a , sobre $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, lo cual puede ser atribuido al manejo del tipo forestal y a las características propias del suelo.

Como fue mostrado en la Figura 6, donde en la zona central y sur del predio, según la pauta para la clasificación de capacidad de uso de suelo propuesta por SAG (2001), predomina la serie Arrayán y agrupa esta dos zonas como similares. Sin embargo, al analizar los valores de la densidad aparente, se observa que ésta presenta una variación, y para diseño y manejo del riego estas zonas se debiesen considerar como diferentes entre ellas.



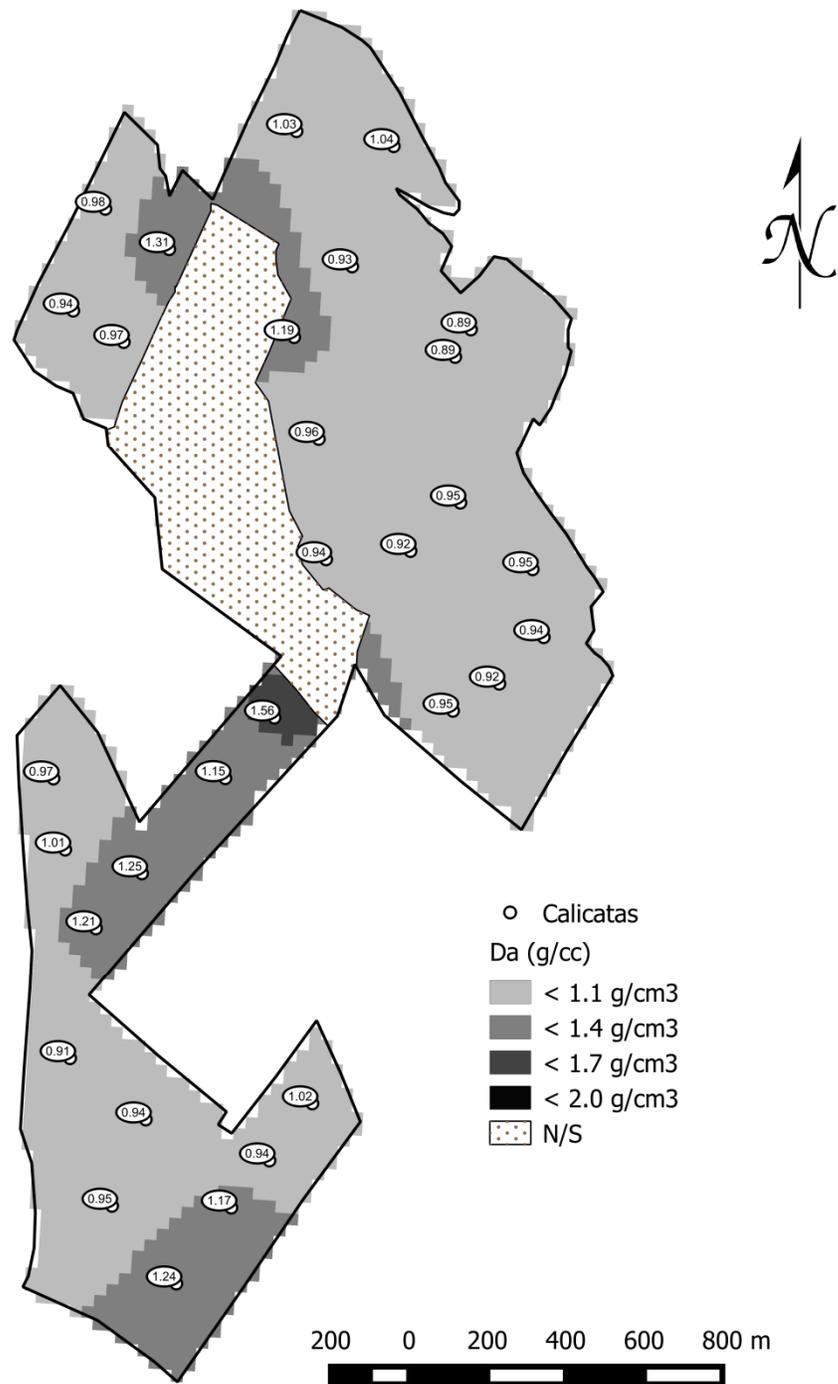


Figura 9. Densidad aparente (Da) categorizada de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.

Estudios realizados en la VIII Región, mencionan que la serie Arrayán en su primera estrata presenta D_a del orden de $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ (CIREN, 1999; Stolpe, 2006), valores levemente inferiores a lo encontrado en el área de estudio. Esto puede deberse al manejo y labores culturales que fueron objeto los suelos estudiados.

El mapa de densidad aparente se puede utilizar para identificar zonas con problemas de compactación y, así, establecer un manejo de sitios para su corrección. Sellés *et al.* (2012) mencionan que al realizar un control de la compactación antes y después de la plantación, existe una disminución de la D_a y de la resistencia a la penetración del suelo y, a su vez, un aumento de la macroporosidad y número de raíces finas por metro cuadrado en el perfil del suelo.

La humedad aprovechable (HA) del suelo en los primeros 60 cm se presenta en la Figura 10, lo que permite seleccionar zonas de manejo diferenciado dentro del campo. Lo anterior es útil al momento de diseñar y manejar sistemas de riego. En general, el área de estudio presenta valores de HA superiores a 186 mm; sin embargo, también hay zonas donde existe variabilidad dentro del mismo potrero.

Así, la zona sur del área de estudio presenta valores que varían entre los 100 a 300 mm de humedad aprovechable, lo que significa una alta sectorización en el diseño. Por el contrario, se observa que en la zona norte del predio, existe una menor variabilidad de HA, lo que es favorable al momento de diseñar y manejar los sistemas de riego. La variación en la zona sur del predio, se debe a la variabilidad que existe en los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, atribuible a la presencia de texturas franco a franco arcilloso; estas, por sus características morfológicas, absorben y retienen altos contenidos de humedad.

Estudios en la región del Biobío indican que el porcentaje de agua retenida a 0,33 CC) y 1,5 MPa (PMP) puede variar respecto a su material de origen. Así, para los suelos de origen volcánico similares a los de este estudio, se indica que poseen una excelente agregación, con presencia de minerales amorfos de una alta capacidad de retención de agua. Se han encontrado valores de 0,51 y 0,25 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ para CC y PMP, respectivamente, en la primera estrata de suelos serie Arrayán, lo que concuerda con lo encontrado en el área de estudio (Vidal y del Canto, 1983).

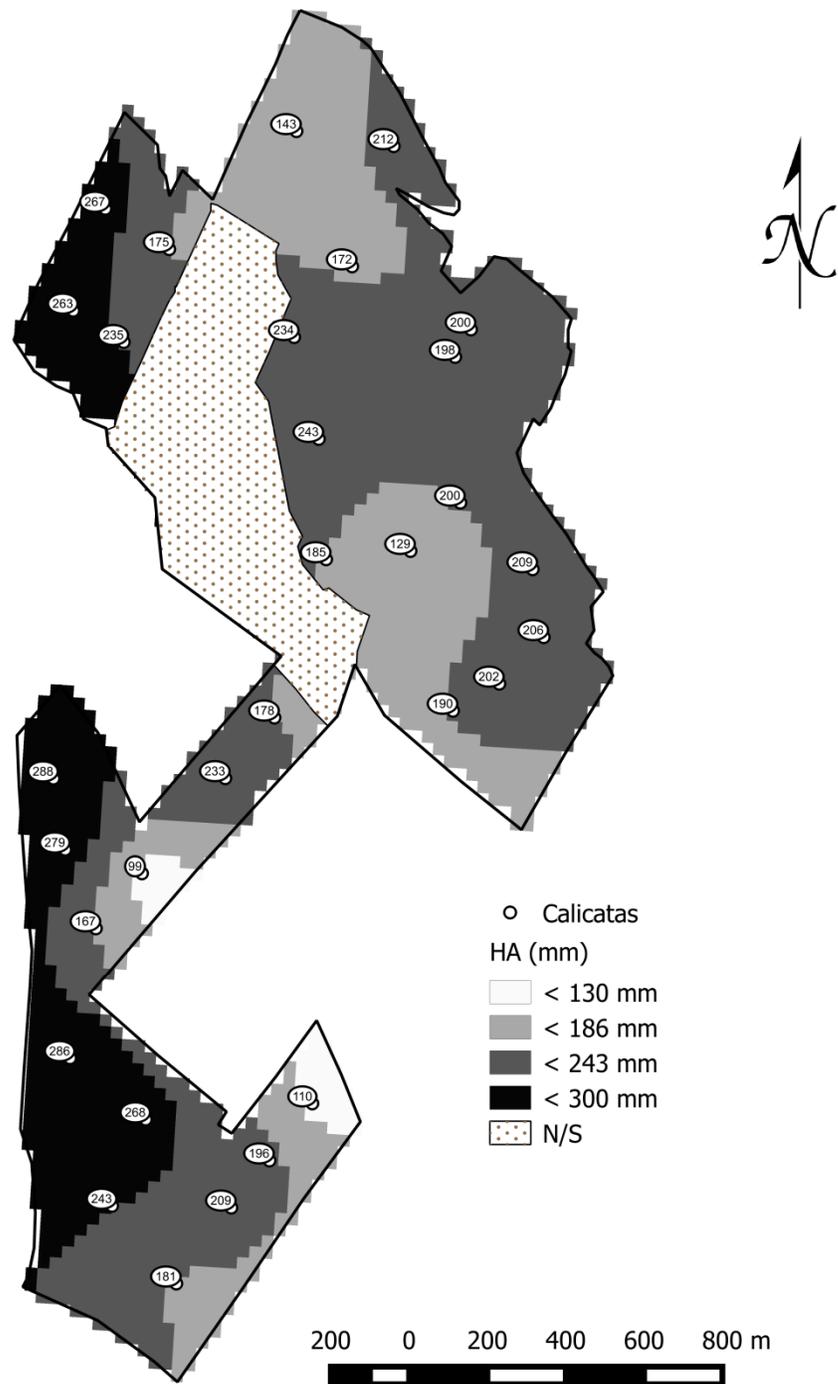


Figura 10. Humedad aprovechable del suelo (HA) categorizada de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran el porcentaje de arcilla, arena y limo, respectivamente, de la primera estrata en el área de estudio. Se observó que existen valores entre un 30 y 40% de arcilla en la zona norte del predio, que corresponden a los de mayor valor, disminuyendo su magnitud hacia la zona sur. El porcentaje de arena encontrado en la zona de estudio, en promedio, es superior al de arcilla y con una desviación estándar levemente inferior (Tabla 2). Los mayores valores en el porcentaje de arena se concentran en la zona norte y central del predio, disminuyendo en magnitud hacia el sur y varía desde un 15 % a un 40%. El mayor contenido de limo se sitúa en la zona sur del predio, y los menores porcentajes se encontraron en la zona norte del predio. Además, presentó los valores más altos, tanto para el valor promedio y su desviación estándar (Tabla 4), y esto también se observó en las estratas más profundas. Se observa además que, en profundidad, el porcentaje de partículas minerales de arcilla y limo disminuye, a diferencia del porcentaje arena que aumenta. Al respecto, Dörner *et al.* (2009) encontraron en un suelo andisol del sur de Chile valores similares a los de este estudio, indicando que en los primeros 20 cm el contenido de arcilla varía entre un 33% y 43%, y para el limo entre un 47% y un 59%.

Al analizar las relaciones entre las partículas minerales, se observó que existe una relación significativa ($p < 0,0001$) entre el contenido de arcilla y arena, no así entre el contenido de arena y limo ya que en este caso no existió una relación significativa ($p = 0,0817$). Por último, en el caso de la relación entre la arcilla y la arena la correlación de Pearson entregó un valor p de 0,2661, indicando que tampoco existe una relación significativa. Esto difiere a lo encontrado en suelos aluviales por Iqbal *et al.* (2005), los cuales indican que en ese tipo de suelos si existe una significativa correlación de Pearson entre el contenido de arena y arcilla para cada una de las estratas.

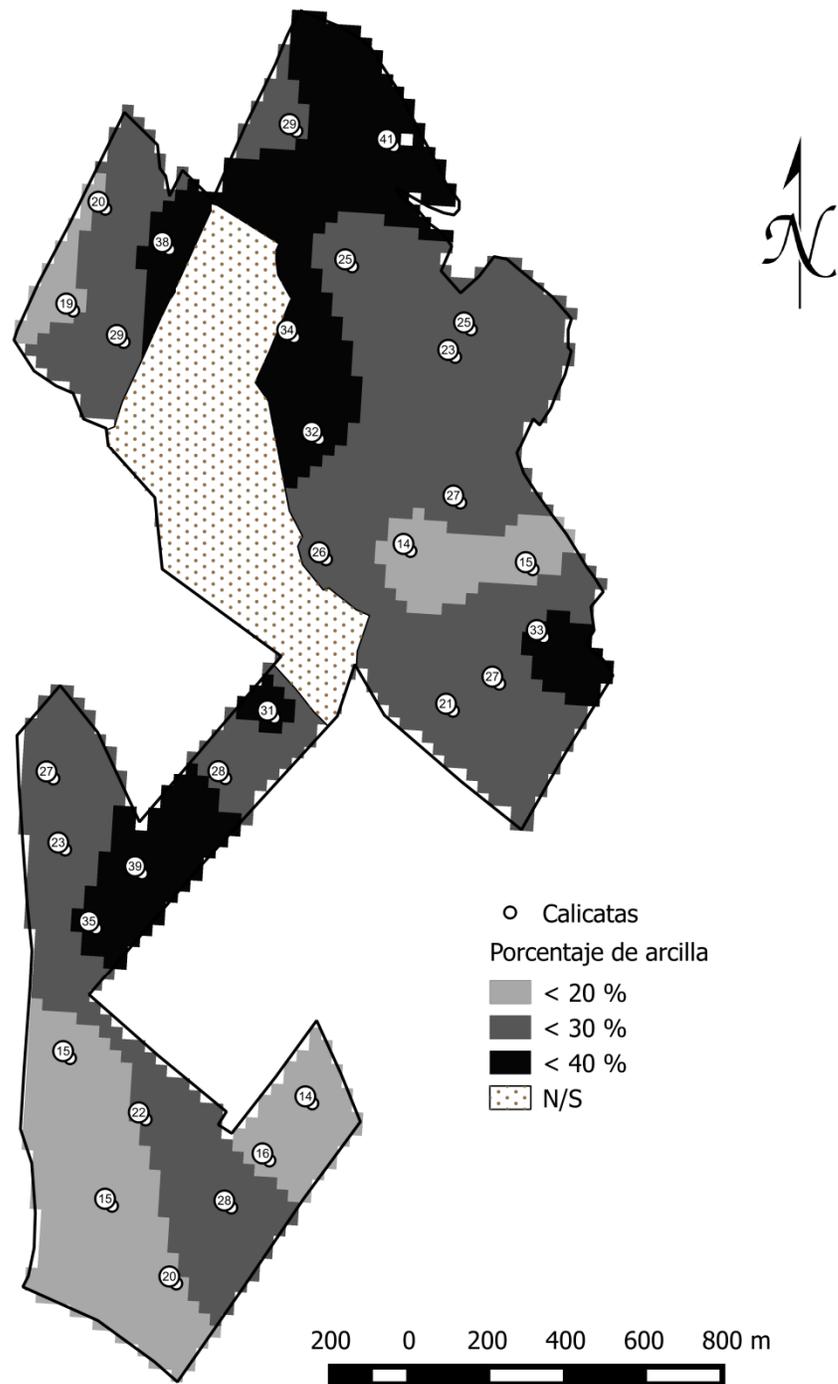


Figura 11. Porcentaje de arcilla categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.

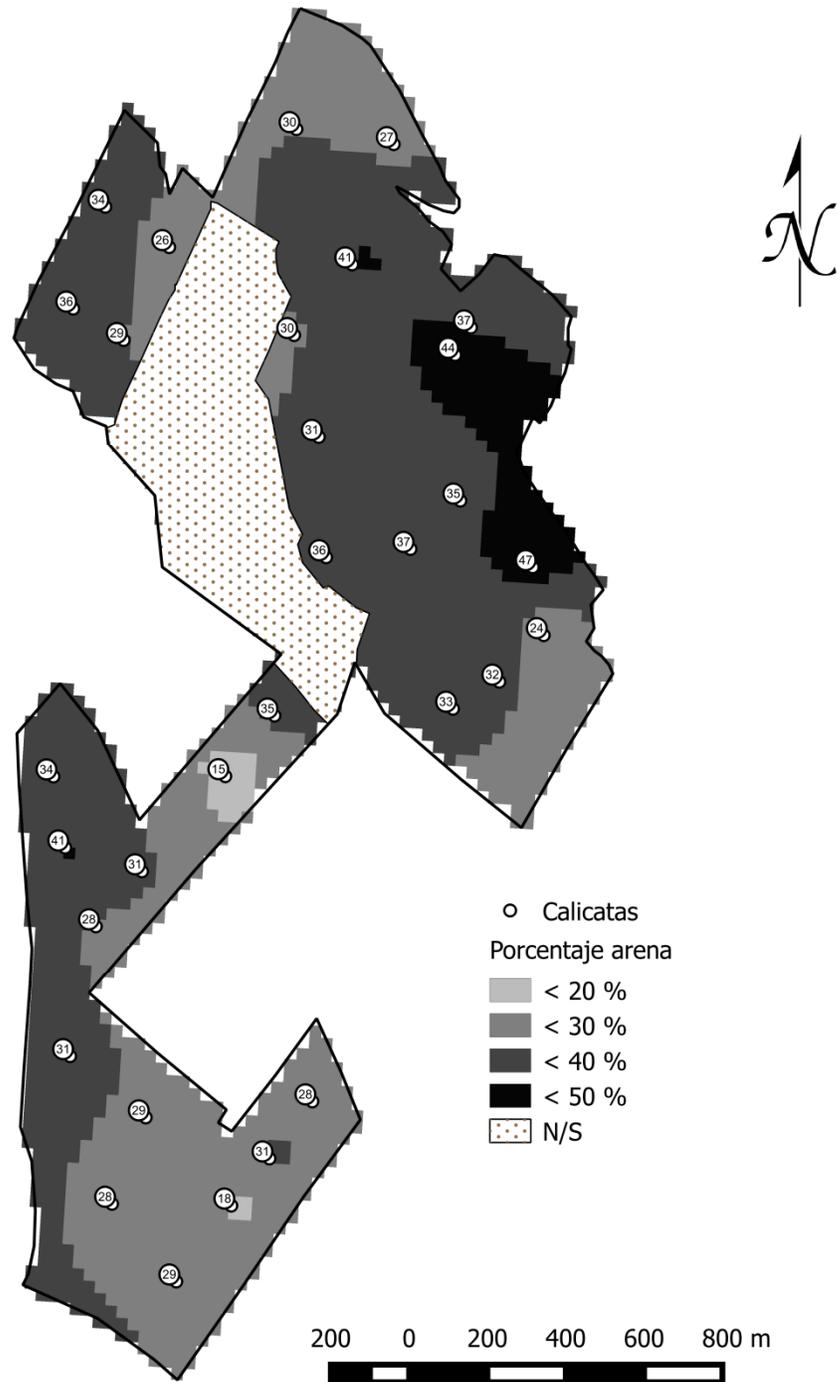


Figura 12. Porcentaje de arena categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.



Figura 13. Porcentaje de limo categorizado de la estrata superficial. Se muestra valor medido en cada calicata. N/S es no muestreado.

4.2. Características Hídricas del Suelos (SWC).

Al realizar la evaluación del modelo “Características Hídricas del Suelo”, se encontró una predicción con un alto error en su estimación, tanto para capacidad de campo (CC), como para punto de marchitez permanente (PMP) (Figura 14). Se observa en ambos casos que existe una subestimación de los valores por parte del modelo.

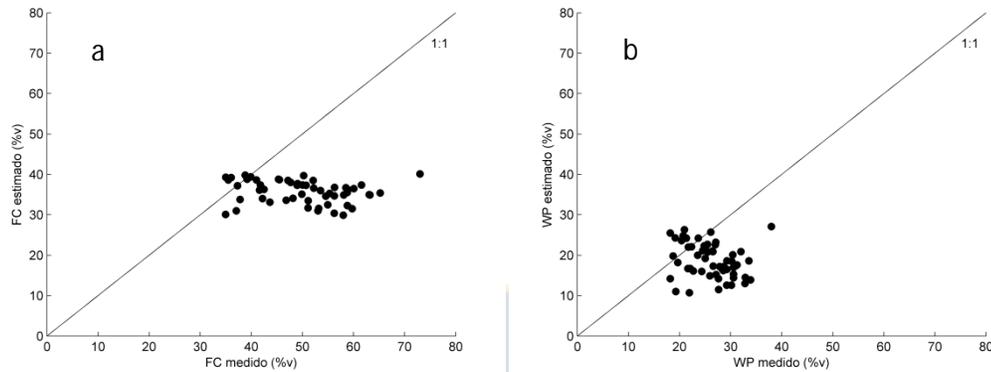


Figura 14. Capacidad de retención de agua medida y estimada con el modelo “Características hídricas del suelo”, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje. a) Capacidad de campo (FC), y b) punto de marchitez permanente (WP).

Debido a que la calidad en la predicción del modelo es deficiente, este se calibró obteniendo los coeficientes que muestra la Tabla 3, además de los coeficientes asociados a las funciones de pedrotransferencia originales.

Tabla 3. Coeficientes asociados a las funciones de pedrotransferencia^(*) original y calibradas.

Modelo	Coeficientes									
	a	A	b	B	d	D	e	f	g	h
Original 1 ^{ra} sol	0,299		0,251		0,20		0,011	0,006	-0,027	0,452
Calibrado 1 ^{ra} sol	43,22		0,0435		-0,1931		1,906	-0,0189	-0,0384	0,009
Original 2 ^{da} sol		1,283		-0,374		-0,015				
Calibrado 2 ^{da} sol		0,1117		-10,221		-280,86				
Original 1 ^{ra} sol	0,031		-0,024		0,487		0,006	0,005	-0,013	0,068
Calibrado 1 ^{ra} sol	24,0138		-0,0216		-0,1504		0,839	-0,0056	-0,0178	0,06
Original 2 ^{da} sol		0,0		0,14		-0,02				
Calibrado 2 ^{da} sol		0,2527		-12,272		-173,7102				

*Correspondientes a las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

En la Tabla 4 se observa la calidad en el ajuste del modelo original descrito en las ecuaciones 1, 2, 3, y 4. Por otro lado, al realizar la calibración de las ecuaciones y buscar nuevos coeficientes para el polinomio, se obtuvo una mejora en la capacidad de predicción, ya que todos los indicadores de la calidad del ajuste aumentaron. Sin embargo, esta mejora, no sería suficiente en la estimación debido a que existe una sobreestimación cuando los valores son inferiores a un 50%v, y subestimados cuando los valores son superiores (Figura 15 y 16).

Tabla 4. Bondad de ajuste del modelo original y su calibración para la predicción del contenido de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

Modelo	PMP				CC			
	R ²	Error	RMSE (%v)	RD (%)	R ²	Error	RMSE (%v)	RD (%)
Original	5,8	5934,3	10,29	39,17	3,4	16827,1	17,33	34,57
Original 1 ^{ra} sol	10,3	1037,1	4,30	16,38	10,4	3857,9	8,30	16,55
Original 2 ^{da} sol	12,6	1010,4	4,25	16,16	12,1	3783,3	8,22	16,39

* 1^{ra} sol corresponde al ajuste de las ecuaciones 2 y 4. 2^{da} sol corresponde al ajuste de las ecuaciones 1 y 3. RMSE es m³ m⁻³ expresado en %v.

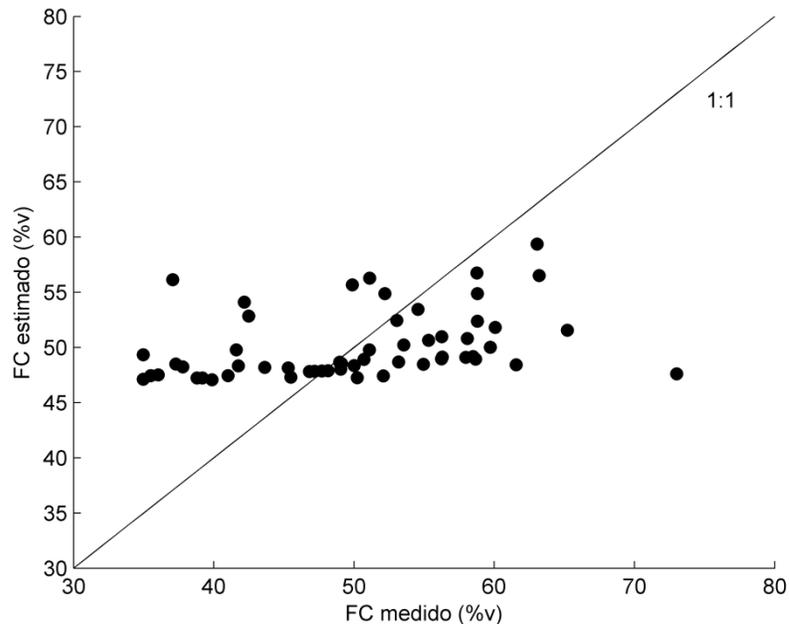


Figura 15. Capacidad de retención de agua a capacidad de campo (FC) medida y estimada con el modelo “Características hídricas del suelo”, m³ m⁻³, expresado en porcentaje.

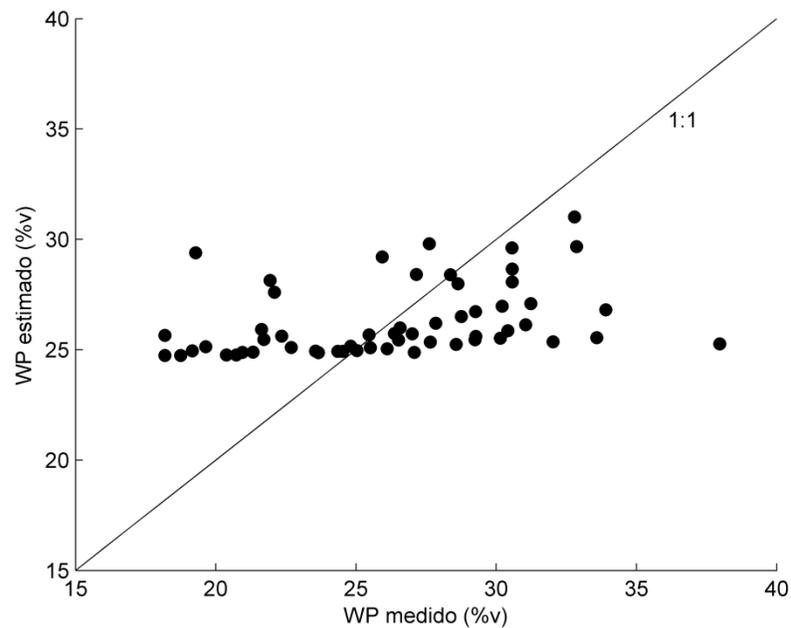


Figura 16. Capacidad de retención de agua a punto de marchitez permanente (WP) medida y estimada con el modelo “Características hídricas del suelo”, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.

Debido a lo anterior, se propone otro modelo de pedotransferencia para los suelos descritos en el área de estudio, del tipo cuasi polinomial en función de las variables densidad aparente, porcentaje de arcilla, arena y materia orgánica, el cual queda de la siguiente forma:

$$FC = \theta_{33} = [A(\theta_{33t})^2 + B(\theta_{33t}) + C] \quad \text{Ec. 8}$$

con

$$\theta_{33t} = a + b(1/S) + d(C) + e(OM) + f((1/S) * C) + g((1/S) * OM) + h(C * OM) + j(C^2) + k((1/S)^2) + l(OM^2) + m((1/Da)^2) + p((1/Da) * (1/S)) + q((1/Da) * C) + r((Da) * OM) + t((1/Da))$$

Ec. 9

donde FC es contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$) expresado en porcentaje, S y C es el contenido de arena (%) y arcilla (%), respectivamente, OM es el contenido de materia orgánica (%) y Da es la densidad aparente ($g cm^{-3}$).

Para el caso del punto de marchitez permanente las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$WP = \theta_{1500} = [A(\theta_{1500t})^2 + B(\theta_{1500t}) + C] \quad \text{Ec. 10}$$

con

$$\theta_{1500t} = a + b(1/S) + d(C) + e(OM) + f((1/S) * C) + g((1/S) * OM) + h(C * OM) + j(C^2) + k((1/S)^2) + l(OM^2) + m((1/Da)^2) + p((1/Da) * (1/S)) + q((1/Da) * C) + r((Da) * OM) + t((1/Da))$$

Ec. 11

donde WP es contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) expresado en porcentaje.

Cabe destacar que, para el caso del porcentaje de arena y la densidad aparente, se utilizó su inverso.

Luego de buscar el mejor ajuste a través del método de los mínimos cuadrados, se obtuvieron los coeficientes que muestra la Tabla 5, y al evaluar la calidad del ajuste para predecir el contenido de agua a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente se obtuvo la Tabla 6. Con el modelo propuesto, se obtuvo una aproximación con indicadores de calidad de ajuste más altos para la estimación de capacidad de campo, respecto al modelo original.

Caso contrario ocurrió en la estimación de punto de marchitez permanente, ya que sus indicadores de calidad de ajuste, fueron similares al modelo original calibrado (Tabla 6).

Las Figuras 17 y 18 muestran la comparación entre lo medido versus lo estimado con el modelo propuesto. Se puede observar también, en el caso de la estimación de capacidad de campo, que los valores se encuentran alrededor de la línea 1:1, existiendo una tendencia a que cuando los valores son inferiores al 50%v, el modelo tiende a sobreestimar, pero cuando los valores son mayores al 50%v, no existe una tendencia clara.

Tabla 5. Coeficientes asociados a las funciones de pedotransferencia propuestas^(*).

Coeficientes	PMP		CC	
	1 ^{ra} sol	2 ^{da} sol	1 ^{ra} sol	2 ^{da} sol
a	-108,0773		-215,52	
b	7900		5926,4	
d	1,5505		4,5304	
e	-0,8652		-26,5832	
f	-17,9341		-21,9786	
g	103,8796		85,9175	
h	0,0149		-0,378	
j	-0,0202		-0,0263	
k	-14825		-24829	
l	0,0079		0,0051	
m	161,1144		225,1538	
p	-8321,4		5872	
q	-0,4403		-1,3606	
r	-2,4768		-21,6389	
t	-3,2172		-2,2348	
A		0,0076		-0,0063
B		-0,1358		1,3888
C		24,3235		-3,2917

* Corresponde a las ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

Tabla 6. Bondad de ajuste del modelo propuesto para la predicción del contenido de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

Modelo	PMP				CC			
	R ²	Error	RMSE (%v)	RD (%)	R ²	Error	RMSE (%v)	RD (%)
1 ^{ra} sol	10,4	2300,0	6,41	24,39	43,7	2695,7	6,88	13,65
2 ^{da} sol	12,1	1016,8	4,26	16,21	44,1	25031,0	6,63	13,16

* 1^{ra} sol corresponde al ajuste de las ecuaciones 9 y 11. 2^{da} sol corresponde al ajuste de las ecuaciones 8 y 10. RMSE es m³ m⁻³ expresado en %v.

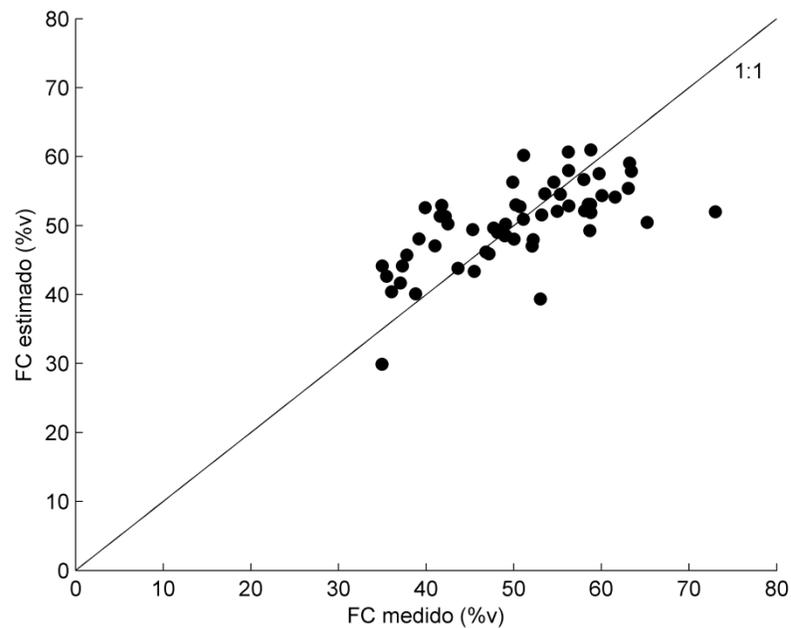


Figura 17. Capacidad de retención de agua a capacidad de campo (FC) medida y estimada con el modelo propuesto, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.

En el caso de la estimación del punto de marchitez permanente (Figura 18), se encontró una predicción deficiente del modelo, debido a que cuando los valores de contenido de agua son menores al 25%v, el modelo sobreestima, y cuando los valores son mayores al 25%v, el modelo subestima. Es por esto último, que el modelo para predecir el contenido de agua en punto de marchitez permanente es deficiente y presenta indicadores de calidad de ajuste deficientes.

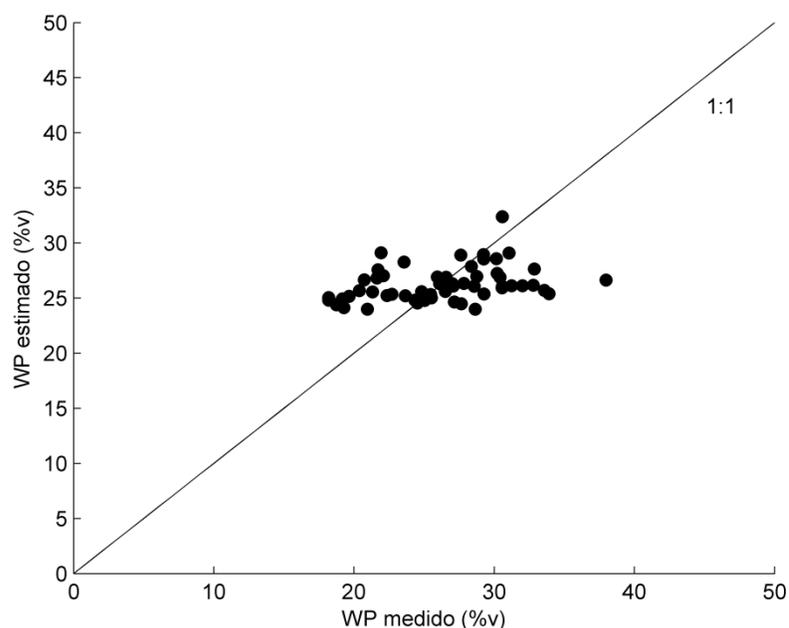


Figura 18. Capacidad de retención de agua a punto de marchitez permanente (WP) medida y estimada con el modelo propuesto, $m^3 m^{-3}$, expresado en porcentaje.

Con este modelo se busca aumentar la capacidad de predecir algunas características hidrofísicas de los suelos presentes en el estudio, y así no hacer uso de ecuaciones encontradas para suelos que difieren con nuestra realidad, que como se mostró anteriormente, tienen un alto error en la predicción. Sin embargo, estos modelos son aplicables al tipo de suelo presentes en el estudio, y susceptibles a ser mejorados.

4.3. Comparaciones

Al realizar las comparaciones entre los métodos de obtención de mapas, se observa que la clasificación de capacidad de uso, agrupa zonas que tienen una mayor variabilidad respecto a los mapas obtenidos con mediciones *in situ* (Tabla 7).

La Figura 19 y 20 muestra la comparación entre la categorización de los mapas obtenidos con dos metodologías. Se observa que para el caso de la comparación entre la densidad aparente y la clase de capacidad de uso (Figura 19), no existen diferencias en el valor de coeficiente de variación, esto debido a que, por ejemplo, la zona que ocupa la clase de capacidad de uso II, coincide con la densidad aparente; es decir, en este caso tienen igual heterogeneidad en la información entregada. Por otro lado el mapa de comparación entre la clase de capacidad de uso y la humedad aprovechable (Figura 20), si muestra diferencias entre ambos métodos. Por ejemplo, la zona que ocupa la clase de capacidad de uso II, tiene

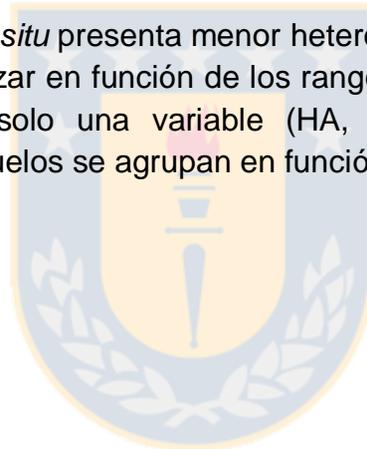
una alta heterogeneidad (CV = 19,7%, n=13) respecto a la información entregada por el mapa de humedad aprovechable (CV = 8,1%, n=6) para la misma zona (ver otras comparaciones en Anexo II).

Tabla 7. Promedio, desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente (Da) y la humedad aprovechable (HA) del suelo obtenidos con el método *in situ* (MIS) y la clase de capacidad de uso (CCU).

Indicador	MIS		CCU	
	Da (g cm ⁻¹)	HA (mm)	Da (g cm ⁻¹)	HA (mm)
Promedio	0,96	269,5	0,96	238,6
SD	0,04	21,8	0,04	47,0
CV (%)	4,16	8,1	4,16	19,7

* En el caso de la HA, los datos analizados para MIS y CCU corresponden a los valores obtenidos sobre 245 mm y la clase de capacidad de uso II, respectivamente. Por otro lado, los datos de la Da analizados para MIS y CCU corresponden a los valores obtenidos bajo 1,1 g cm⁻³ y la clase de capacidad de uso II, respectivamente.

En general, el método *in situ* presenta menor heterogeneidad en sus datos, debido a que se puede categorizar en función de los rangos que se requieran, y estos se agruparán respecto a solo una variable (HA, Da), no así en los estudios agrológicos, donde los suelos se agrupan en función de más de una variable.



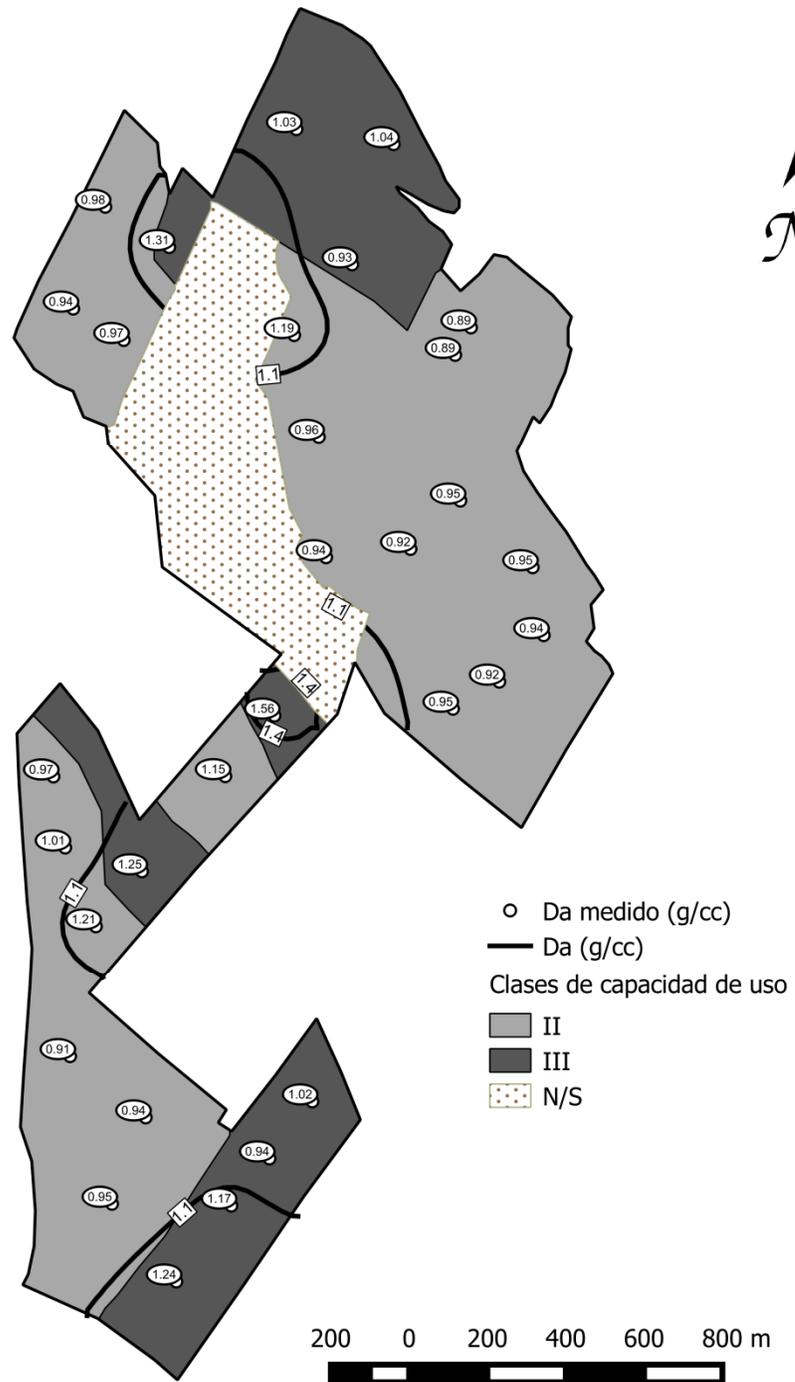


Figura 19. Clase de capacidad de uso y densidad aparente medida (Da) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la Da. N/S es no muestreado.

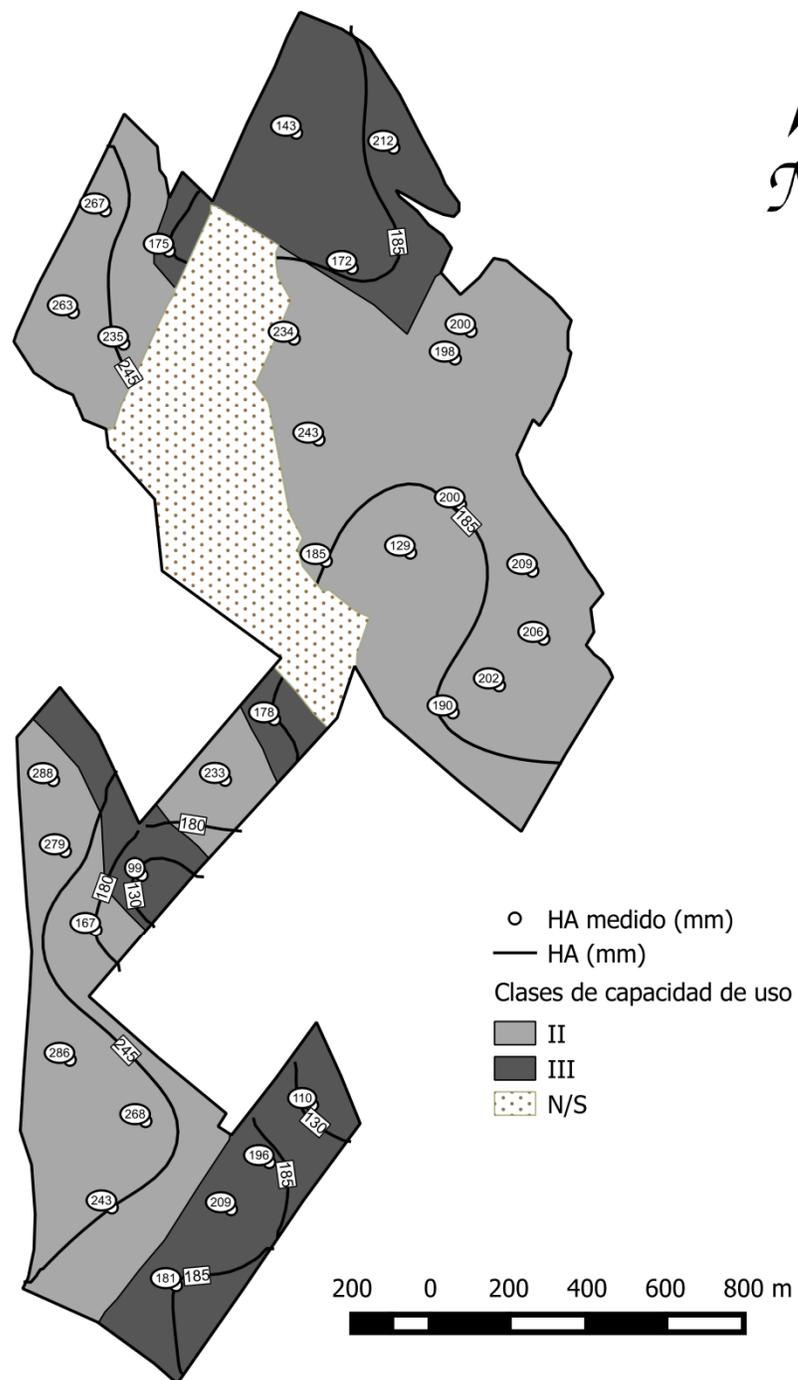


Figura 20. Clase de capacidad de uso y humedad aprovechable medida (HA) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la HA. N/S es no muestreado.

4.4. Costos.

Los costos asociados a cada una de las metodologías analizadas se observan en la Tabla 8. Estos costos corresponden a este estudio de caso, por lo cual los valores se calcularon para las 197 ha, que corresponden a la superficie que se encuentra con cultivos. Se desprende que al realizar un muestreo sistemático del predio (en el caso del estudio agrológico), es decir, indicar a priori un número de calicatas por unidad de superficie, el costo se eleva considerablemente por concepto hora de retroexcavadora (apertura de calicatas). Por el contrario, al realizar un análisis preliminar del suelo y, posteriormente, definir un número de calicatas acorde a la variación de suelo, existe una disminución considerable de costos.

Tabla 8. Comparación de costos de las tres metodologías descritas para 197 hectáreas ^(*).

Item	Costo (\$)		
	Estudio agrológico	Método <i>in situ</i>	SWC
Apertura de Calicatas	788.000	88.000	88.000
Análisis de suelo			
Densidad aparente	562.928	251.460	251.460
Retención de humedad (33 y 1500 kPa)	791.940	353.760	
Textura	623.505	278.520	278.520
Total	2.766.373	971.740	617.980
Costo/há	14.043	4.933	3.137

* El costo para el análisis de suelo se consideró para un perfil de suelo con 3 estratas, y los precios de mercado (Da = \$3810, Textura = \$4220, CC y PMP = \$5360, por muestra). Para el caso del estudio agrológico se consideró 1 calicata por hectárea y para el análisis de laboratorio una muestra por cada 4 há. Costo de operación de retroexcavadora se calculó con un costo de \$15.000/h, trabajando 8 h/día, con un rendimiento de 30 calicatas por día.

En el caso del costo asociado al análisis de las propiedades hidrofísicas del suelo, existen variaciones considerables entre los métodos. El método *in situ* tiene un costo de 35% del estudio agrológico. El método SWC tiene un costo de 22% del estudio agrológico. Estas diferencias estarían dadas principalmente por un uso adecuado de las horas de retroexcavadora y un análisis de suelo acorde a la variabilidad real del suelo, en ambos casos no existiría un análisis sistemático. Este análisis es consistente con lo descrito en la Tabla 1, donde se designó una

variabilidad para las zonas descritas como homogéneas, y se considera un área determinada por cada calicata.

De esta forma, el estudio de suelo con fines de diseño y manejo de riego realizado con el método *in situ* representaría un costo por unidad de superficie de \$4.933, un costo de \$3.137 / há si se tienen funciones de pedotransferencia, y por último un costo de \$14.043/ há para el caso del estudio agrológico.

4.5. Propuesta de metodología.

La Figura 21 presenta un diagrama de flujo con la metodología propuesta para obtener mapas de suelo con fines de diseño y manejo del riego. Se debe recopilar la mayor cantidad de información disponible y así tener una visión global del terreno. Por lo tanto la premisa que debiese existir como primer paso en un estudio de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego, es verificar la variabilidad del suelo con las herramientas disponibles: imágenes satelitales, análisis del paisaje, estudios de suelo anteriores, y muestreo preliminar con barreno.

Luego se debe monitorear con barreno para confirmar la información recopilada (series de suelo, presencia de limitantes), y así confeccionar mapas con zonas homogéneas. Posteriormente, se debe realizar un análisis de laboratorio para determinar las propiedades hidrofísicas de interés, o utilizar funciones de pedotransferencia para caracterizar el suelo, siempre y cuando estas funciones correspondan al tipo de suelo en estudio.

Una vez analizada la información, se confeccionan los mapas con las variables medidas o estimadas en terreno y se categoriza para tener una visión global del terreno.

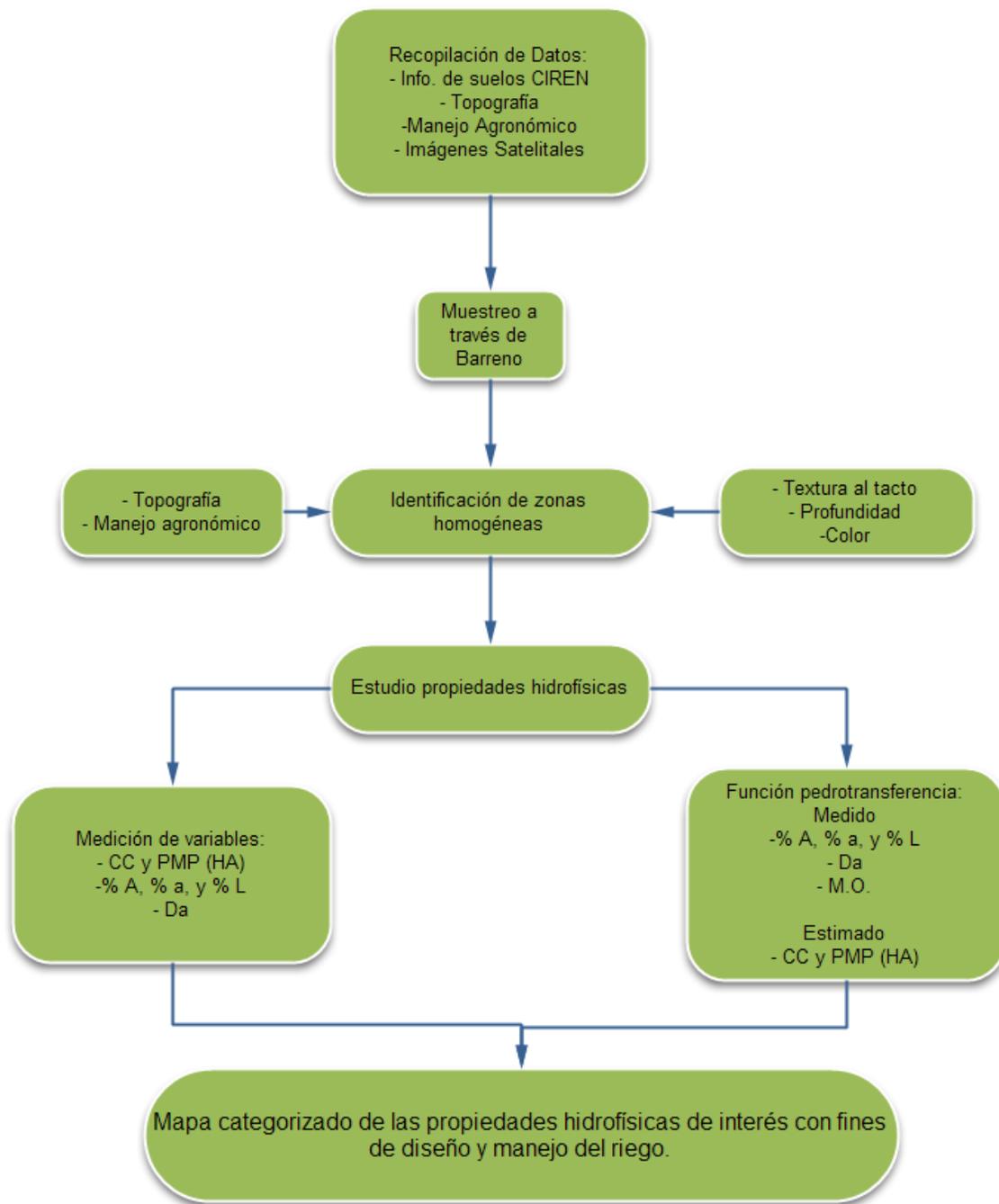


Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para obtener mapas de suelo con fines de diseño y manejo del riego.

V. CONCLUSIONES

Según los resultados de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

La metodología de SAG, entrega información necesaria, pero no suficiente, para la confección de mapas de suelo con fines de diseño y manejo de sistemas de riego, ya que esta información no describe el suelo desde el punto de vista hidrofísico.

La metodología *in situ* describe los suelos desde el punto de vista hidrofísico, permitiendo obtener mapas categorizados con índices de calidad de suelo, como lo es el contenido de arcilla, densidad aparente o capacidad de retención de humedad, que variarán en función del cultivo de interés y las características propias de los suelos.

Las funciones de pedotransferencia obtenidas son apropiadas para estimar el contenido de agua a capacidad de campo, y útiles cuando se dispone de datos limitados. En este caso, las funciones obtenidas describen de una manera apropiada las características de interés, sin embargo, se podrían mejorar en futuras investigaciones, principalmente las funciones que intentan predecir punto de marchitez permanente.

La metodología *in situ* presenta una menor heterogeneidad en los mapas obtenidos, lo que conlleva a la obtención de sitios más homogéneos. Además, tiene un costo menor debido a que se utilizan de mejor manera las horas de retroexcavadora necesarias para el estudio, y se realiza un muestreo acorde a la variabilidad del suelo. Por otro lado, las funciones de pedotransferencia disminuirían los costos.

Los datos básicos requeridos para un adecuado mapeo de suelo con fines de diseño y manejo del riego son los contenidos porcentuales de arcilla, arena y limo, densidad aparente, y retención de agua a 33 y 1500 kPa, sin embargo, si se obtienen funciones de pedotransferencia sólo se requerirían los primeros cuatro parámetros. La profundidad y las limitantes de los suelos se obtienen de la observación en terreno al momento de ejecutar el estudio.

La función de pedotransferencia obtenida describe adecuadamente el contenido de humedad del suelo a 33 kPa, dicha función puede ser utilizada exclusivamente en los suelos del tipo derivado de cenizas volcánicas similares a los de este estudio. Es de vital importancia conocer los modelos utilizados para la predicción de las

características hidrofísicas del suelo y no utilizar modelos obtenidos en suelo diferentes a los de interés.

La metodología propuesta permite obtener mapas de suelo con fines de diseño y manejo del riego, teniendo una mirada más integradora y global, la cual permite minimizar los costos asociados y utilizar de mejor forma los recursos.



VI. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, A. y Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29: 85-94

Andreu, L., Hopmans, J. and Schawankl, L. 1997. Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. *Agric. Water Manag.* 35(1-2): 123-146.

Casanova, M. 2010. Estudios de Suelo. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 29 p.

CIREN. 1999. Descripción de materiales y símbolos. Estudio Agroecológico VIII región. Tomo 1. 288 p.

Dörner, J., Dec, D., Peng, X. and Horn, R. 2009. Effect of land use on structural stability and pore function of an Andisol (Typic Hapludand) in southern Chile. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 9(3): 190-209.

English, M. J., K. H. Solomon and G. J. Hoffman. 2002. A paradigm shift in irrigation management. *J. Irrig. Drain. Engin.* 128 (5): 267-277.

Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Golhamer, D. and Cohen, M. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agr. Water Manag.* 54 (2): 107-122

Hengl, T. 2009. A practical guide to geostatistical mapping. 2° Ed. University of Amsterdam. Amsterdam, Nederland. 291 p.

Holzapfel, E. 2010. Manejo de agua y contaminación. En: Holzapfel, E. y Arumí, J. (Eds) *Tecnología de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable*. Editorial Universidad de Concepción. Chile. Pp: 41 – 71.

Iqbal, J.; Thomasson, J.; Jenkins, J.; Owens, P.; Whisler, F. 2005. Spatial variability analysis of Soil Physical Properties of Alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69 (4):1338–1350

Rabbi, S., Roy, B., Miah, M., Amin, M., and Khandakar, T. 2014. Spatial variability of physical soil quality index of an agricultural field. *Applied and environmental soil science*, article ID 379012, 10 pages, 2014. doi: 10.1155/2014/379012

Reynolds, W., Yang, X., Drury, C., Zhang, T., and Tan, C. 2003. Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 83 (4): 381- 393

Rivera, D., Granda, S., Arumí, J., Sandoval, M. and Billib, M. 2012. A methodology to identify representative configurations of sensors for monitoring soil moisture. *Environ. Monit. Assess.* 184 (11): 6563-6574.

SAG. 2001. Pauta para estudios de suelo. División de Protección de los Recursos Naturales Renovables. Servicio Agrícola y Ganadero. MINAGRI. Santiago, Chile. 21p.

Santis, G. 2005. Mapa de reconocimiento de los suelos de la Región del Bio Bio (Sector Norte). Tesis Ing. Agr. Univ. de Chile. Fac. De Ciencias Agronómicas. Chile. 84 p.

Saxton, K. and Rawls, W. 2006. Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (5): 1569-1578.

Selles, G., Ferreyra, R., Ruiz, R., Ferreyra, R., y Ahumada, R. 2012. Compactación de suelos y su control. Estudio de casos en el Valle de Aconcagua. 53 p. Boletín INIA N° 234. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile.

Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18, Washington, DC, USA.

Soto, M. 2007. Evaluación y programación de un sistema de riego por goteo en arándanos (*Vaccinium sp.*). Agrícola Santa Catalina, Ñuble, VIII Región. Tesis Ing. Civ. Agr. Univ. de Conce. Facultad de Ingeniería Agrícola. Chile. 72 p.

Stolpe, N. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII región de Chile. Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile. 84 p.

Thompson G., Spies L., and Krider J. 1981. Farm resources and systems selection. In: M. E. Jensen (ed.) *Design and operation of farm irrigation systems*. ASAE. St. Joseph, Michigan, USA. Pp. 45 – 73.

Tobler W., (1970) A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2): 234-240.

USDA - Soil Survey Staff. 2009. Soil Taxonomic. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U.S. of Department of

Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2° ed. Washington D.C. 871p.

Vidal, I. y del Canto, P. 1983. Propiedades físicas de los suelos del Ñuble, VII Región. Agricultura Técnica 43(3): 195-202.

Vidal, I. 1997. Naturaleza y propiedades del suelo. Manual de Prácticas. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Dpto de Suelos. Chillán, Chile.



ANEXO I



Series de suelo presentes en el predio.

Serie Arrayán

Símbolo cartográfico: AYN

La serie Arrayán es un miembro de la Familia media térmica de los Typic Melanoxerands (Andisol).

Son suelos formados a partir de cenizas volcánicas recientes, depositadas sobre un sustrato no relacionado constituidos por tobas, materiales fluviales, y materiales fluvioglaciales que se presentan compactados, pero no cementados y que son lentamente permeables. Son suelos muy profundos, bien drenados, de texturas medias con dominancia de la clase textural franco limosa, bien estructurados en superficie, con abundante porosidad asociada a un buen arraigamiento en todo el pedón. Se ubica en topografía plana o casi plana, tiene una permeabilidad moderada y un escurrimiento superficial lento.

Fases de la Serie Arrayán.

AYN/1.

Corresponde a suelos de la clase textural superficial franco limosa, profunda, casi plana con 1 a 3% de pendiente y bien drenada. Se clasifica en:

Capacidad de Uso I, Categoría de Riego 1, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 5, Aptitud Frutal A, y Aptitud Agrícola 1.

AYN/2.

Corresponde a la fase de clase textural superficial franco limosa, profunda, casi plana con 1 a 3% de pendiente y bien drenada. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIe1, Categoría de Riego 2t, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 5, Aptitud Frutal A, y Aptitud Agrícola 2.

AYN/3.

Corresponde a la fase de clase textural superficial franco limosa, moderadamente profunda, ligeramente inclinada con 1 a 3% de pendiente y drenaje moderado. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIw2, Categoría de Riego 2w, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 4, Aptitud Frutal B, y Aptitud Agrícola 2.

AYN/4.

Corresponde a la fase de clase textural superficial franco limosa, moderadamente profunda, ligeramente inclinada con 1 a 2% de pendiente y bien drenada. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIs1, Categoría de Riego 2t, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje

Serie Gallipavo.

Símbolo Cartográfico: GAL

La serie Gallipavo es un miembro de la familia franca fina mixta térmica de los Humic Endoaquaps (Inceptisol).

Son suelos derivados de cenizas volcánicas cuya evolución se ha visto afectada por un exceso de humedad en los pedones durante una parte importante del año. Los materiales del suelo descansan sobre un substrato de tobas o ignimbritas extremadamente duras. Ocasionalmente ellas son reemplazadas por materiales fluvio-glaciales fuertemente alterados, de textura arcillosa. Los suelos se ubican en una topografía plana o plano cóncava. Suelos moderadamente profundos o profundos, imperfectamente drenados y de escasa porosidad. La permeabilidad es moderadamente lenta y el escurrimiento superficial es moderadamente lento.

Fases de la Serie Gallipavo.

GAL/1.

Corresponden a suelos de clase textural superficial franca, moderadamente profundos, topografía plana a plano cóncavo, con pendientes de 0 a 2% y de drenaje imperfecto. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIw2, Categoría de Riego 3w, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 3, Aptitud Frutal E, y Aptitud Agrícola 3.

GAL/2.

Corresponde a la Fase de clase textural superficial franca, moderadamente profunda, ligeramente inclinada con 1 a 2 % de pendiente y de drenaje imperfecto. El nivel freático en verano se mantiene alrededor de los 70 cm. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIw3, Categoría de Riego 3w, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 3, Aptitud Frutal E, y Aptitud Agrícola 3.

Serie Mebuca.

Símbolo Cartográfico: MBU

La serie Mebuca es un miembro de la Familia arcillosa mixta térmica de los Aquic Haploxerolls (Mollisol).

Son suelos desarrollados sobre unidades geomórficas denominadas Abanico de San Carlos (sector sur oriente) y Abanico de Chillán, ocupando en ellas las posiciones bajas, planas o plano cóncavas, sólo ligeramente por encima de la variante aluvial de la Serie Quilmén. Son suelos moderadamente profundos, de drenaje imperfecto, que descansan sobre gravas, piedras y materiales franco arcillo arenoso. La permeabilidad es lenta y el escurrimiento superficial moderadamente rápido.

Fases de la Serie Mebuca.

MBU/1.

Corresponde a suelos de clase textural superficial franca, moderadamente profundos, planos con 0 a 1% de pendiente y de drenaje imperfecto. Incluye suelos moderadamente profundos, de drenaje imperfecto y suelos delgados. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIw2, Categoría de Riego 3w, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 3, Aptitud Frutal D, y Aptitud Agrícola 3.

MBU/2.

Corresponde a la Fase de clase textural superficial franca y franco arcillosa, delgada, ligeramente inclinada con 1 a 2 % de pendiente, de drenaje imperfecto. Incluye suelos moderadamente profundos de drenaje imperfecto y suelos delgados, pero bien drenados. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIw2, Categoría de Riego 3w, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 3, Aptitud Frutal D, y Aptitud Agrícola 3.

Serie Chacayal.

Símbolo de la Serie Chacayal: CYL

La serie Chacayal es un miembro de la Familia franca gruesa mixta térmica de los Andic Xerochepts (Inceptisol).

Son suelos desarrollados principalmente en la unidad geomorfológica denominada abanico de Chillán donde ocupan las partes altas y más convexas de la topografía. Suelo de buen arraigamiento y abundante macroporosidad, con substrato de gravas y piedras en una matriz franco arenosa fina. Topografía plana a ligeramente inclinada, de permeabilidad rápida y escurrimiento superficial lento.

Fases de la Serie Chacayal.

CYL/1.

Corresponde a suelos de clase textural superficial franco limosa, delgados, ligeramente inclinados, con 1 a 2 % de pendiente y bien drenados. Incluye suelos moderadamente profundos y de drenaje moderado a bueno. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIs0, Categoría de Riego 3s, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 5, Aptitud Frutal D, y Aptitud Agrícola 3.

CYL/2.

Corresponde a la fase de textura superficial franco limosa, delgada casi plana, con 1 a 3 % de pendiente, con abundante pedregosidad superficial y bien drenada. Está constituida por suelos que tienen entre 15 a 35 cm de profundidad al substrato. Incluye suelos con textura superficial franco arenosa fina o muy fina. El contenido de piedras afecta la superficie y el pedón. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IVs0, Categoría de Riego 4s, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 5, Aptitud frutal E, y Aptitud Agrícola 4.

CYL/3.

Corresponde a la Fase de textura superficial franco limosa, muy delgada, ligeramente inclinada con 1 a 2 % de pendiente y excesivamente drenada. Incluye suelos de topografía ligeramente ondulada, delgados. Se clasifica en:

Capacidad de uso IVs0, Categoría de Riego 4s, Erosión Actual 0, Clase de Drenaje 6, Aptitud Frutal E, y Aptitud Agrícola 4.

Serie Talquipén.

Símbolo Cartográfico: TQP

La serie Talquipén es un miembro de la Familia franca fina mixta de los Ultic Haploxerolls (Mollisol).

Son suelos desarrollados sobre la unidades geomorfológicas denominadas Abanico de San Carlos y Abanico de Chillán, ocupando en ellos una posición plana y ligeramente convexo, por encima de la Serie Mebuca y al mismo nivel que las Series Chacayal y Arrayán. Son suelos ligera a moderadamente profundos, bien drenados. El suelo descansa sobre un substrato de gravas, y piedras descompuestas con matriz franco arcillosa, franca, a franca arenosa. La permeabilidad es moderadamente lenta y el escurrimiento superficial moderado.

Fases de la Serie Talquipén.

TQP/1. Corresponden a suelos de clase textural superficial franco arcillosa, ligeramente profundos, ligeramente inclinados con 1 a 2 % de pendiente, bien drenados. Incluye suelos moderadamente profundos y bien drenados y delgados. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIs0, Categoría de Riego 3s, Erosión Actual 0, Clase de drenaje 5, Aptitud Frutal D, y Aptitud Agrícola 3.

TQP/2. Corresponden a la Fase de clase textural superficial franco arcillosa, moderadamente profunda, ligeramente inclinados con 1 a 2 % de pendiente, bien drenados. Incluye suelos de drenaje imperfecto, suelos delgados, y bien drenados. Se clasifica en:

Capacidad de Uso IIIs0, Categoría de Riego 2s, Erosión Actual 0, Clase de drenaje 5, Aptitud Frutal B, y Aptitud Agrícola 2.

TQP/3. Corresponden a la Fase de clase textural superficial franco arcillosa, moderadamente profunda, ligeramente inclinados con 1 a 2 % de pendiente, y drenaje moderado. Se clasifica en:

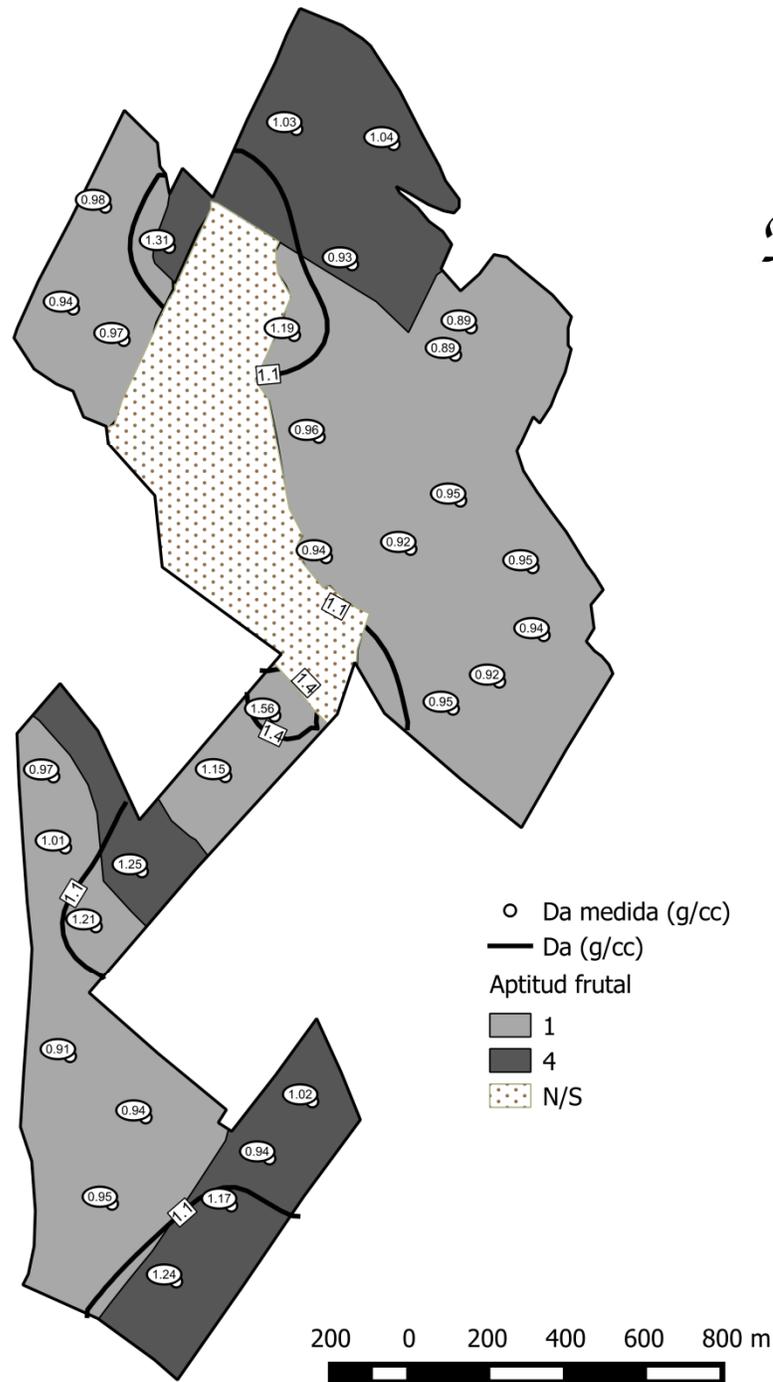
Capacidad de Uso IIw2, Categoría de Riego 2w, Erosión Actual 0, Clase de drenaje 4, Aptitud Frutal B, y Aptitud Agrícola 2.

TQP/4. Corresponden a la Fase de drenaje imperfecto, de clase textural superficial franco arcillosa, moderadamente profunda y plana. Son suelos similares a la Serie, que muestran problemas de humedad restrictivos y que se presentan en una topografía plana. Se clasifica en:

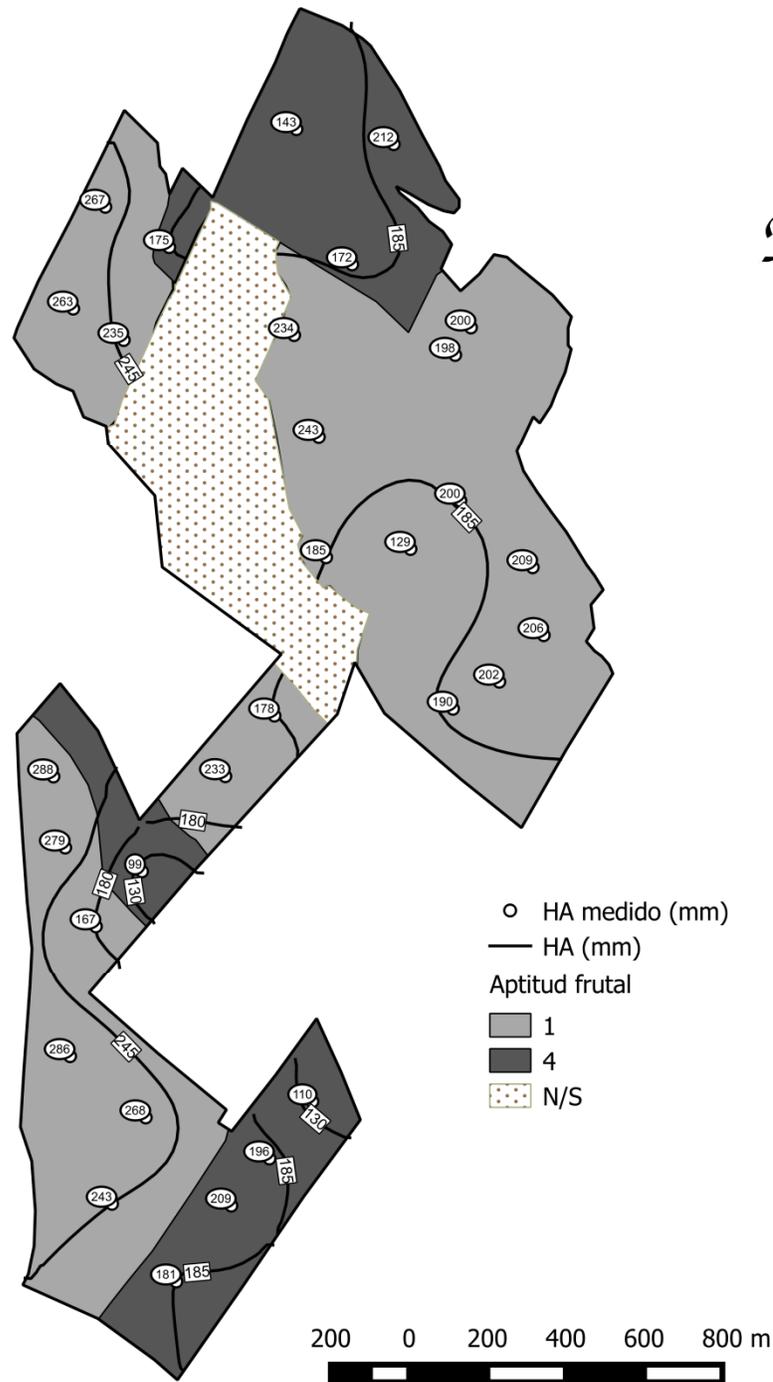
Capacidad de Uso IIIw2, Categoría de Riego 2w, Erosión Actual 0, Clase de drenaje 3, Aptitud Frutal D, y Aptitud Agrícola 3.

ANEXO II

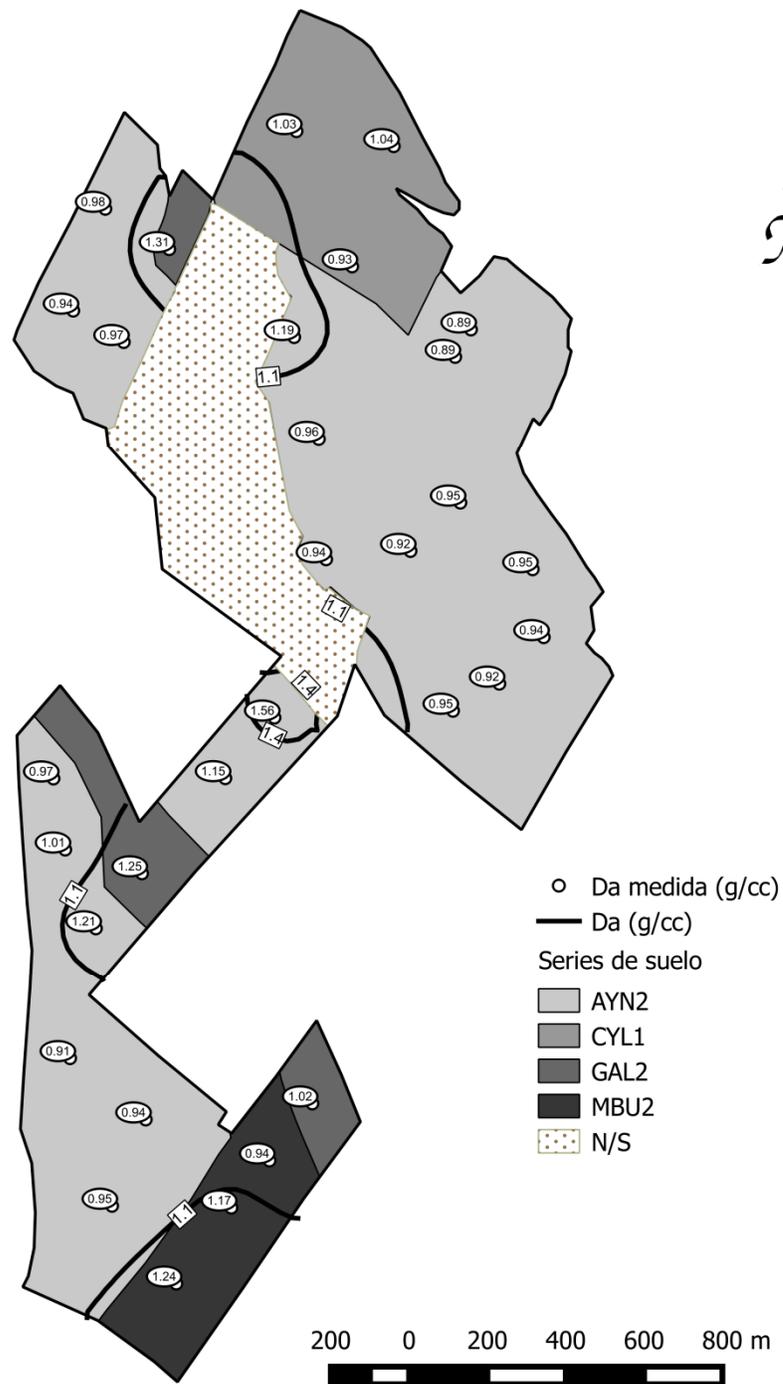




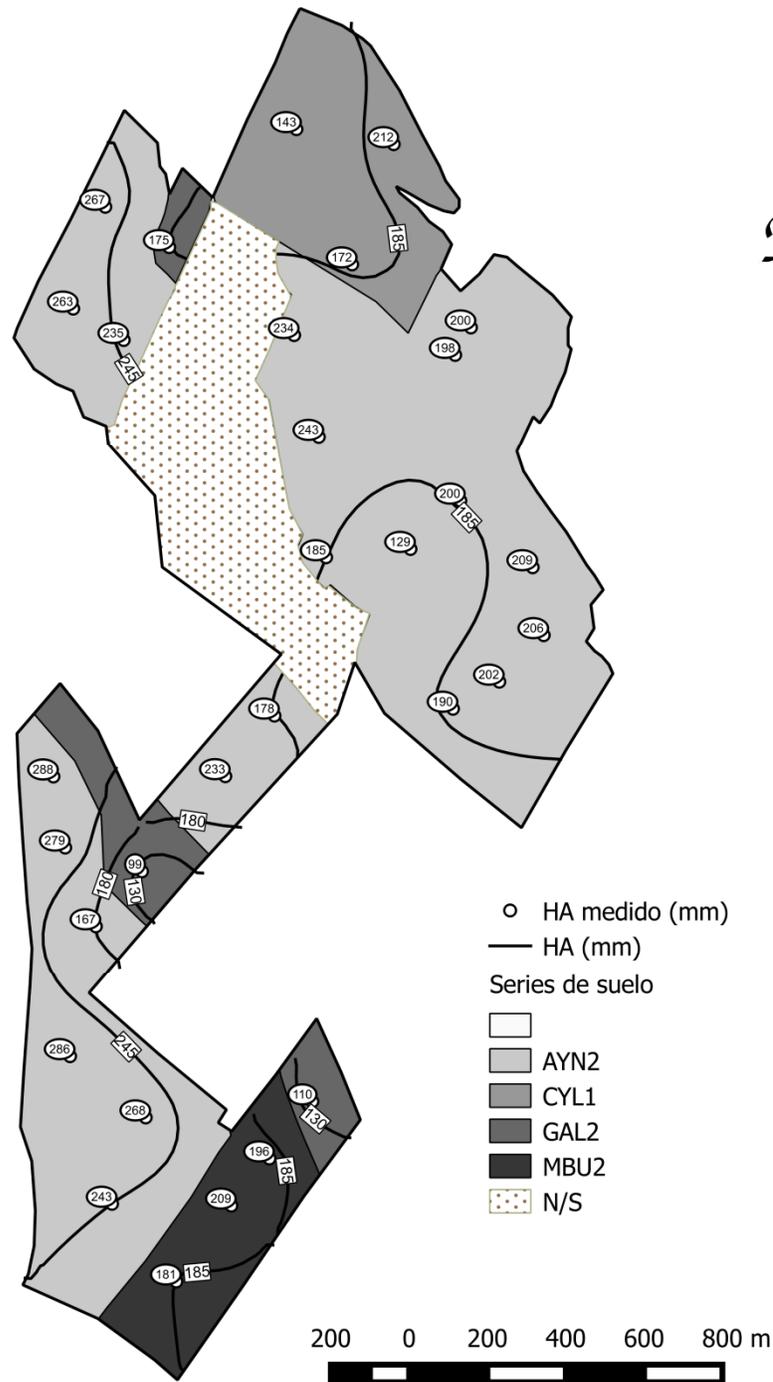
Aptitud frutal y densidad aparente medida (Da) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la Da. N/S es no muestreado.



Aptitud frutal y humedad aprovechable medida (HA) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la HA. N/S es no muestreado.



Series de suelo y densidad aparente medida (Da) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la Da. N/S es no muestreado.



Series de suelo y humedad aprovechable medida (HA) en cada calicata. Línea continua representa el límite de la categorización de la HA. N/S es no muestreado.