
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Concepción del Uruguay
Maestría en Ingeniería Ambiental

**Impacto de las plantaciones de *Eucalyptus grandis*
sobre el contenido de humedad del suelo.
Análisis de un caso en el Noreste de la Provincia de
Entre Ríos**

Tesis presentada para el grado de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesista: Ing. Eduardo Antonio Torrán
Director: Dr. Ing. Juan Carlos Jesús Piter
Co Director: Mag. Lic. Luis Alberto Muñoz

Concepción del Uruguay, Diciembre de 2007

A mis hijos **Micaela y Emiliano**,
a mi esposa **Elvira**,
a mis padres **Hortencia y Héctor**,
por amor a ellos vale la pena intentar mejorar cada día

AGRADECIMIENTOS

Siempre resulta difícil agradecer a aquellas personas que han colaborado con un proceso, con un trabajo, porque nunca alcanza el tiempo, el papel o la memoria para mencionar o dar con justicia todos los créditos y méritos a quienes se lo merecen.

Partiendo de esta limitación y diciendo de antemano MUCHAS GRACIAS a todas las personas que de una u otra manera han colaborado en el desarrollo de esta tesis, deseo agradecer especialmente a:

- La Facultad Regional C. del Uruguay, a sus autoridades, al Departamento de Ingeniería Civil, por la colaboración y marco brindado para su desarrollo.
 - Los propietarios de las forestaciones utilizadas, Sr. Cesar Bovino y Juan Paul, por la confianza brindada y permitirme realizar los trabajos de campo.
 - Mis compañeros de trabajo Alexandra y Fabio, por su colaboración administrativa y técnica ante cada requerimiento.
 - Las alumnas y alumnos becarios, por su colaboración en las actividades de campo y laboratorio.
 - Mi familia por su constante apoyo y colaboración.
 - Al Co-Director de la tesis el Mag. Lic. Luis Alberto Muñoz, por sus aportes y apoyo técnico.
 - Finalmente deseo decir un especial MUCHAS GRACIAS a mi Director de tesis el Dr. Ing. Juan Carlos Piter, por su insistencia en abordar este desafío, por su permanente contribución en cada etapa del trabajo, por su dedicación y aporte intelectual y por el ejemplo brindado ante cada uno de los requerimientos planteados.
-

Resumen

Esta tesis plantea dos objetivos relacionados al impacto ambiental que producen las forestaciones de *Eucalyptus grandis* en el Noreste de Entre Ríos:

Determinación del contenido de humedad del suelo en dos forestaciones de Eucalyptus grandis implantadas en sitios característicos de la región, y análisis de su variación en función de tres variables independientes: la distancia a la frontera de la plantación, la profundidad y la época del año,

Determinación del contenido de humedad del suelo en una forestación de Eucalyptus grandis y en una Pinus taeda, ambas con similar edad y ubicadas en un mismo sitio característico de la región, y análisis de su variación en función de las mismas variables independientes ya nombradas.

Para alcanzar estos objetivos, se diseñó una investigación empírica en dos forestaciones de *Eucalyptus grandis* y en una de *Pinus taeda*. Las plantaciones de la primera especie exhiben diferentes edades y a su vez se ubican sobre dos sitios

característicos de la región pero con diferentes perfiles, lo cual resulta apropiado para el logro del primer objetivo. Por su parte, para dar cumplimiento al segundo objetivo se capitalizó la existencia de una forestación de *Pinus taeda* junto a una de las anteriormente mencionadas de *Eucalyptus grandis*, la cual, además de estar ubicada sobre el mismo sitio en forma adyacente a la otra, presenta una edad similar.

Se calculó el contenido de humedad en las muestras de suelo, extraídas entre Junio de 2006 y Junio de 2007, empleando el método gravimétrico. Las características del perfil del terreno se obtuvieron a partir del estudio de las mismas muestras obtenidas para determinar el contenido de humedad, y, cuando se consideró necesario, se confirmaron a través de la realización de calicatas. Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional.

Los resultados y su discusión permiten conocer las variaciones del contenido de humedad del suelo en función de las tres variables independientes antes mencionadas. El contenido de agua del terreno bajo la cobertura de *Eucalyptus grandis* fue levemente mayor que el encontrado bajo la de *Pinus taeda*. Los resultados también indican que la cantidad de agua contenida en el suelo fue suficiente para un normal desarrollo de las plantas en los casos analizados.

Palabras clave: Contenido de humedad del suelo, método gravimétrico, *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda*, aspectos ambientales de las forestaciones.

Abstract

The thesis addresses two goals related to the environmental impact of *Eucalyptus grandis* forests in the north-east region of Entre Ríos Province:

Determination of the soil moisture content in two plantations of Eucalyptus grandis located in typical sites of the region, and analysis of its variation as a function of three independent variables: the distance to the plantation border, the depth and the period of the year.

Determination of the soil moisture content in a plantation of Eucalyptus grandis and in another one of Pinus taeda, both exhibiting similar age and located in a typical site of the region, and analysis of its variation as a function of the same variables mentioned before.

For this purpose an empirical research project enclosing two plantations of *Eucalyptus grandis* and one of *Pinus taeda* was designed. The plantations of *Eucalyptus grandis* exhibit different ages and are located in two sites with unlike

characteristics even though they are typical for the region, which is suitable for achieving the first goal. A plantation of *Pinus taeda*, that exhibits similar age to one of the *Eucalyptus grandis* and is located next to it, was utilised to reach the second aim.

Soil samples were taken between June 2006 and June 2007 and water content was determined according to the gravimetric method. Soil layers were analysed through the samples mentioned before and, when necessary, testing pits were made. Determinations were carried out at Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional.

Results and their discussion allow to know the variation of soil moisture content as a function of the three independent variables mentioned before. Soil water content under the plantation of *Eucalyptus grandis* was slightly higher than that found under that of *Pinus taeda*. Results also show that in all the analysed cases the soil water content was enough for a normal growth of plants.

Key words: Soil water content, gravimetric method, *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda*, Environmental aspects of forestry.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Presentación del tema	1
1.2	Objetivos	7
1.3	Estructuración de la tesis	7
2	Las forestaciones y el medio ambiente	9
2.1	El Eucalyptus y el medio ambiente	10
2.2	El suelo y las forestaciones	13
2.3	El agua y los cultivos	29
2.4	Influencia de las forestaciones en el ciclo del agua	35
3	Programa experimental	38
3.1	Selección de los sitios y planificación de los sondeos	39
3.2	Descripción del clima y del perfil del suelo	44

3.3	Obtención y preparación de las muestras	47
3.4	Determinaciones efectuadas en el laboratorio	51
3.5	Tratamiento estadístico de los resultados	53
4	Presentación y discusión de los resultados	54
4.1	Resultados relacionados al primer objetivo	59
4.1.1	Resultados para el sitio a	60
4.1.2	Resultados para el sitio b	74
4.2	Resultados relacionados al segundo objetivo	85
5	Conclusiones	98
5.1	Conclusiones relacionadas al primer objetivo	100
5.2	Conclusiones relacionadas al segundo objetivo	103
5.3	Nuevas investigaciones y análisis crítico de la metodología empleada	104
	Bibliografía	107

1 Introducción

1.1 Presentación del tema

Importancia del Eucalyptus en la región

Al género *Eucalyptus* pertenecen más de 700 especies y variedades originarias casi exclusivamente de Australia (Brown A. G. & Hillis 1978; INTA 1995). Fue introducido con fines comerciales y ornamentales en numerosos países del mundo, en las más diversas condiciones ambientales, a las cuales ha logrado adaptarse (Associação Brasileira de Produtores de Madeira 2001). Su existencia en nuestro país data del año 1857, utilizándose en esa época para ornamentación y en la conformación de cortinas rompevientos.

En la Mesopotamia Argentina, en concordancia con las regiones ecológicas más favorables, aunque sin ocupar las mejores tierras que se destinan a la agricultura y ganadería intensiva, se han desarrollado plantaciones forestales con especies

exóticas de rápido crecimiento. No sólo han influido las condiciones ecológicas, sino que en este caso tuvo fundamental importancia la localización estratégica de la región respecto a los centros poblados, especialmente Buenos Aires, y la existencia de plantas celulósicas cercanas, lo que dio como resultado la formación de polos o cuencas forestales.

Estos asentamientos forestales se crearon merced a la existencia de distintos sistemas de promoción y fomento del estado, los que actualmente han demostrado que más que un gasto ha sido una excelente inversión. Esta afirmación se basa no sólo en el desarrollo social logrado, sino también en el progreso económico, por los retornos monetarios que genera. Por ello es que hoy día casi el 80 % de las plantaciones se encuentran en las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones, espacio geográfico conocido con el nombre de Mesopotamia Argentina.

De acuerdo al inventario satelital publicado en el 2001 por la Dirección Forestal de la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca (SAGPyA) (Braier 2004), Argentina cuenta con 1,15 millones de hectáreas de bosques cultivados, también denominados bosques implantados, forestaciones, o plantaciones forestales. Sin duda la provincia más importante es Misiones, dado que tiene la mayor superficie plantada y además dispone de los bosques nativos con mayor actividad industrial del país. Le sigue en importancia Corrientes, y en un tercer orden Entre Ríos. Las cifras de bosques cultivados para las principales zonas según la SAGPyA (Braier 2004) indican que Misiones dispone de 385.000 ha, Corrientes alcanza 329.000 ha y Entre Ríos 130.000 ha.

Del total de forestaciones realizadas en la provincia de Entre Ríos se destaca netamente el género *Eucalyptus* con un 90 %, siendo su principal exponente el *Eucalyptus grandis*, por lo que a esta zona se la considera el mayor nucleamiento de esta especie en el país (INTA 1995). Se encuentran también pequeñas cantidades de otras especies del mismo género, como *Eucalyptus glóbulus* y *Eucalyptus dunnii*.

Los crecimientos en los mejores suelos de la provincia son comparables a los más altos a nivel internacional, situados entre 35 y 50 m³/ha/año, y en algunos casos superiores a los 50 m³/ha/año. El 10 % restante de las forestaciones corresponde a Pinus, principalmente *Pinus elliottii* y en menor escala *Pinus taeda*. Los turnos de

corta usuales para el aserrado oscilan entre 10 y 15 años para el Eucalyptus y entre 20 y 22 años para el Pinus.

Por otra parte, la provincia de Entre Ríos cuenta con una alta densidad de industrias forestales, y existen otras en su radio de acción en provincias cercanas tales como Santa Fe y Buenos Aires. En este aspecto se pueden señalar actividades relacionadas a la industria celulósica, tableros, aserraderos, impregnadoras, entre otras, lo que alienta el accionar de pequeños inversionistas que desean asegurar la venta futura de su madera (Secretaría de Estado de la Producción de Entre Ríos & INTA Concordia 2002; Sánchez Acosta y Vera 2005).

Si bien la tendencia globalizadora favorece el desempeño de industrias de gran tamaño y máxima eficiencia, resulta interesante centrar la atención en el caso de la zona Noreste de la provincia de Entre Ríos, donde existe una gran cantidad de pequeños productores que cuentan en total con sólo 100.000 ha, en una franja de aproximadamente 200 km en dirección Norte-Sur por 20 km en dirección Este-Oeste. Esa superficie es lo que podría tener una empresa de mediana envergadura en otras partes del mundo (Sánchez Acosta y Vera 2005).

Las forestaciones posibilitaron por una parte la instalación de industrias en la región, y por la otra, el abastecimiento de otros establecimientos fuera de su territorio. Es por ello que a partir de este núcleo, Entre Ríos ha llegado a contar con 120 aserraderos, 30 fábricas de cajones y pallets, 2 fábricas de tableros aglomerados, 1 de tableros de fibra MDF, 1 fábrica procesadora de la resina de pino, 13 plantas de preservación, 1 planta de tableros de listones y varias remanufactureras. Además, es frecuente el envío de madera de poco diámetro a fábricas celulósicas de otras provincias (Secretaría de Estado de la Producción de Entre Ríos & INTA Concordia 2002; Sánchez Acosta 2005). Con solo considerar la ocupación de mano de obra, y la generación de empresas de servicios anexas se tiene una idea del potencial de generación de desarrollo de esta actividad (Sánchez Acosta 2005).

Fundamentación y justificación del tema elegido.

El impacto producido sobre el medio ambiente por las forestaciones en general (Vihavainen 1995) y las de este género en particular, debido a los elevados requerimientos de agua, luz y nutrientes (Fischesser B. 2000; Lanzara & Pizzetti

2003), ha generado numerosas y variadas consideraciones. Muchas veces, la extrapolación inadecuada de datos desde diferentes situaciones climáticas, o la inexistencia de datos fehacientes, han originado opiniones totalmente contradictorias, lo cual queda de manifiesto incluso en numerosas publicaciones. A continuación, y con el fin de presentar la magnitud del problema, su importancia para la correcta utilización de cultivos y preservación del medio ambiente, así como las contradicciones existentes, se citan algunas manifestaciones al respecto.

Pérez Arrarte (2000) al hablar de los impactos ambientales del Eucalyptus en la República Oriental del Uruguay, y considerando las afecciones al equilibrio hidrológico, dice que al ser introducidos árboles en los sitios previamente con praderas, los mismos “liberan un excedente menor para otros usos, que se expresará en el rendimiento neto de las cuencas hidrográficas y en la disponibilidad de agua en las napas freáticas. La evapotranspiración real de una plantación de Eucalyptus se estima que será de un 30 % a 50 % superior al de un campo natural, la plantación forestal afectará significativamente el componente de escurrimiento superficial del agua, reduciéndolo en el orden de 250 mm anuales, es decir 2500 m³/ha año”.

A su vez, el agrónomo José Augusto Tosato, del Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo del Extremo Sur de Bahía, afirmó a Osava (2001) “el monocultivo en áreas extensas empobrece la biodiversidad, reduce la disponibilidad de agua superficial y provoca desequilibrios sociales, pues expulsa a los campesinos”.

Contrariamente, Rubens Garlipp (Osava 2001), Superintendente de la Sociedad Brasileña de Silvicultura, considera “estudios científicos indican que la creencia de que el Eucalyptus seca el suelo no tiene fundamento, al menos respecto de las especies cultivadas en Brasil”. Y en la misma línea, Lima (1996), sostiene “en cuanto al régimen de lluvias el informe señala que no existen evidencias que permitan constatar la ocurrencia de alguna alteración, como resultado de la forestación en gran escala con Eucalyptus o con cualquier otra especie forestal”.

La importancia que tiene el contenido de humedad del suelo para la vida vegetal es por todos conocida y, en consecuencia, pueden encontrarse numerosas reflexiones acerca de la preocupación existente por esta problemática.

De acuerdo con Donoso (1992), “todos los procesos ecológicos son

importantes, pero el agua que se encuentra en el suelo, específicamente aquella que las raíces de las plantas son capaces de utilizar, es la que tiene mayor importancia”.

Manifiesta Honorato (2000) “el agua es la base de la existencia de la vida, debido a que es el factor esencial de los procesos de génesis del suelo, es necesaria para los requerimientos de las plantas (transpiración, elongación celular, metabolismo, etc.) y transporte de nutrientes en el proceso de absorción radical”.

Domínguez (1996) expresa “la disponibilidad de agua para la planta en el suelo, resulta ser un factor de carácter prioritario para la misma y de él dependen, en gran medida, el resultado del cultivo y la eficacia de las principales prácticas agrícolas tales como el riego y la fertilización”.

Alonso (2000) sostiene “dentro de la planta, la raíz es el órgano que detecta las condiciones existentes en el suelo y las transmite hacia las hojas controlando el metabolismo del agua y el crecimiento. Asimismo, la eficiencia de la absorción de nutrientes se reduce junto con el transporte a distancia de estos elementos. En consecuencia la formación de una buena masa radical es de primera importancia para el uso eficiente del agua y la correcta utilización de los fertilizantes. Las raíces para crecer requieren humedad y oxígeno esencialmente porque están adecuadas para vivir en medios muy diluidos pero no en ambientes secos o muy mojados sin oxígeno”.

“El efecto conjunto de adecuados niveles de aporte de nutrientes disponibles para la planta en el suelo, asociado a una mayor oferta de agua en el suelo, hacen que plantas con mayor volumen radicular absorban y distribuyan más nutrientes hacia polos de crecimiento”, considera Alzugaray (2003).

Por su lado, Hunter y Gybson (1984), manifiestan “estudios han demostrado que entre las variadas condiciones que soportan las especies de rápido crecimiento, el factor que explica la alta proporción de variación en volumen del fuste está mostrado por la relación de agua disponible”.

Teniendo en cuenta la problemática brevemente descrita en los párrafos anteriores, la elección del tema de este Trabajo de Tesis se enmarca en la necesidad de dar respuesta a uno de los interrogantes existentes, tanto en el sector científico-tecnológico como en el productivo, sobre uno de los aspectos del impacto ambiental que ejercen las plantaciones de *Eucalyptus grandis*. En particular, se aborda la

influencia de esta especie sobre el contenido de humedad del suelo en la región Noreste de la Provincia de Entre Ríos.

Tanto las forestaciones de esta especie destinadas a su explotación, como la utilización de la misma en calidad de cortina arbórea para proteger otras plantaciones, como es el caso de los cítricos, han originado opiniones encontradas e incertidumbre acerca de su relación con el agua del suelo en que se implantan. En algunos casos se le atribuyen efectos sumamente nocivos y en otros se la destaca como muy favorable (Rébori 2001; Díaz et al. 2006). La importancia de encontrar una respuesta al interrogante planteado, a través de una investigación planificada, se corresponde con la destacada incidencia económica y social que este cultivo adquirió en la región mencionada, ya que se ha adaptado favorablemente y se desarrolla con gran velocidad de crecimiento, como ya fuera mencionado anteriormente.

Por otra parte, es necesario volver a señalar que el tema elegido es motivo de polémicas en todo el mundo, como surge de los reportes mencionados en párrafos anteriores, y que el mismo aún no se encuentra suficientemente estudiado con rigor científico en la región. Es de público conocimiento que en los últimos tiempos la población de ambas márgenes de la cuenca del Río Uruguay se ha visto sorprendida por una controversia entre los dos países limítrofes que derivó en un conflicto casi sin precedentes para la zona. La localización de pasteras sobre la margen uruguaya del Río Uruguay, además de motivar un gran enfrentamiento que alcanza no sólo a los gobiernos sino a los pueblos vecinos, ha generado discusiones de las índoles más variadas. Dentro de ellas, ha resurgido con inusitada fuerza el debate acerca del efecto que las forestaciones, en especial las del género *Eucalyptus*, producen sobre el contenido de humedad del suelo.

Por existir numerosas variables que intervienen en el proceso de interacción entre el suelo y las forestaciones, tales como el clima, el régimen de precipitaciones, el tipo de suelo, entre otras, la solución al problema debe encararse a través de un estudio realizado en el ambiente en el cual se insertan las plantaciones (Díaz et al. 2006), para lo cual el estudio de caso resulta adecuado. De esta forma se pueden aportar datos objetivos, suministrando una base sólida para la toma de decisiones tanto por parte de los productores como de los responsables del medio ambiente. A su vez, de los resultados de este trabajo deben surgir sin duda nuevos interrogantes

que el sector científico-tecnológico deberá encarar en el futuro, procurando avanzar en el conocimiento de tan importante problemática.

1.2 Objetivos

Existen numerosos aspectos que podrían investigarse en relación al impacto que producen las forestaciones de *Eucalyptus grandis* en el Noreste de Entre Ríos sobre el medio ambiente en general y sobre el contenido de agua del suelo en particular. En el presente Trabajo de Tesis se ha resuelto abordar los siguientes objetivos:

Objetivo N° 1:

Determinar el contenido de humedad del suelo en dos forestaciones de *Eucalyptus grandis* implantadas en sitios característicos de la región, y analizar su variación en función de la distancia a la frontera de la plantación, de la profundidad y de la época del año.

Objetivo N° 2:

Determinar el contenido de humedad del suelo en una forestación de *Eucalyptus grandis* y en una *Pinus taeda*, ambas con similar edad y ubicadas en un mismo sitio característico de la región, y analizar su variación en función de la distancia a la frontera de la plantación, de la profundidad y de la época del año.

1.3 Estructuración de la tesis

La presentación de esta tesis se ha organizado conforme al formato tradicional adoptado para los trabajos de investigación. A continuación de este primer capítulo introductorio, que tiene por fin principal presentar el problema,

fundamentar la elección del tema y plantear los objetivos, se redactan otros cinco.

El Capítulo 2 resume el marco teórico de referencia utilizado para el diseño de la investigación y para la discusión de sus resultados. Se analizan los aspectos ambientales relacionados a las forestaciones y particularmente a las del género *Eucalyptus*. Se plantea la temática del suelo, sus características, su interacción con el agua y las raíces de las plantas, así como los métodos usuales para determinar sus propiedades. Se aborda la problemática referida a la relación entre el agua y los cultivos, así como la influencia que las forestaciones ejercen sobre el ciclo del agua.

El Capítulo 3 presenta los criterios empleados para seleccionar los sitios utilizados para el trabajo de campo y para localizar las perforaciones. Se describen las condiciones climáticas y del perfil del terreno y se detallan las tareas de extracción de muestras, su acondicionamiento, traslado al laboratorio y determinaciones efectuadas en este último. En su parte final se presenta la rutina empleada para el procesamiento de datos.

El Capítulo 4 constituye el espacio donde son presentados y discutidos los resultados de la investigación. Su primera parte se refiere al análisis del contenido de humedad del suelo en las forestaciones de *Eucalyptus grandis*, conforme al Objetivo 1. En la segunda parte, se compara el contenido de humedad del suelo bajo una cobertura de *Eucalyptus grandis* con el existente bajo una plantación de *Pinus taeda*, según lo planteado en el Objetivo 2.

El Capítulo 5 se ocupa en primer lugar de las conclusiones obtenidas en relación a los dos objetivos del trabajo. Complementariamente se señala la necesidad de efectuar nuevas investigaciones y se realiza un breve análisis crítico de la metodología empleada.

Finalmente se cita la bibliografía consultada y analizada en la tesis.

2 *Las forestaciones y el medio ambiente*

En el presente capítulo se presenta el marco teórico de referencia necesario tanto para el diseño y ejecución de la investigación, como para la discusión de los resultados que la misma produjo. Se analizan los aspectos ambientales relacionados a las forestaciones y particularmente a las del género *Eucalyptus*. Se aborda la temática del suelo, sus características, su interacción con el agua y las raíces de las plantas, así como los métodos usuales para determinar sus propiedades. Son tratadas las problemáticas referidas a la relación entre el agua y los cultivos, así como la influencia que las forestaciones ejercen sobre el ciclo del agua.

2.1 El Eucalyptus y el medio ambiente

Según estimaciones de la FAO (Palmberg-Lerche y Patiño 1999) hasta la fecha se han establecido unos 15.000.000 de hectáreas de plantaciones de Eucalyptus en zonas tropicales y sub-tropicales. Muchas de las más de 700 especies y variedades de este género originario casi exclusivamente de Australia (Brown y Hillis 1978; INTA 1995), crecen rápidamente y producen madera en abundancia cuando se cultivan en plantaciones bien manejadas, tanto dentro como fuera de su área de distribución natural. Muchas de ellas pueden, además, sobrevivir y crecer en forma satisfactoria en suelos con bajo nivel de nutrientes y en áreas con lluvias irregulares. Estas cualidades son valiosas teniendo en cuenta la creciente demanda de madera y otros bienes y servicios que ofrecen los bosques y los árboles, y la escasa disponibilidad de tierras, especialmente en países en desarrollo.

No obstante la utilidad de las especies de Eucalyptus para usos industriales y como proveedoras de una serie de bienes y servicios en apoyo al desarrollo rural, con reconocimiento en muchos países, durante las últimas décadas han existido críticas en distintos sectores de la sociedad y reacciones públicas en contra de la plantación con especies de este vasto género. En este sentido se encuentran argumentos muy variados y con distinto nivel de fundamentación, tocando muchas veces aspectos técnico-científicos, ecológicos, socioeconómicos y también emocionales (FAO 1987; Palmberg-Lerche y Patiño 1999). Las críticas más frecuentes sobre las forestaciones con Eucalyptus se relacionan a los siguientes factores ambientales:

- Empobrecimiento de los suelos. Es muy común y está relacionado al agotamiento de los nutrientes en el sitio donde crecen, especialmente donde estos han sido cosechados durante varios turnos. Si bien esta crítica puede considerarse de tipo general y aplicarse a cualquier tipo de cultivo, en muchas ocasiones ha cobrado especial énfasis sobre el género y la especie objetos de este trabajo. No faltan también posiciones antagónicas que sostienen que estas forestaciones mejoran las condiciones del suelo, especialmente cuando se plantan en terrenos degradados.

Indudablemente que no es conveniente generalizar sin realizar los estudios en cada caso antes de poder llegar a una conclusión, y es de tener en cuenta que puede considerarse remota la posibilidad de que se produzcan alteraciones irreversibles en este aspecto (FAO 1987).

- Efectos sobre la flora y fauna de cada región. Este impacto es también conocido como competencia y sustitución. El primero, el de competencia, se presenta cuando se planta una especie de árboles sobre un terreno natural o seminatural generando un efecto posiblemente negativo sobre la flora y la fauna. Su origen debe buscarse en la generación de sombra, la competencia por el agua y los nutrientes, los efectos alelopáticos, las modificaciones físicas y químicas del suelo, el cambio en el hábitat por modificación de la vegetación inferior y la estructura de la flora. Deben considerarse también las consecuencias que provocan los cuidados que necesitan las forestaciones, tales como la preparación de los suelos antes y después de la plantación y la limpieza mecánica con la aplicación periódica de herbicidas, lo cual contribuye a la eliminación de las especies locales. El segundo efecto, el de sustitución, se produciría debido a que el *Eucalyptus* impide el desarrollo de la mayoría de las especies vegetales por ser muy agresivo para el sotobosque, debido a su explotación del agua, monopolización de la luz, y eliminación directa de algunas especies con generación de productos químicos alelopáticos. Aunque estos aspectos son comúnmente sometidos a discusión, no se puede asegurar que sean mayores o menores que los correspondientes a otras especies de cultivos intensivos tanto forestales como agrícolas, y que habitualmente no son blanco de críticas como lo son las forestaciones en general y el *Eucalyptus* en particular.

- El consumo excesivo de agua. Es sin dudas uno de los factores mas cuestionados al género *Eucalyptus*, aunque investigaciones realizadas en diversas condiciones ambientales mencionan el consumo de la especie como comparable al de otras plantaciones de rápido crecimiento y al de bosques naturales. En este sentido se llevaron a cabo investigaciones midiendo el consumo de una especie de *Eucalyptus* y el de un doble cultivo trigo-soja para la región pampeana en el ciclo agrícola 2000/2001. Se encontró que el consumo del *Eucalyptus* fue un 10 % inferior al del doble cultivo (Rébora 2001). No obstante, se menciona una menor eficiencia en el uso del agua cuando las raíces tienen acceso al agua disponible en el suelo y cuando

la demanda atmosférica es alta, ya que se menciona que el *Eucalyptus* no muestra una buena regulación estomática en la transpiración. En estos casos, las plantaciones de este género justifican su reputación como ‘bombas de agua’ (Calder et al. 1992).

- Los aspectos sociales. Éstos se relacionan estrechamente con los anteriores y son fuertemente cuestionados debido a la baja cantidad de mano de obra utilizada en las forestaciones, en comparación con otras actividades rurales. Muchas de éstas se encuentran socialmente aceptadas aunque en algunos casos son actividades introducidas por el desarrollo, tales como la agricultura intensiva y las grandes extensiones utilizadas para la ganadería, con campos destinados a la siembra de forrajes para su alimentación.

Los cuestionamientos sobre las forestaciones en general y el género *Eucalyptus* en particular deben ser criteriosamente analizados, considerando que la utilización racional de la madera ofrece también múltiples ventajas, sobre las cuales es bueno detenerse brevemente a reflexionar (Vihavainen 1995). Se trata de un material renovable al obtenerse de bosques sostenibles, esto es, aprovechados planificadamente. El material madera es formado a partir del dióxido de carbono y del agua, por medio de la energía solar. Por lo tanto, su utilización ayuda a preservar los recursos relacionados a los materiales no renovables. La existencia de bosques racionalmente explotados contribuye al equilibrio ecológico y a la disminución de fenómenos no deseados, producidos por los efectos de la excesiva polución debida al uso masivo de combustibles fósiles, tales como el llamado efecto invernadero. La industria de la madera causa muy poca contaminación en el medio ambiente, lo cual puede incluso ser mejorado con una constante optimización de los procesos. La madera se degrada fácilmente en la naturaleza, y además sus desechos pueden reciclarse o emplearse para producir energía u otros subproductos. Todos estos aspectos positivos requieren para su concreción de una planificación y raciocinio en la explotación. La realidad muestra muchas veces situaciones opuestas, que suceden actualmente y que han sucedido en el pasado. Tomando el ejemplo de Europa, en los últimos cien años ha experimentado un crecimiento importante en la superficie de bosques, lo que viene a revertir una situación anterior de devastación producida por diversas causas. Según la La Evaluación Mundial de los Recursos Forestales 2000, realizada por la FAO, la superficie forestada en el mundo se estima en tres mil

ochocientos sesenta y seis millones de hectáreas, de las cuales un 5% corresponden a plantaciones forestales. Se puede considerar que solamente un tercio de los bosques originales del planeta perduran, que durante la última década el ritmo de deforestación alcanzó a diecisiete millones de hectáreas por año y que en los bosques tropicales se produce una reducción de alrededor del 1,8 % por año (Vihavainen 1995).

No existe una respuesta universalmente reconocida que abarque los problemas técnicos, socioeconómicos y ambientales de las forestaciones, y, por lo tanto, tampoco hay una respuesta igualmente válida sobre los efectos favorables o desfavorables de las plantaciones de Eucalyptus. La solución reside en realizar un buen manejo forestal que, consciente del objetivo declarado y dentro de un marco político e institucional bien establecido, tome debidamente en cuenta el potencial y las limitaciones de la localización, los que influirían en la selección de especies y en las formas e intensidad del manejo. Además, las decisiones deben contar con la participación de las comunidades e instituciones interesadas e impactadas por la acción que se propone. Estos principios tendrían que aplicarse de igual manera también a especies de otros géneros, que se cultivan en plantaciones forestales.

En resumen puede afirmarse que las forestaciones no generan tales problemas por el simple hecho de constituir un cultivo intensivo de árboles, sino que en cada caso se debería realizar un análisis detallado de las condiciones que los sitios presentan previamente a la introducción del cultivo. El estudio debería continuar con referencia a las tareas propias de la actividad y un posterior monitoreo para evaluar en cada caso la evolución de los impactos producidos.

2.2 El suelo y las forestaciones

El suelo es la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua, el clima y los procesos de desintegración orgánica. Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado están

determinadas por el tipo de material geológico del que se originan, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debida al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños.

Naturaleza del suelo

Los componentes primarios del suelo son:

- Compuestos inorgánicos, no disueltos, producidos por la meteorización y la descomposición de las rocas superficiales.
- Los nutrientes solubles utilizados por las plantas.
- Distintos tipos de materia orgánica, viva o muerta, y
- Gases y agua requeridos por las plantas y por los organismos subterráneos.

La naturaleza física del suelo está determinada por la proporción de partículas de varios tamaños. Las partículas inorgánicas tienen tamaños que varían entre el que presentan los trozos distinguibles de piedra y grava hasta los de menos de 1/4000 mm. Las grandes partículas, como la arena y la grava, son en su mayor parte químicamente inactivas, pero las pequeñas partículas inorgánicas, componentes principales de las arcillas finas, sirven también como depósitos de los que las raíces de las plantas extraen nutrientes. El tamaño y la naturaleza de estas partículas inorgánicas diminutas determinan en gran medida la capacidad de un suelo para almacenar agua, vital para todos los procesos de crecimiento de las plantas.

La parte orgánica del suelo está formada por restos vegetales y restos animales, junto a cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus. La fracción orgánica representa entre el 2 % y el 5 % del suelo superficial en las regiones húmedas, siendo menores del 0,5 % en suelos áridos o más del 95 % en suelos de turba.

El componente líquido de los suelos, denominado por los científicos solución

del suelo, es sobre todo agua con varias sustancias minerales en disolución, cantidades grandes de oxígeno y dióxido de carbono disueltos. La solución del suelo es muy compleja, y tiene importancia primordial al ser el medio por el que los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas. Cuando la solución del suelo carece de los elementos requeridos para el crecimiento de las plantas, el suelo es estéril.

Los principales gases contenidos en el suelo son el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. El primero de estos gases es importante para el metabolismo de las plantas, porque su presencia es necesaria para el crecimiento de varias bacterias y de otros organismos responsables de la descomposición de la materia orgánica. La presencia de oxígeno también es vital para el crecimiento de las plantas ya que su absorción por las raíces es necesaria para sus procesos metabólicos (Contreras Camacho et al. 2006; Dorronsoro 2007)

Tipos de suelo

Los suelos muestran gran variedad de aspectos, fertilidad y características químicas, que varían en función de los materiales minerales y orgánicos que lo forman. El color es uno de los medios más simples para calificar las variedades de suelo. La regla general, aunque con excepciones, es que los suelos oscuros son más fértiles que los claros. La oscuridad suele ser resultado de la presencia de grandes cantidades de humus. A veces, sin embargo, los suelos oscuros o negros deben su tono a la materia mineral o a humedad excesiva. En estos casos, el color oscuro no es un indicador de fertilidad. Los suelos rojos o castaño-rojizos suelen contener una gran proporción de óxidos de hierro (derivados de las rocas primigenias) que no han sido sometidos a humedad excesiva. Por tanto, el color rojo es, en general, un indicio de que el suelo está bien drenado, no es húmedo en exceso y es fértil. En muchos lugares del mundo, un color rojizo puede ser debido a minerales formados en épocas recientes, no disponibles químicamente para las plantas. Los suelos amarillos o amarillentos tienen escasa fertilidad. Deben su color a óxidos de hierro que han reaccionado con agua e indican de este modo un terreno mal drenado. Los suelos grisáceos pueden tener deficiencias de hierro u oxígeno, o un exceso de sales alcalinas, como carbonato de calcio.

Otro aspecto muy importante para diferenciar los distintos suelos es la textura, que depende de las proporciones de las partículas que lo constituyen. Las partículas del suelo se clasifican como arena, limo y arcilla. Las partículas de arena tienen diámetros comprendidos entre 2 mm y 0,05 mm, las de limo entre 0,05 mm y 0,002 mm, y las de arcilla son menores que 0,002 mm. En general, las partículas de arena pueden verse con facilidad y son rugosas al tacto. Las partículas de limo apenas se ven sin la ayuda de un microscopio y parecen harina cuando se tocan. Las partículas de arcilla son invisibles si no se utilizan instrumentos, y forman una masa viscosa cuando se mojan. En función de las proporciones de arena, limo y arcilla, se puede clasificar los suelos en varios grupos definidos de manera arbitraria, como arenoso, arenoso-franco, franco-arenoso, arcillo-arenoso, arcilloso, franco-arcilloso, franco, arcillo-limoso, franco-arcillo-limoso, franco-limoso y limoso. La textura de un suelo afecta en gran medida a su productividad. Los suelos con un porcentaje muy elevado de arena pueden almacenar poca agua y pierden grandes cantidades de minerales nutrientes por lixiviación hacia el subsuelo. Los suelos que contienen una proporción mayor de partículas pequeñas, por ejemplo las arcillas y los limos, son depósitos excelentes de agua y encierran minerales que pueden ser utilizados con facilidad. Sin embargo, los suelos muy arcillosos tienden a contener un exceso de agua y tienen una textura arcillo-limosa que los hace resistentes al cultivo y que impide, con frecuencia, una aireación suficiente para el crecimiento normal de las plantas.

Clasificación de los suelos

Los suelos se dividen en clases según sus características generales y de acuerdo al propósito de la clasificación. Estas se suelen basar en aspectos físicos y mecánicos, además de la morfología y la composición, con énfasis en las propiedades y parámetros que se pueden ver, sentir o medir, como la profundidad, el color, la textura, la densidad, la resistencia, la estructura, la composición química y la plasticidad, entre otras. La mayoría de los suelos tienen niveles horizontales característicos, llamados horizontes. La naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también es importante en su identificación y clasificación.

Las propiedades de un suelo reflejan la interacción de varios procesos de

formación que suceden de forma simultánea tras la acumulación del material primigenio. Algunas sustancias se añaden al terreno y otras desaparecen, la transferencia de materia entre horizontes es muy corriente y algunos materiales se transforman con el tiempo. Todos estos procesos se producen a velocidades diversas y en direcciones diferentes, por lo que aparecen suelos con distintos tipos de horizontes o con varios aspectos dentro de un mismo tipo de horizonte.

Desde el punto de vista agronómico, los suelos que comparten muchas características comunes se agrupan en series y éstas en familias. Del mismo modo, las familias se combinan en grupos, y éstos en subórdenes que conforman a su vez órdenes (ver Tabla 2.1). Los nombres dados a los órdenes, subórdenes, grupos principales y subgrupos adoptan, fundamentalmente, raíces griegas y latinas. Cada nombre se elige tratando de indicar las relaciones entre una clase y las otras categorías y de hacer visibles algunas de las características de los suelos de cada grupo. Los suelos de muchos lugares del mundo se están clasificando según sus características, lo cual permite elaborar mapas con su distribución (USDA 1999).

Tabla 2.1: Órdenes de suelos y rasgos característicos según la clasificación USDA (adaptada de USDA 1999)

Orden	Horizontes	Rasgos característicos
Alfisol	Diferenciado	Suelos con horizonte arcilloso, jóvenes, comúnmente bajo bosques de hoja caediza.
Arisdisol	Diferenciado	Suelos secos (climas áridos); sales, yeso o acumulaciones de carbonatos frecuentes.
Entisol	Diferenciado	Casi nula diferenciación de horizontes; distinciones no climáticas: aluviones, suelos helados, desierto de arena.
Espodosol	Diferenciado	forestales húmedos; frecuentemente bajo coníferas. con un horizonte B enriquecido en hierro y/o en materia orgánica y comúnmente un horizonte A gris-ceniza, lixiviado.
Histosol	No diferenciado	Suelos orgánicos. depósitos orgánicos: turba, lignito, sin distinciones climáticas.
Inceptisol	Incipiente	Suelos con débil desarrollo de horizontes; suelos de tundra, suelos volcánicos recientes.
Molisol	Diferenciado	Suelos de zonas de pradera en climas templados; horizonte superficial blando; rico en materia orgánica, espeso y oscuro.
Oxisol	No diferenciado	Suelos tropicales y subtropicales, intensamente meteorizados formándose recientemente horizontes lateríticos y suelos bauxíticos
Vertisol	Ninguno	Suelos ricos en arcilla; generalmente en zonas subhúmedas a áridas, con hidratación y expansión en húmedo y agrietados cuando secos.

Es de considerar, cuando se habla del suelo con fines agronómicos, que éste

constituye por sí mismo un ecosistema donde ocurren una serie de relaciones de alimentación, muerte, degradación y convivencia. Las propiedades del terreno dependen en gran parte del correcto mantenimiento de sus ciclos biológicos. Su complejidad es notable y difícil de estudiar debido a la escala de trabajo y a la multitud de aspectos parciales. En las investigaciones no debe olvidarse esta parcialidad del objeto estudiado, recordando que pertenece a un sistema mayor.

La rizosfera es la parte del suelo inmediata a la raíz, tal que al extraer ésta, es aquella porción de tierra que resta adherida a la misma. Se considera así dado que las características químicas y biológicas de la rizosfera se manifiestan en una porción de apenas 1 mm de espesor a partir de las raíces. Sin embargo, debido a la densidad de raíces que emiten las plantas, se puede considerar a la rizosfera de una forma más amplia, como la porción de suelo en la que están las raíces de las plantas. En esta zona ocurre toda una serie de relaciones físicas y químicas que afectan a la estructura del suelo y a los organismos que viven en él, proporcionándole propiedades diferentes al resto del terreno.

Se pueden destacar dos características singulares de la rizosfera. Una de ellas es la presencia de organismos en mayor densidad que en el resto del suelo, tales como bacterias, hongos, y microfauna, como por ejemplo nematodos. La otra característica notable es la estabilidad de las partículas de suelo, tanto por la acción mecánica de las raíces, como por la acción agregante de los exudados de los diferentes organismos presentes, ya sean plantas o microorganismos.

La concentración de raicillas en el suelo, y por tanto la superficie absorbente, varía bastante según las condiciones del medio o el estado vegetativo del vegetal. La deficiencia alimenticia incide en el desarrollo de la planta, y por ello también de sus raíces. Por ejemplo, una baja presencia de calcio en el suelo limita el desarrollo radical. Otro ejemplo es la respuesta negativa ante condiciones de sequedad o de saturación del suelo.

El agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo es indispensable para la nutrición de las plantas y actúa como vehículo de los elementos nutritivos disueltos. Por otra parte, es uno de los principales condicionantes de los procesos de formación del suelo. Las

fuentes principales que proveen de agua al suelo son las lluvias y la presencia de napas subterráneas (Dorrnsoro 2007).

Las lluvias que caen en la superficie se pueden subdividir en dos fracciones, las que normalmente se denominan agua de escorrentía y agua gravitacional.

El agua de escorrentía es la que circula sobre el suelo o en el interior de los horizontes superiores, paralelamente a la superficie. Se presenta por tanto en terrenos con pendiente y, en el caso de lluvias violentas, es causa de empobrecimiento de los suelos por arrastre de partículas finas y nutrientes.

El agua gravitacional es la que se infiltra por la fuerza de la gravedad y circula por los poros, en general verticalmente, aunque en algunos casos puede hacerlo en forma horizontal debido a fuertes pendientes o a cambios en la permeabilidad de los diferentes horizontes. Esta fracción se puede subdividir a su vez en infiltración de flujo rápido e infiltración de flujo lento, siendo el tamaño de los poros el principal factor que gobierna este fenómeno. El flujo rápido se canaliza por los poros con abertura superior a $50\ \mu\text{m}$ y se produce durante la lluvia y por un período posterior a ésta que involucra algunas horas. El flujo lento desciende por los poros mas pequeños, con diámetros comprendidos entre $50\ \mu\text{m}$ y $10\ \mu\text{m}$, y puede permanecer durante semanas en el suelo luego de las precipitaciones.

La cantidad de agua de lluvia que se infiltra está gobernada por las relaciones que se dan entre la intensidad de la lluvia y la tasa de infiltración del suelo. Cuando el agua que llega al suelo es mayor que la que puede infiltrar, tiene lugar la escorrentía con el consecuente desperdicio de agua y lavado del suelo.

La tasa de infiltración del suelo se ve influenciada tanto por el tamaño de los poros como por su distribución y estabilidad, ya que suelen presentarse situaciones en las cuales una fuerte inestabilidad de los poros produce un sellado superficial que impide la infiltración aún en el caso de lluvias intensas. Para contrarrestar estos aspectos hay que adecuar las técnicas de labranza y manejo del suelo evitando la denudación de superficie tanto como la compactación, y además mantener coberturas superficiales tales como follaje de cultivos, residuos vegetales, e incluso malezas.

Durante la infiltración del agua de lluvia, que ocupa los poros medios y finos inferiores a $10\ \mu\text{m}$, se presentan fuerzas capilares y de absorción que son suficientemente grandes como para oponerse a la fuerza de gravedad. Por lo tanto,

una fracción del agua queda atrapada en la estructura del suelo como agua retenida, la cual a su vez se puede subdividir en dos partes. Una de ellas es el agua capilar, que es la que ocupa los poros medios quedando en contacto con el suelo pero disponible para las raíces. La otra es el agua ligada, que forma una fina película alrededor de los granos de suelo y en el interior de los poros finos, de diámetro menor a $0,2 \mu\text{m}$. Esta fracción es retenida enérgicamente y no está disponible para las raíces.

Las diferentes formas de permanencia del agua en el suelo, que fueron mencionadas anteriormente, se corresponden con las características propias de cada terreno. Estas pueden ser medidas y por lo tanto es posible evaluar la capacidad que cada suelo tiene para almacenar agua disponible para los cultivos. Con referencia a la fracción de agua retenida, que resulta presente luego que desaparecen la escorrentía, la infiltración y la evaporación, dos valores presentan significativa importancia desde el punto de vista de los cultivos: la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

La capacidad de campo se define como el agua presente en un suelo luego de producido un drenaje de entre 48 hs y 72 hs, partiendo de un estado de saturación hasta el límite de su zona radical. Por lo tanto, el agua que no drena fuera de esa zona en ese tiempo será retenida en los poros del suelo con tamaño menor a $50 \mu\text{m}$ de diámetro. En consecuencia, la capacidad de campo corresponde, en principio, a la máxima cantidad de agua que puede contener un suelo, tanto capilar como ligada. De acuerdo con esta definición, la capacidad de campo se puede determinar in situ después de un periodo de lluvias lo suficientemente intenso como para saturar el suelo, dejando escurrir el agua entre 2 y 3 días y a su vez evitando la evaporación con una adecuada protección. La presencia de un contenido de humedad en el terreno del orden de la capacidad de campo es muy favorable para el desarrollo de los cultivos. En estas circunstancias ellos encuentran una abundante cantidad de agua que está retenida con una energía fácilmente superable por la succión de las raíces, y al mismo tiempo el suelo está lo suficientemente aireado como para permitir la respiración radicular.

El contenido de agua presente en el suelo puede disminuir por debajo de la capacidad de campo como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas. Cuando la película de agua que rodea las partículas de suelo se hace cada

vez mas delgada, hasta que resulta imposible que sea absorbida por las raíces, se encuentra el estado denominado punto de marchitez. Este proceso se caracteriza por el hecho que las plantas no pueden tomar agua del suelo, experimentando consecuentemente una marchitez permanente.

La fuerza con la cual el agua es retenida varía con el tamaño de las partículas y de los poros del suelo. La fracción más fácilmente removible por las plantas está retenida con presiones comprendidas entre un décimo y un tercio de la presión atmosférica. Esta fracción de agua es la que se encuentra próxima a la capacidad de campo. Una vez que las plantas comienzan a absorber humedad, la tensión a la cual ésta está retenida comienza a aumentar hasta llegar a valores cercanos a las 16 atmósferas, lo que la hace inaccesible para las raíces. Por lo tanto el agua útil para los cultivos es la comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento. Los valores de estos límites, y consecuentemente del agua disponible, varían de acuerdo al tipo de suelo y se presentan sintéticamente en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores característicos del contenido de humedad para distintos tipos de suelo (Adaptada de Dorronsoro 2007)

Textura del suelo	Capacidad de campo %	Punto de marchitez %	Agua disponible %
Arenoso	9	2	7
Arenoso - Franco	14	4	10
Franco arenoso - limoso	23	9	14
Franco arenoso+ materia orgánica	29	10	19
Franco	34	12	22
Franco arcilloso	30	16	14
Arcilloso	38	34	4
Arcilloso con buena estructura	50	30	20

La Figura 2.1 permite apreciar en forma simple la variación de los límites mencionados en función del tipo de suelo. Se puede observar que los suelos arenosos poseen muy baja capacidad de campo, pero casi toda su humedad es agua útil pues el punto de marchitamiento es también muy bajo. En cambio, los suelos arcillosos se caracterizan por una muy alta capacidad de campo, pero como su punto de

marchitamiento es también muy elevado poseen una gran cantidad de agua que no es útil para los cultivos. Inmediatamente se puede apreciar que la situación ideal, desde este punto de vista, se presenta en suelos de granulometrías equilibradas, donde tienden a compensarse los efectos de las arenas y de las arcillas.

Según Martínez Fernández et al. (2001), los suelos desarrollados sobre terrazas fluviales o depósitos arenosos presentan normalmente valores bajos de humedad debido a su menor capacidad de retención, incluso en épocas de abundante precipitación. Sin embargo, en la mayor parte de los casos conservan valores del contenido de humedad dentro del umbral de agua disponible, aun en los periodos más críticos. Esto se debe a que, aún con una baja capacidad de retención, la escasa humedad almacenada es retenida con poca energía y, por tanto, es agua disponible.

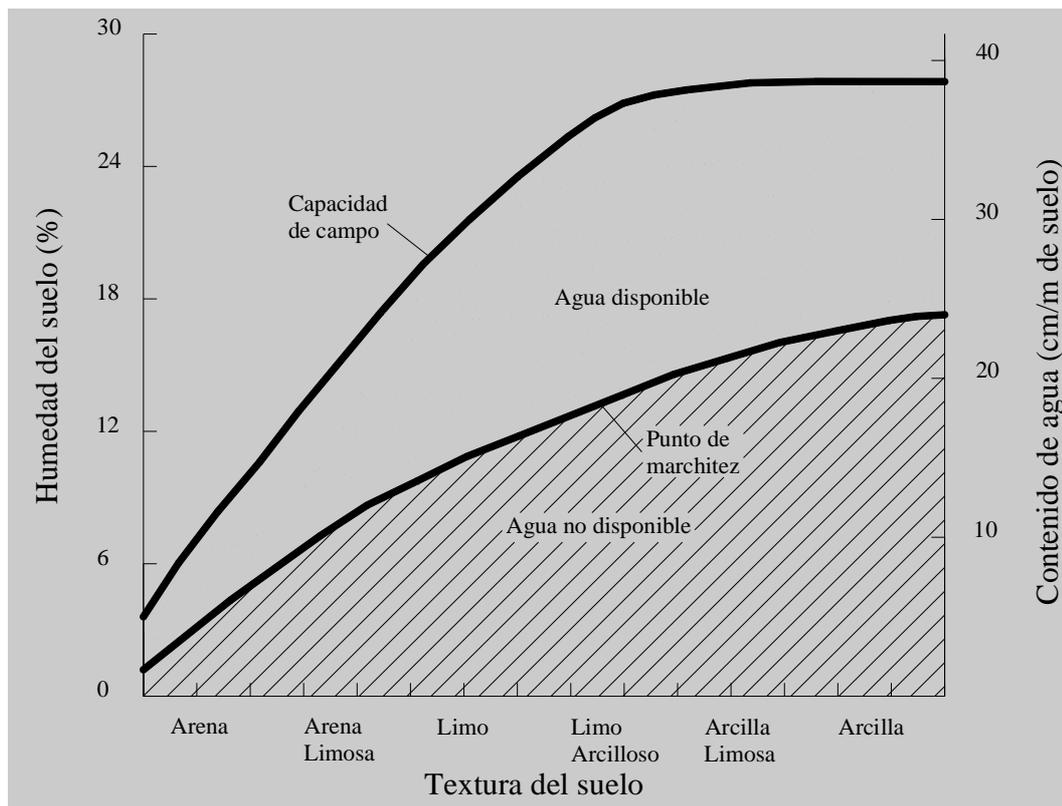


Figura 2.1: Valores característicos del contenido de humedad para los distintos suelos (adaptada de Dorronsoro 2007)

Determinación de las propiedades de los suelos

Los suelos están condicionados por un patrón natural que los define como medios esencialmente heterogéneos y anisótropos. En la práctica llegar a medir este patrón natural es muy difícil, y puede asegurarse que muchas veces resulta prácticamente imposible.

Parámetros físicos tales como la densidad aparente, la humedad gravimétrica, la resistencia mecánica, la textura, entre otros considerados aisladamente, no resultan suficientes para el diagnóstico del suelo cuando se desea determinar su potencialidad físico-funcional. Pero éstos, junto con otros parámetros dependientes como la porosidad total, la porosidad de aireación o efectiva, y la conductividad hidráulica, en un análisis integrado, resultan más convenientes para estudiar y explicar los procesos físicos en el continuo suelo-planta.

A continuación se presentan definiciones y aspectos relacionados a la determinación de propiedades en campo y en laboratorio.

- **Densidad.** En el estudio de los suelos se distinguen dos tipos de densidad. La densidad real o de partícula (d_p) que corresponde a la densidad de la fase sólida del suelo, y la densidad aparente (d_{ap}) que incluye el volumen de partículas y el volumen vacío de los poros. Esta última permite evaluar el efecto del manejo que se da al suelo. A su vez, este valor es necesario para referir los datos de los análisis de laboratorio a un volumen de suelo en condiciones de campo, como la determinación de la cantidad de materia orgánica, nitrógeno total, entre otros. Asimismo es requerido para el cálculo de la lámina de agua hasta una profundidad dada y para calcular la porosidad total. Esta densidad se refiere a la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que ocupó dicha muestra a campo, con su ordenamiento natural. Por lo tanto la d_{ap} varía en función de la textura, del estado de agregación, del contenido de materia orgánica, del manejo que recibió el suelo y del contenido de humedad. La densidad de partícula, por su parte, presenta para la mayoría de los suelos agrícolas valores de alrededor de $2,65 \text{ g/cm}^3$ y para la materia orgánica de $0,20 \text{ g/cm}^3$.

- **Porosidad total (pt).** Este valor puede calcularse a partir de conocer los dos anteriores por medio de la siguiente expresión:

$$pt = 1 - d_{ap}/d_p$$

- Porosidad de aireación (pa). Cuando un suelo se encuentra con un contenido de humedad del orden de la capacidad de campo, es la porosidad que no retiene agua y por lo tanto da una idea de la proporción de poros de mayor tamaño. A veces se la denomina porosidad efectiva. Se puede estimar fácilmente restando a la porosidad total la humedad de capacidad de campo expresada como humedad volumétrica (hv).

$$p_a = p_t - h_v$$

- Conductividad hidráulica e infiltración. Cuando una fuente de agua se pone en contacto con la superficie del suelo, las etapas iniciales del movimiento del agua hacia el interior del perfil son dominadas por las propiedades capilares del suelo. En estado estacionario, el flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad. En un suelo no saturado el movimiento del agua esta determinado por la conductividad hidráulica y la sortividad.

La conductividad hidráulica (k) es una medida de la habilidad de un suelo para conducir agua bajo un gradiente de potencial hidráulico. Describe la conductividad hidráulica de un medio poroso (longitud/tiempo).

La sortividad (s) es una medida de la habilidad que tiene un suelo de absorber agua durante el proceso de humedecimiento. En general cuanto mayor es el valor de s, mayor será el volumen de agua que puede ser absorbida y en forma más rápida.

La infiltración (i) se refiere a la entrada del agua al perfil del suelo a través de la superficie del mismo. Este proceso es controlado por muchos factores, uno de los cuales es la estructura de la superficie. La ecuación que relaciona la infiltración acumulada en un tiempo transcurrido (Philip 1957), toma la forma:

$$i_{(t)} = S_1 t^{1/2} + S_2 t + S_3 t^{3/2} + \dots + S_n t^{n/2} + k_0 t$$

En ésta, la sortividad, S_1 , describe la absorción de agua por el suelo como resultado del gradiente de potencial mátrico. Para cortos periodos de tiempo:

$$i_{(t)} = S_1 t^{1/2} + k t$$

Las ecuaciones anteriores indican que cuando el suelo está seco, la tasa de infiltración inicial es alta debido a la sortividad. Tal es el caso de un alto gradiente de potencial mátrico entre el suelo y la lámina de agua aplicada. A medida que transcurre el tiempo la velocidad de infiltración alcanza una tasa constante o estacionaria, a menudo llamada infiltración básica, y que se asemeja mucho al valor de conductividad hidráulica saturada.

El desarrollo y mejoramiento de métodos y equipos para la medición e interpretación de las propiedades físicas de los suelos ha permitido, últimamente, avanzar en los conocimientos del funcionamiento hídrico en particular

La utilización de la conductividad hidráulica como parámetro de medición individual o complementariamente con la densidad aparente, mejora y facilita el análisis e interpretación para un mejor diagnóstico del estado funcional del suelo. Por su parte, la tasa de infiltración, ocasionalmente medida con cilindros, muchas veces resulta imprecisa e insume mucho tiempo.

Los métodos de laboratorio aplicados sobre muestras de suelo no disturbado, siguen siendo hasta el presente muy utilizados, constituyendo el patrón de referencia de otras técnicas. Sin embargo para que cumplan dicha función deben satisfacer una serie de requisitos tanto en el diseño de los equipos como en el tratamiento de las muestras, preparación de la solución, entre otros. No obstante, uno de los principales inconvenientes reside en el volumen relativamente pequeño de la muestra, que no resulta así representativo de los macroporos, grietas y otros detalles de la estructura que se presentan en el campo. Otro problema radica en la forma en que son extraídas las muestras, mediante golpes o aplicando presión, afectando la continuidad de los macroporos, subestimando o sobrestimando el verdadero valor de la conductividad hidráulica.

Estos inconvenientes pueden ser salvados en gran medida efectuando las mediciones directamente en el sitio de estudio, para lo cual existen una gran cantidad de métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica en condiciones de saturación y no-saturación. Pero muchas de estas técnicas generalmente consumen tiempo, resultan tediosas y costosas, sobre todo cuando se requiere un gran número de repeticiones.

En contraposición, recientemente se ha desarrollado una serie de métodos de campo de diseño simple y que a su vez son confiables y rápidos. Uno es el constituido por el permeámetro Guelph, ya desarrollado comercialmente. Otras alternativas son el permeámetro compacto de carga constante, el permeámetro de disco y el infiltrómetro de tensión.

En nuestro país, el Instituto de Suelos del INTA de Castelar ha desarrollado en los últimos años equipos de sencilla construcción y de funcionamiento ágil y

confiable para el estudio de la dinámica del agua en el suelo (Gil 2001).

- Humedad edáfica. Es una forma de indicar la cantidad de agua presente en el perfil del suelo a una determinada profundidad, estrato u horizonte y en un momento determinado. Puede ser expresada de tres maneras:

-Humedad gravimétrica (g/g). Es la relación entre la masa de la fracción líquida y la masa de la fracción sólida.

$$hg = (\text{masa húmeda} - \text{masa seca}) / \text{masa seca}$$

-Humedad Volumétrica (cm³/cm³). Es la relación entre el volumen de la fracción líquida y el volumen de la muestra seca. Para convertir la humedad gravimétrica a la forma volumétrica hay que afectarla por la densidad aparente del suelo.

$$hv = hg * \text{dap}$$

La expresión de la humedad del suelo en términos volumétricos es más conveniente para el diagnóstico, por cuanto expresa más claramente el volumen de suelo que está ocupado por agua. En otras palabras, dos suelos pueden tener la misma humedad gravimétrica, pero distinto volumen de agua si las densidades son diferentes.

-Lámina (mm). Es una forma de expresión de la humedad edáfica que ofrece mucha utilidad porque no depende del área. Para calcularla basta multiplicar la hv por la profundidad considerada (mm).

La determinación de la humedad edáfica adquiere especial importancia para el logro de los objetivos de esta investigación. En este aspecto, existe un variado espectro de métodos, que pueden ser directos o indirectos, aunque es difícil establecer una separación estricta y el tema es motivo de controversias (UNC 2007). La diferencia entre ambos radica en que los métodos directos proporcionan en forma inmediata, como resultado de su aplicación, el valor de la cantidad de agua presente en el suelo. En cambio, en los métodos indirectos se obtiene la humedad en función del valor que adquiere otro parámetro que es influenciado por la cantidad de agua directa. Por esta razón los métodos indirectos requieren de una calibración previa.

La elección del método a utilizar depende de factores tales como las características del suelo en términos de presencia de materia orgánica, textura, variabilidad, entre otros. También son de considerar los objetivos del trabajo, la disponibilidad de personas y de presupuesto.

En todos los casos los métodos usan una propiedad física que cambia con la presencia de humedad en el suelo. Dentro de ellas se pueden señalar el peso o la masa de un determinado volumen de suelo, la tensión del agua, la humedad del aire, la dispersión o la atenuación de la radiación que entra al suelo, la constante dieléctrica, la resistencia eléctrica, la textura, la energía para cambiar la temperatura.

Dentro de los métodos directos, entre otros por su importancia se destacan los siguientes:

-Método gravimétrico. Es el más exacto de todos y de hecho se usa para calibrar a los demás. Presenta como principales desventajas el requerimiento de mucho tiempo, su elevado costo y la destrucción de la muestra. El procedimiento utilizado consiste en la toma de la muestra de suelo, posterior determinación de su masa en el estado natural, secado en estufa a 103 ± 3 °C hasta alcanzar masa constante y determinación de la masa final en estado seco. Con los datos obtenidos se aplica la expresión indicada anteriormente.

-Reflectometría (TDR). Se basa en la relación que existe entre el contenido de humedad del suelo y su constante dieléctrica. El agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la del suelo, por lo que esta propiedad para el suelo húmedo dependerá principalmente de su contenido de humedad. Las principales ventajas que presenta radican en que el método funciona en un amplio rango de suelos, presenta una calibración universal, muestra la medida de humedad volumétrica, se puede medir el contenido de humedad en forma continua y en muchos puntos automáticamente con un equipo. Su precisión oscila en ± 2 %. En tanto, sus desventajas derivan de que presenta un alto costo y necesita instalaciones previas de tubos de acero en el lugar donde se deben efectuar las mediciones, los que deben quedar con un estrecho contacto con el suelo. El procedimiento de trabajo consiste en medir la constante dieléctrica del suelo aplicando una onda electromagnética de alta frecuencia y determinando su velocidad de propagación. El resultado surge de relaciones que contemplan que a un mayor tenor de humedad, menor será la velocidad de la onda.

-Aspensor de Neutrones. Se basa en la liberación de neutrones rápidos desde una fuente apropiada y en la detección de la cantidad que rebota sobre núcleos de hidrógeno. El hidrógeno se asocia directamente a la presencia de agua en el suelo

siempre que no se trate de material con elevado contenido de raíces o materia orgánica. En este último caso los errores pueden ser considerables de no realizarse una calibración previa. Las ventajas que presenta, si se toman los recaudos para cada tipo de suelo, es que realiza una determinación muy precisa. Entre las desventajas se puede mencionar el alto costo del equipo, el que trabaja con radiación, y su lentitud para efectuar las determinaciones.

Dentro de los métodos indirectos se encuentra un gran número de los actualmente existentes. Si bien no son mas exactos, cuando están aplicados en forma correcta presentan una muy importante ventaja en cuanto al tiempo utilizado y además requieren mucho menos esfuerzo. Como desventaja puede señalarse, en forma general, el costo inicial del equipamiento necesario y la necesidad de su calibración en forma previa a su aplicación. Entre otros se pueden señalar los siguientes:

-Determinación por tensiómetros. Es un método indirecto que permite determinar el contenido de humedad del suelo por medio de la determinación del potencial mátrico. Funciona en el rango de 0 a 70 kPa, lo que corresponde aproximadamente al 50 % de la humedad aprovechable. Presenta la ventaja de requerir un equipamiento de bajo costo y de relativamente sencilla utilización. Como desventajas puede señalarse que tiene un rango de utilización limitado, no mide el potencial osmótico que en ciertos casos puede ser mayor al mátrico, tiene una lenta respuesta, no es utilizable en suelos de textura gruesa o que se encuentren muy secos, y además no presenta una lectura del contenido de humedad sino de presión, que luego debe ser relacionada con aquella.

-Bloques de Resistencia. Su principio de funcionamiento se basa en la capacidad de absorber humedad de un bloque, generalmente de yeso, que lleva en su interior un par de electrodos que se utilizan para medir la resistencia del mismo. Esta resistencia varía en función de la humedad que absorbe del suelo hasta lograr el equilibrio. Estos dispositivos funcionan para contenidos de humedad retenidos con presiones comprendidos entre 50 y 1500 kPa, por lo que son adecuados para suelos secos como complemento a la utilización de los tensiómetros. Dentro de las principales desventajas se pueden señalar su escasa precisión en suelos húmedos, su lenta respuesta, presencia de efectos de histéresis, y que las mediciones pueden verse

afectadas por la temperatura.

-Sicrómetro de Termocupla. Este dispositivo se basa en el hecho de que, cuando existe equilibrio higroscópico entre el suelo y el aire de una cápsula, se igualan los potenciales de agua del suelo y del vapor de agua contenido en aquella. El aparato utilizado consiste en una cápsula de cerámica que se introduce en el suelo y en su interior se mide la humedad relativa. El procedimiento constituye un método indirecto debido a que permite determinar el potencial hídrico y a través de él el contenido de humedad del suelo. La principal ventaja que presenta es su aptitud para funcionar en un amplio rango de presiones, comprendido entre 200 y 1500 kPa. Las principales desventajas radican en que las mediciones de humedad relativa están influenciadas por la temperatura. En este sentido se debe tener en cuenta que en las capas superficiales hay variabilidad de temperatura y que en suelos salinos las sales se pueden depositar en las paredes de la cápsula a medida que el suelo pasa desde una condición húmeda a una seca. En consecuencia, el sistema se inactiva. Por último, el método no funciona bien en suelos con un elevado tenor de humedad.

2.3 El agua y los cultivos

Los estomas sobre la epidermis de las hojas son las válvulas que permiten la difusión del vapor de agua desde éstas a la atmósfera y simultáneamente permiten la entrada de dióxido de carbono para su fijación en el proceso de fotosíntesis. Por lo tanto, la acumulación de biomasa en el cultivo está muy relacionada con la posibilidad que tienen las plantas de extraer el agua del suelo para satisfacer sus requerimientos (Gil 2001). La Figura 2.2 es ilustrativa en este aspecto.

La cantidad y tasa de absorción de agua y nutrientes que llevan a cabo las plantas, dependen de la habilidad de las raíces para absorber la solución del suelo con el que está en contacto. También están relacionadas a la capacidad que tiene el suelo de suministrarla y trasmitirla a una velocidad tal que permita satisfacer los requerimientos de transpiración y crecimiento.

Cualquier factor adverso que altere el crecimiento y actividad de las raíces, como la presencia de capas compactadas, o estado hídrico, aireación y temperatura

inadecuados, entre otros, puede afectar parcial o severamente la actividad radical y por lo tanto la capacidad de producción del cultivo. Del mismo modo pueden incidir fuertemente algunas propiedades del suelo, tales como una baja conductividad hidráulica que limite el libre suministro de agua a las raíces.

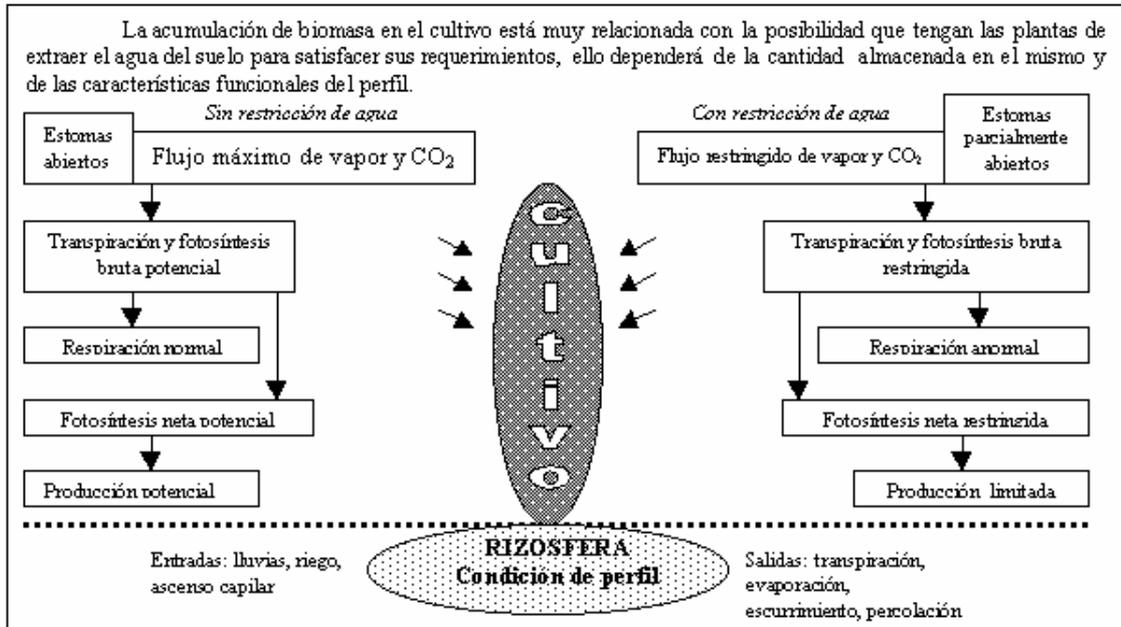


Figura 2.2: Esquema de desarrollo de un cultivo con y sin déficit hídrico (adaptada de Gil 2001)

Los vegetales se encuentran sometidos constantemente a factores que pueden afectar su integridad, tales como los producidos por temperaturas anormales, condiciones físicas y químicas desfavorables en el suelo, y la presencia de elementos patógenos. Sin embargo, a largo plazo, el déficit hídrico reduce el crecimiento y la producción de los cultivos más que todos los otros factores combinados, principalmente porque se involucra en todos los procesos físicos y químicos del organismo (Santa Olalla y De Juan 1993).

El estrés hídrico puede llegar a afectar negativamente al conjunto de las funciones fisiológicas de la planta, como la fotosíntesis, la respiración y otras reacciones metabólicas diversas, además de repercutir en variaciones anatómicas sobre el crecimiento, la reproducción y el desarrollo del fruto y la semilla. En términos agronómicos estos efectos se traducen en disminuciones del rendimiento

cuantitativo y/o cualitativo, como la modificación de la composición química de los productos agrícolas (Israelsen y Hansen 1985).

La capacidad de almacenamiento de agua en los tejidos de la mayoría de los cultivos es muy limitada, por lo que el equilibrio hídrico de la planta entre el ingreso y egreso de agua se debe mantener en forma constante. Consecuentemente, para restaurar el desequilibrio que produce la pérdida de agua por transpiración, la planta absorbe agua desde el suelo.

Las plantas pueden expresar su máximo potencial de producción si cuentan con un ambiente edáfico apropiado. Para que un suelo ofrezca óptimas condiciones de funcionamiento en este aspecto debería presentar una estructura estable, capaz de permitirle al vegetal la expresión de su potencial de crecimiento, sobre todo del sistema de raíces, sin impedimentos para la exploración del mayor volumen de suelo posible. Ello implica:

- Condiciones de superficie con buena estabilidad de agregados para una correcta entrada y circulación de agua y aire, y transferencia de calor en el suelo.
- Buena capacidad de almacenaje de agua y libre movimiento, desde el suelo a la raíz, de la solución compuesta por agua más nutrientes.
- Ausencia de limitaciones, ya sean genéticas (naturales) o inducidas, en la profundidad del suelo para el desarrollo de raíces.

La evaporación es la pérdida de agua de la superficie del suelo hacia la atmósfera a través de la vaporización del agua líquida. Este proceso ocurre si en la superficie existe una cantidad de agua disponible, además de la energía necesaria para el cambio de estado físico.

En una superficie de suelo que se encuentre desnuda y húmeda, la tasa de evaporación depende de factores meteorológicos y edafológicos. En general cuando se presenta una tasa de evaporación baja, ésta está gobernada y condicionada principalmente por factores meteorológicos, debido a que la conductividad hidráulica del suelo y el gradiente de potencial son suficientes para mantener la superficie del suelo húmeda. En tanto, si la tasa de evaporación es elevada, dependerá principalmente de las características del suelo, ya que la velocidad de evaporación es mayor a la velocidad de ascenso capilar y difusión de vapor, por lo que la superficie del suelo se deseca (Santa Olalla y De Juan 1993).

Perrier (1984) define el concepto de evapotranspiración como “la pérdida total de agua de una cubierta vegetal bajo forma de vapor a través de la evaporación y transpiración durante un intervalo de tiempo dado”. Según lo señalado, la evapotranspiración es la suma de los términos evaporación y transpiración. Ritchie (1972) demostró que el proceso de evapotranspiración está limitado principalmente por la demanda evaporativa de la atmósfera, por las características del suelo, por la cantidad de agua disponible y por el tipo de cubierta vegetal, es decir, está determinado por factores meteorológicos, biológicos y edafológicos. Sin embargo, el proceso no se puede atribuir a alguno de ellos en forma exclusiva. El medio ambiente local, las prácticas agrícolas y de regadío, las plagas y enfermedades, los fertilizantes y otros factores que afectan las tasas de crecimiento, influyen también, de forma directa o indirecta, en la evapotranspiración (Doorenbos y Pruitt 1976).

Cuando el cultivo se encuentra en sus primeros estados de desarrollo, el componente principal de evapotranspiración es la evaporación. A medida que el cultivo se va desarrollando, aumentando el área foliar y la cobertura, la transpiración comienza a tomar importancia, hasta representar el principal componente de evapotranspiración, llegando a comprender entre el 90 % y el 95 % de ésta, siendo mínimas las pérdidas por evaporación por el alto porcentaje de cobertura (Ritchie 1972).

Del total de agua absorbida por las raíces, sólo una pequeña parte es retenida por la planta en los procesos fisiológicos y como parte de las células, siendo transpirada la mayor parte. Se puede citar a modo de ejemplo que aún en el caso de una planta de maíz estos valores pueden alcanzar hasta tres kilogramos de agua por día (Taiz y Zeiger 1993). Este proceso se realiza principalmente por la superficie de las hojas a través de pequeños poros oclusibles llamados estomas, mediante los cuales el vapor de agua escapa por difusión debido a una diferencia de potencial hídrico entre la hoja y la atmósfera. Generalmente, el potencial hídrico de la atmósfera es mucho menor que el de la hoja, y la intensidad del proceso depende del gradiente de presión de vapor (Sívori 1986).

La transpiración ejerce además un rol muy importante en el balance energético de la planta, ya que la evaporación es un proceso refrigerante muy eficaz, que se rige por la distribución de Maxwell-Boltzmann para las velocidades

moleculares. Esta distribución sostiene que las moléculas de agua que poseen velocidades elevadas se evaporan, y al abandonar la superficie del líquido, la velocidad promedio de las moléculas restantes se ve disminuida, es decir que el líquido se enfría. Para evaporar 1 kg de agua a 30 °C se necesitan 580 kcal y la energía requerida se denomina calor latente de vaporización (Salisbury y Ross 1994). En el caso de las plantas el agua es transpirada desde la superficie de las hojas, por lo que el calor latente evaporado es absorbido de éstas, generando su efectivo enfriamiento con respecto al ambiente (Jensen y Salisbury 1988). En la mayor parte de las plantas los estomas se mantienen abiertos por lo menos una parte del día y se cierran durante la noche, siendo éste un mecanismo que reduce efectivamente la pérdida total de agua (Israelsen y Hansen 1985). Salisbury y Ross (1994) describen los efectos del ambiente sobre los estomas:

- Luz. Los estomas de la mayoría de las especies se abren al amanecer y se cierran en la oscuridad. La razón se encuentra en que ante la presencia de luz, los estomas se mantienen abiertos y mantienen la concentración de CO₂ necesaria para la fotosíntesis.

- CO₂. El aumento de la concentración de dióxido de carbono por sobre los niveles normales que se encuentran en el aire provoca el cierre de los estomas, debido a que ellos responden a niveles intercelulares de CO₂ y no a la concentración en la superficie de la hoja o en el poro estomático.

- Humedad relativa del aire. Teniendo en cuenta que la transpiración es un proceso de difusión de vapor desde la cámara estomática a la atmósfera debido a un gradiente, como ya se expresó, a menor humedad relativa mayor es el gradiente y, por lo tanto, mayor es la velocidad de transpiración. Los estomas de muchas especies son muy sensibles a la humedad atmosférica, cerrándose cuando la diferencia entre el contenido de vapor del aire y de los espacios intercelulares supera un nivel crítico. Un gradiente pronunciado induce al cierre, pero se mantiene con una periodicidad de apertura de 30 minutos debido a que el CO₂ interno se agota y provoca la apertura.

- Temperatura. Incrementos de temperatura entre 0 °C y 30 °C producen aumentos de la apertura estomática, disminución de la humedad relativa, y, por consiguiente, aumento de la tasa transpiratoria. Esto es debido a que en la cavidad estomática disminuye la concentración de CO₂ porque se acelera el proceso de

fotosíntesis. Además se aumenta el gradiente de humedad al disminuir la humedad relativa del aire, por lo que se incrementa la velocidad de transpiración. Si la temperatura se eleva sobre los 35 °C o 40 °C, en la mayoría de los cultivos los estomas se cierran debido a un incremento del CO₂ interno por inhibición de la fotosíntesis y altas tasas respiratorias.

- Velocidad del viento. Éste provoca generalmente un cierre parcial o total de los estomas, que depende de su intensidad, la que tiene influencia sobre la llegada de CO₂ hasta aquellos, aumentando su difusión hacia el interior de la hoja. También puede incrementar la transpiración, provocando estrés hídrico y el cierre de estomas.

- Contenido de humedad del suelo. La disminución del contenido de humedad del suelo repercute en la cantidad de agua disponible para la planta, afectando directamente la transpiración. Con contenidos de humedad cercanos a la capacidad de campo, los estomas se mantendrán abiertos y la planta transpirará a su potencial, mientras que en las proximidades del punto de marchitez permanente los estomas se cierran y la transpiración se inhibe con el fin de evitar la pérdida de turgidez. A medida que el potencial hídrico de la hoja disminuye debido a baja disponibilidad de agua, los estomas se cierran. Este efecto es el más dominante de todos los factores debido a su valor protector durante la sequía, prevaleciendo incluso sobre niveles intracelulares bajos de CO₂ y sobre la luz intensa. Los niveles de absorción de agua desde el suelo y la transpiración usualmente no son iguales en la planta. Cuando la transpiración es más lenta que la absorción, el exceso es almacenado en el tejido. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de agua en las plantas es muy limitada por lo que disminuye el gradiente de potencial entre la planta y el suelo, disminuyendo también la absorción. Por el contrario, cuando la transpiración es mayor que la absorción, el déficit es cubierto por el agua del tejido, originando una disminución del potencial hídrico de la hoja y el posterior cierre estomático (Hsiao 1990). Cambios en el potencial hídrico de las hojas afectan directamente a la turgencia de las células de guardia, provocando el cierre parcial o total de los estomas en condiciones de déficit de presión de vapor y/o hídrico (Jones 1985). En presencia de déficit hídrico disminuye el potencial hídrico de las hojas, acumulándose ácido abscísico en los tejidos antes que los estomas se cierren, lo que sugiere que el cierre de estos en respuesta al mencionado estrés es mediado por el ácido nombrado

(Jensen y Salisbury 1988). Davies et al. (1986) proponen que el cierre estomático mediado por el ácido abscísico se produce cuando las hojas no están sometidas a estrés hídrico pero existe una disminución del potencial hídrico del tejido radicular. Zhang y Davies (1990) plantean que el ácido abscísico proveniente del sistema radicular provocaría el cierre estomático en situaciones de déficit hídrico. Obtuvieron una estrecha relación entre el bajo contenido de humedad del suelo, una reducción de la conductancia estomática y la concentración del referido ácido en el xilema. Sin embargo, la disminución de la conductancia estomática no tuvo relación con la concentración de ácido abscísico en la hoja.

2.4 Influencia de las forestaciones en el ciclo del agua

Una cubierta forestal se diferencia de una herbácea por la gran cantidad de agua que puede perder por intercepción (Crockford y Richardson 1990). Además, según el tamaño y la forma de las copas de los árboles, una cantidad variable de la precipitación alcanza el suelo, utilizando como senda de fluido el tronco de los árboles. En la Figura 2.3 pueden observarse esquemáticamente todos los componentes que intervienen en el ciclo hidrológico de una forestación.

La importante extensión vertical que tiene el sistema radicular de los árboles, les permite aprovechar el agua edáfica hasta una mayor profundidad que los otros vegetales. Esta característica aumenta la transpiración, porque los mayores consumos de agua se registran en cubiertas vegetales que tienen un sistema radicular más profundo y mejor desarrollado (Kramer 1974; Le 1980). En este sentido Soares y Almeida (2001) dicen que del resultado destructivo de 24 árboles originarios de 8 diferentes clones, la máxima penetración observada para las raíces fue de 2,2 metros y que su concentración fue mayor en los primeros 1,5 m desde la superficie. El consumo de agua por evapotranspiración se puede calcular analíticamente mediante la ecuación general de continuidad del balance hídrico (Feller 1981).

Esta ecuación supone que cuando un suelo deja el estado de saturación y comienza a disminuir su contenido de agua, la percolación es nula o despreciable. Por lo tanto, toda disminución del agua edáfica es producto de la evaporación. Según

Hibbert (1976), esta situación corresponde a un contenido de agua del suelo equivalente a la de su capacidad de campo. En esta situación, la evapotranspiración se determina con la siguiente relación:

$$evtp = n + w - a$$

Donde:

evtp: evapotranspiración; n: precipitación; w: variaciones del contenido de agua edáfica; a: escorrentía superficial.

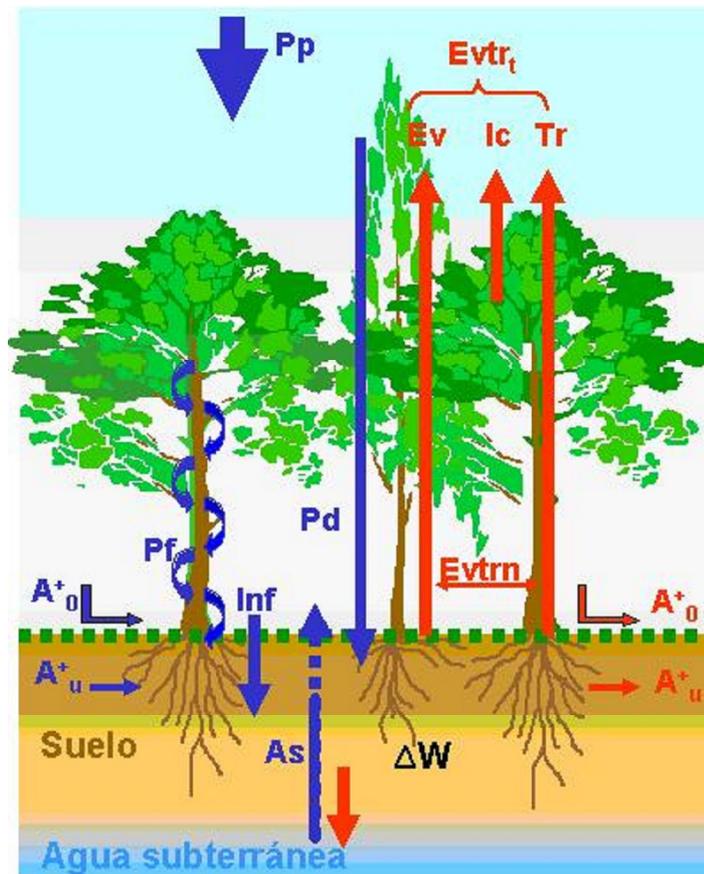


Figura 2.3: Componentes del balance hídrico de una forestación

(Adaptado de Huber 2003); Pp: precipitación total; Pd: Precipitación directa; Pf: Escurrimiento fustal; Ic: Pérdidas por interceptación; A_o: Escurrimiento superficial; A_u: Escurrimiento sub superficial; Inf: Infiltración; Tr: Transpiración; Ev: Evaporación; Evtr_n: Evapotranspiración neta; Evtr_t: Evapotranspiración total; As: Aportes de agua subterránea; Δw: Variación del contenido de agua del suelo.

Para concluir, y atendiendo a los objetivos de este trabajo, es importante señalar, en relación a la influencia de las forestaciones sobre el ciclo del agua, que la planta no puede captar toda la humedad aprovechable del suelo sin que se afecte el rendimiento productivo. Cuando el terreno tiene un contenido de agua cercano al punto de marchitez permanente ella no puede seguir absorbiendo agua con facilidad. Por otra parte, el suelo tiene una capacidad máxima de retención de humedad, determinada por la capacidad de campo, por sobre la cual se produce un drenaje libre a través de su perfil.

3 Programa experimental

En el presente capítulo se presentan los criterios empleados para seleccionar los sitios utilizados para el trabajo de campo, así como para localizar las perforaciones. Se describen las condiciones climáticas y del perfil del terreno en cada lugar. Se detallan las tareas de extracción de muestras, su acondicionamiento, traslado al laboratorio y determinaciones efectuadas en este último. Por último se presenta el criterio adoptado para el procesamiento de datos y su análisis estadístico.

3.1. Selección de los sitios y planificación de los sondeos

El programa experimental se organizó en función de alcanzar los dos objetivos planteados, los que ya fueron expuestos en la Introducción.

Selección de los sitios

Con el propósito de evaluar el contenido de humedad del suelo donde se implantan forestaciones de *Eucalyptus grandis*, primer objetivo planteado, se planificó la ejecución de sondeos en dos plantaciones de esta especie que presentan terrenos con perfiles típicos de la región, aunque no exactamente iguales entre sí, y que en adelante se denominan sitio a y sitio b. Los terrenos donde se encuentran ambas plantaciones están libres de factores que pudiesen introducir variables no controladas con influencia sobre el contenido de humedad del suelo, tales como irregularidades superficiales, lo cual se consideró de fundamental importancia para este trabajo. Es de destacar también que las forestaciones seleccionadas exhiben diferentes edades, lo que favorece el enriquecimiento del análisis a efectuar con los resultados.

El sitio a, ubicado 7 km al sur de la ciudad Ubajay, provincia de Entre Ríos (latitud 31° 51' S, longitud 58° 20' O) es especialmente apto para estudiar las variaciones del contenido de humedad del suelo en el interior y en la frontera de la plantación, pero en el exterior de la misma el análisis se puede efectuar hasta una distancia de 10 m porque la existencia de un camino cercano podría introducir variables no controladas si el estudio se extendiese a mayor distancia. Este predio se ilustra en la Figura 3.1. El sitio b, ubicado 3,5 km al sur de la ciudad de Ubajay, provincia de Entre Ríos (latitud 31° 49' S, longitud 58° 18' O) se encuentra a una distancia de 4,5 km del anterior en dirección noreste. La selección de este segundo sitio se llevó a cabo porque el mismo ofrece la posibilidad de estudiar el impacto de esta especie sobre el contenido de humedad del suelo hasta una distancia de 30 m hacia el exterior de la frontera, la cual se considera suficiente a los fines de esta

investigación. Esta circunstancia es posible porque este sitio no presenta, en las cercanías del borde de la plantación, factores que puedan introducir variables no controlables con influencia sobre los resultados, tales como depresiones, otras forestaciones, caminos, canalizaciones, etc. (ver Figura 3.2).

La forestación del sitio a, con 62 ha, corresponde a un rebrote de primer corte de 6 años de edad al comienzo de la investigación, con una densidad de 800 árboles/ha, una altura promedio de 15 m y un área basal de 28 m²/ha, sin tratamientos silviculturales. Se originó con semilla comercial de *Eucalyptus grandis*. La del sitio b tenía 33 años de edad al comienzo de las tareas y la superficie cultivada ocupada en ese momento alcanzaba las 47 ha con una densidad de 1000 árboles/ha, una altura promedio de 36 m y un área basal de 48 m²/ha. Se originó con semilla comercial de *Eucalyptus grandis* y no tuvo tratamientos silviculturales.

A su vez, con el fin de comparar el contenido de humedad del suelo en una forestación de *Eucalyptus grandis* y en una de *Pinus taeda*, segundo objetivo planteado, en el sitio a, ya mencionado anteriormente, se capitalizó la existencia de una plantación de *Pinus taeda* (53 ha) de 6 años de edad al comienzo de la investigación. Ésta cuenta con una densidad de 1000 árboles/ha, una altura promedio de 8 m y un área basal de 17.5 m²/ha, sin tratamientos silviculturales en ese período. Se originó con semilla de *Pinus taeda* origen Marión, lote 131, Florida. Como surge de los datos expuestos, ambas plantaciones ubicadas en el sitio a presentan una edad similar y se ubican adyacentemente sobre el mismo terreno. Considerando que éste a su vez no tiene en su superficie características que puedan introducir variables no controladas que afecten la comparación de los resultados, tales como las mencionadas anteriormente, las condiciones resultan especialmente propicias para la realización de un estudio comparativo entre ambas especies. Es decir que el sitio a puede ser utilizado convenientemente para abordar las tareas ligadas a ambos objetivos, siendo una de las razones fundamentales que motivó su selección.

Es de destacar que para esta etapa se contó con la muy valiosa colaboración de dos empresas ligadas a la actividad forestal, cada una propietaria de uno de los sitios mencionados, las cuales proporcionaron el apoyo necesario para dar cumplimiento a la tarea de encontrar los lugares adecuados para realizar el trabajo de campo necesario para el logro de los objetivos. A su vez, ellas favorecieron

continuamente el desarrollo del trabajo, facilitando el acceso cuando era requerido, y se mostraron muy interesadas en conocer y utilizar los resultados de la investigación.

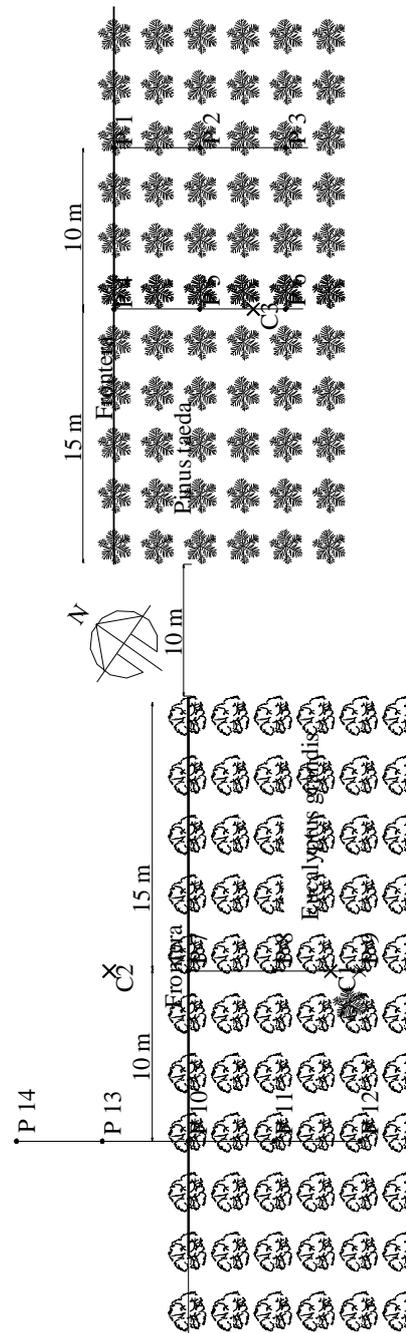


Figura 3.1: Ubicación de los sondeos realizados en las forestaciones del sitio a
P: pozo, C: calicata

Planificación de los sondeos

En todos los casos la ubicación de los sondeos se decidió teniendo en cuenta la importancia de contar con muestras representativas provenientes de distintas ubicaciones de cada plantación y con una cantidad de datos que minimice la influencia de eventuales situaciones fortuitas. Como se mencionó anteriormente, el sitio a se seleccionó por reunir los requisitos necesarios para llevar a cabo adecuadamente tareas vinculadas a los dos objetivos planteados. Con relación al segundo objetivo, o sea comparar la influencia de ambas especies sobre el contenido de humedad del suelo, los sondeos en ambas forestaciones adyacentes de este sitio (*Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda*) se diseñaron de manera de contar con material comparable incluso considerando la zona de obtención en cada plantación. Con este criterio, se planificó y ejecutó la extracción de muestras de 6 perforaciones ubicadas al azar en zonas donde no se observaron irregularidades locales, tanto en la frontera como en el interior de las plantaciones. La localización fue la siguiente: 2 sobre la frontera, 2 a 5 m de la misma y las otras 2 a 10 m de ella. Para aportar datos referidos al primer objetivo, es decir analizar el impacto del *Eucalyptus grandis* sobre el contenido de humedad del suelo, además de los 6 pozos que se mencionaron anteriormente, en la forestación de esta especie se ejecutaron 2 perforaciones exteriores localizadas una a 5 m y otra a 10 m de la frontera. La ubicación de ambas plantaciones y de los sondeos en el sitio a pueden apreciarse en la Figura 3.1.

En el sitio b, utilizado para extraer muestras destinadas a alcanzar el primer objetivo hasta una importante distancia desde el borde hacia el exterior de la plantación, se ejecutaron 10 perforaciones con la siguiente distribución: 2 sobre la frontera, 2 a 5 m, 2 a 10 m, 2 a 20 m y 2 a 30 m hacia el exterior de la misma. Un detalle esquemático de las perforaciones se indica en la Figura 3.2.

Para resolver la profundidad de la extracción de muestras se analizó bibliografía referida al tema. En este aspecto es de considerar que la máxima cantidad de raíces de este tipo de árboles se ubica en los dos primeros metros de profundidad (Soares y Almeida 2001; Rébori 2001; Lima 1996; Radersma y Ong 2004; Zhou et al. 2002). En el mismo sentido, Lane et al. (2004) reportaron que en estudios realizados hasta los 3,9 m de profundidad las diferencias estacionales en los

contenidos de humedad se observaron hasta los 2 m de profundidad. Tomando en consideración los antecedentes existentes, las perforaciones se proyectaron hasta una profundidad máxima de 2 m con extracciones de muestras de la superficie y luego cada 0,5 m hasta llegar al máximo indicado. Esta decisión implicó que de cada sondeo se extrajeran 5 muestras de suelo para analizar. Por otra parte, considerando la importancia que reviste conocer las variaciones del contenido de humedad del suelo durante el año, teniendo en cuenta los períodos secos y los lluviosos, se planificó la ejecución de los sondeos durante 12 meses consecutivos.

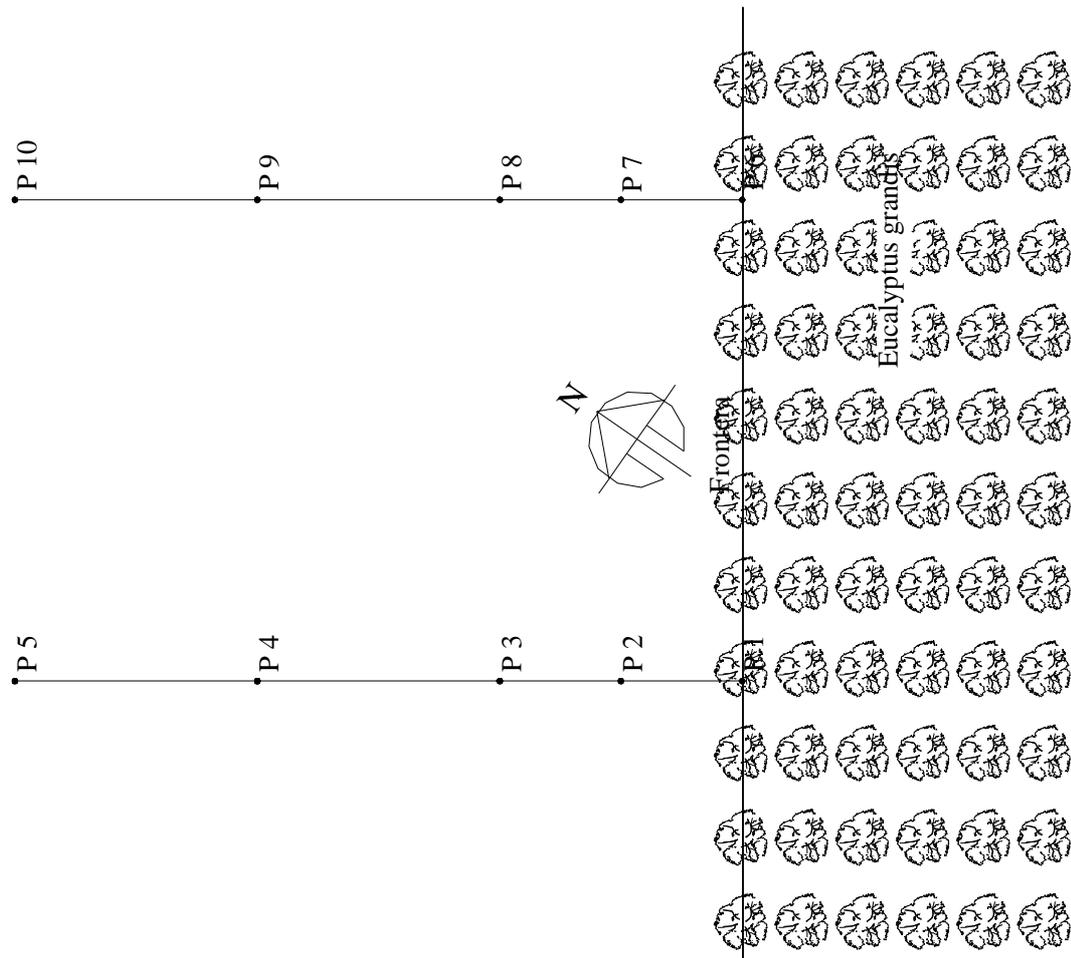


Figura 3.2: Ubicación de los sondeos realizados en la forestación del sitio b

3.2 Descripción del clima y del perfil del suelo

El clima de ambos sitios se caracteriza por ser de templado a cálido, húmedo en todas las estaciones, con veranos calurosos e inviernos no muy fríos. Los vientos predominantes son los del noroeste, este y sudeste y les siguen en importancia los del sur y el norte, en tanto los que soplan del oeste son muy escasos. Las precipitaciones están distribuidas en forma más o menos uniforme a lo largo del año, con un promedio cercano a los 1.200 mm. Su pico máximo se produce en los meses de Marzo, Abril y el mínimo en invierno, especialmente durante el mes de agosto. Según las mediciones realizadas en la últimas décadas por la estación experimental del INTA ubicada en la ciudad de Concordia, las heladas se producen entre los meses de mayo y septiembre. La humedad relativa media anual es del 75 % y, aunque las precipitaciones son más frecuentes en verano, la estación invernal es más húmeda que la estival, debido al menor período de insolación, sumado a la disminución de la intensidad de los rayos solares.

La topografía del área se caracteriza por ser de lomadas suaves con pendientes inferiores al 3 %. El suelo se caracteriza por una textura arenosa típica de la unidad fisiográfica "Terrazas arenosas onduladas a suavemente onduladas del Río Uruguay" perteneciente al Orden Entisoles comprendida en las series Yuquerí Chica y Yuquerí Grande para los sitios a y b respectivamente. El perfil estratigráfico de ambos sitios fue analizado en detalle utilizando en primera instancia las muestras de suelo extraídas para determinar el contenido de humedad, como más adelante se explica en detalle en este mismo Capítulo. Considerando que en el sitio a se encontraron estratos arcillosos con un cierto contenido de grava, los cuales por sus características pueden dificultar el paso del agua y de las raíces, posteriormente se decidió realizar 3 calicatas (en adelante C) ubicadas en los lugares de mayor importancia conforme a los objetivos planteados (ver Figura 3.1).

Se decidió ejecutar una calicata en el interior de la forestación de *Eucalyptus grandis* (C 1) otra en el exterior de la misma (C 2) y por último una en el interior de la forestación de *Pinus taeda* (C 3). La ubicación exacta de cada una de ellas se decidió al azar y sus dimensiones alcanzaron 0,8 m de ancho por 1,5 m de largo y 2,0

m de profundidad nominal. Esta última coincidió con la profundidad máxima adoptada para las perforaciones. Es de destacar que solo en la calicata ubicada dentro de la forestación de *Pinus taeda* (C 3) se logró alcanzar la profundidad mencionada, ya que en las restantes resultó imposible debido a la aparición de un manto de roca arenisca fuertemente cementada, lo que imposibilitó el avance de la perforación con herramientas comunes. En la C 1 fue posible alcanzar una profundidad de 1,80 m y en la C 2 una de 1,5 m (ver Figura 3.3). Para las excavaciones se emplearon herramientas manuales, tales como pala de punta y pala ancha, con las que se avanzó hasta cada una de las profundidades de estudio, es decir, 0,5 m, 1 m, 1,5 m y, de ser posible, 2 m. En cada una de ellas se obtuvieron muestras para determinar la densidad del suelo inalterado, y como información complementaria se calculó el contenido de humedad.

Una vez finalizada la excavación se procedió a describir detalladamente el perfil del suelo con ayuda de una cinta métrica, de la cual se hizo coincidir el origen con el nivel del terreno natural adyacente al pozo. La descripción esquemática de los perfiles obtenidos se presenta en la Figura 3.3.

La determinación de la densidad del suelo inalterado se llevó a cabo por medio del método del cono de arena. Su elección se decidió porque el laboratorio cuenta con el equipamiento necesario y por constituir el método de mayor utilización en obras civiles debido a la precisión que presentan sus resultados. El equipamiento utilizado consistió en un dispositivo de doble cono truncado con unión en sus vértices, donde se encuentra un grifo de apertura y cierre, y una bandeja de chapa galvanizada con un agujero en su parte central.

El perfil estratigráfico encontrado en la C 1 se desarrolla con las características que se describen a continuación. Desde la superficie y hasta 0,72 m de profundidad presenta un suelo areno-limoso con bajo contenido de materia orgánica, de color castaño grisáceo. Posteriormente se encuentra un manto de arena arcillosa que se extiende hasta una profundidad de 0,87 m, y luego, hasta 1,38 m, se ubica una arcilla arenosa, color rojizo-amarillenta, con motas rojizas debido a la presencia de óxido de hierro. Desde este estrato hasta 1,5 m se observa un suelo que continúa con características similares pero sin una presencia tan marcada de óxido de hierro. Por último, entre 1,5 m y 1,8 m, existe un suelo areno-limoso que se extiende hasta el

final de la perforación, que en este caso se produjo a una profundidad de 1,8 m debido a la imposibilidad de avanzar por la presencia de una arenisca continua.

Por su parte, la C 2, situada en el exterior de la forestación de *Eucalyptus grandis*, presenta un perfil con similares características a las anteriormente detalladas. Existen, no obstante, algunas diferencias de relieve que merecen destacarse. En primer lugar debe señalarse que los estratos que conforman el perfil están desplazados hacia arriba aproximadamente 0,2 m, y en segundo lugar que la transición entre la arcilla arenosa con motas rojizas y la arena limosa es directa. Consecuentemente, el manto rocoso aparece a una profundidad de aproximadamente 1,5 m.

Por último, la C 3, ubicada bajo la forestación de *Pinus taeda*, presenta algunas variaciones con respecto a las dos anteriormente descritas. Es necesario considerar que la distancia que separa a esta calicata de las otras es muy pequeña en el marco de la problemática analizada, ya que alcanza aproximadamente 40 m. El perfil encontrado en este lugar se desarrolla, a partir de la superficie y hasta 0,6 m, con un suelo de iguales características a los dos casos anteriores. Desde esa profundidad y hasta 0,97 m aparece un manto de arena arcillosa, que en su parte superior tiene incorporada una pequeña proporción de grava, la que se va intensificando en profundidad. A 0,97 m este manto se transforma, presentando una grava arcillosa muy compacta, y este horizonte permanece hasta 1,1 m. Estas características dificultaron en forma importante el avance de la perforación por medios manuales. A partir de la profundidad señalada desaparece la grava y el suelo se convierte en una arena arcillosa, que en profundidad incrementa en forma gradual la proporción de arena hasta el fin de la perforación.

La densidad del suelo seco, determinada en cada profundidad elegida para el muestreo como ya se expresó anteriormente, respondió a valores típicos para el perfil encontrado, que se situaron en un rango comprendido entre 1400 kg/m^3 y 1760 kg/m^3 .

El perfil estratigráfico del sitio b presenta diferencias con el del sitio a, a pesar de que ambos se encuentran separados por una distancia relativamente pequeña (4,5 km), como ya fue mencionado anteriormente. En este caso, se trata de un suelo arenoso profundo, que no presenta alteraciones hasta la máxima distancia investigada

desde la superficie (2 m). Su horizonte superior exhibe escasa cantidad de materia orgánica. Teniendo en cuenta que esta característica fue encontrada en los 10 sondeos efectuados, no se consideró necesario realizar calicatas en este sitio.

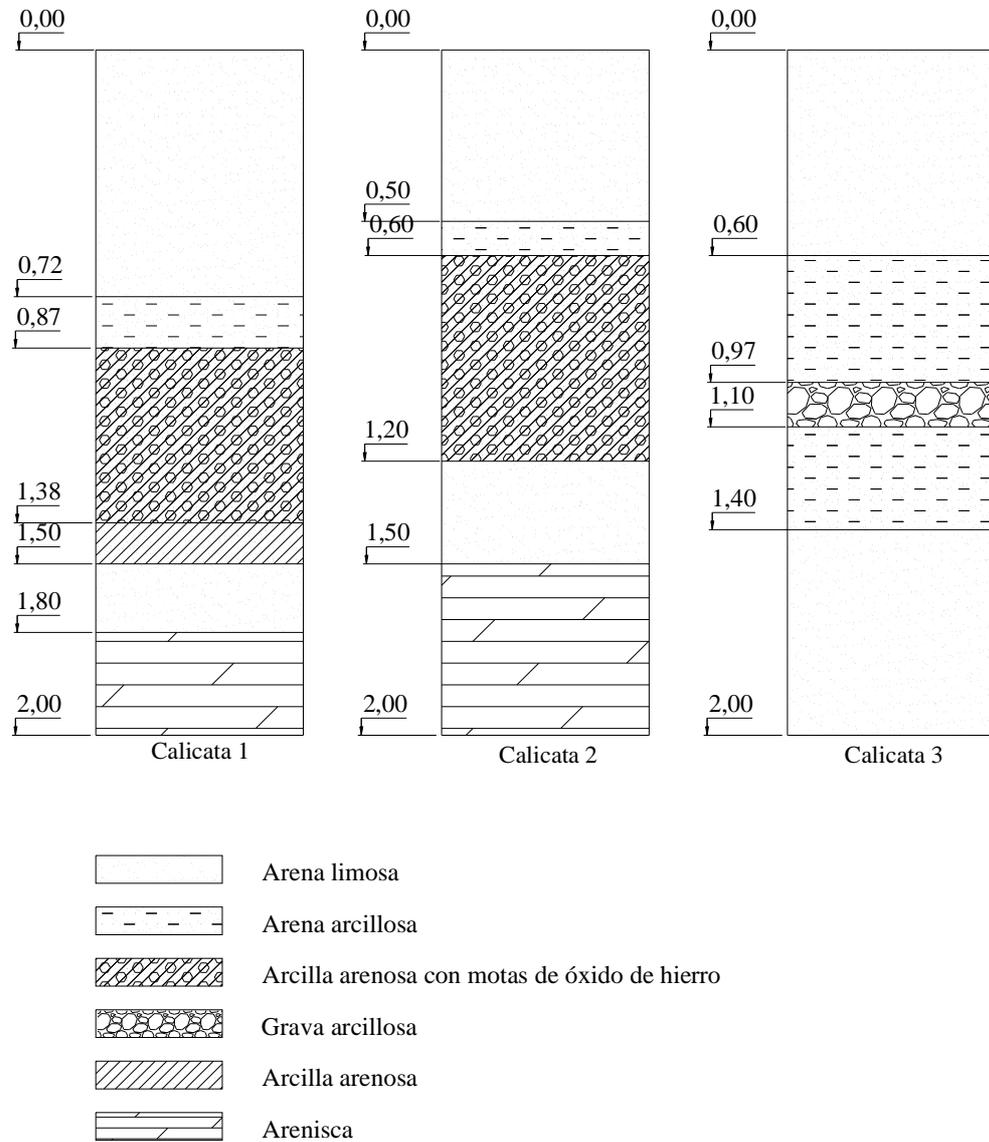


Figura 3.3: Perfil esquemático del sitio a obtenido de las calicatas

3.3 Obtención y preparación de las muestras

Durante el período comprendido entre el 29 de Junio de 2006 y 13 de Junio

de 2007, con una frecuencia mensual y en las fechas presentadas en la Tabla 3.1, se efectuaron las visitas a los sitios a y b para extraer las muestras de suelo necesarias para la investigación. En este cronograma no se incluye la realización de las calicatas. Como puede observarse, no se realizaron tareas de campo en el mes de Marzo de 2007, puesto que éstas fueron impedidas por las condiciones meteorológicas y de acceso vehicular a los sitios.

Tabla 3.1: Cronograma de las tareas de campo

Año 2006	29 Jun.	20 Jul.	14 Ago.	14 Set.	19 Oct.	21 Nov.	18 Dic.
Año 2007	18 Ene.	27 Feb.	19 Abr.	31 May.	13 Jun.		

Con anterioridad a las tareas de campo, cuya fecha de realización se indica en la Tabla 3.1 se tomaron muestras de suelo con el propósito de verificar la eficiencia de los equipos. Estas pruebas resultaron de gran importancia para ajustar el diseño de los mismos, adaptándolos a las características del suelo de los sitios seleccionados.

El equipamiento finalmente adoptado consistió en cuatro cucharas saca muestras, cilíndricas, de 0,35 m de longitud. Sus laterales se diseñaron parcialmente cerrados con el propósito de contener el suelo arenoso en épocas de escasa humedad y, para facilitar la extracción de muestras en estratos con un mayor contenido de arcilla, poseían dos ranuras laterales. El ingreso del suelo a las cucharas se producía por la parte inferior, donde disponían de dos aberturas con rampas de ingreso, inclinadas aproximadamente 30 °. Estas rampas estaban constituidas en sus extremos de un material de dureza especial y se encontraban parcialmente afiladas para mejorar su desempeño cuando se encontraban raíces u otros obstáculos.

Las cucharas se fijaban a las barras de operación por medio de un acople intercambiable. Cada barra estaba constituida por dos tramos de 1 m de longitud cada uno y un tercer tramo de 0,5 m. Se adoptó esta modulación porque la combinación de sus longitudes, a la cual se adicionaba la de la cuchara, posibilitaba una ejecución cómoda para los operarios en cada una de las profundidades muestreadas. El acoplamiento de los tramos, entre sí y con la cuchara, se efectuaba por medio de un encastre de sección cuadrada asegurado con un bulón. En el extremo superior de

cada barra, opuesto a la posición de la cuchara, se acoplaba y aseguraba de la manera descrita anteriormente una barra transversal que hacía las veces de manija, permitiendo un accionamiento adecuado para lograr la rotación y extracción.

En los casos en que el suelo hacía imposible el avance de la cuchara anteriormente descrita, se empleaba un cincel. Este consistía de una punta de acero, unida al extremo de un caño pesado del mismo material, con el que se impactaba el terreno a efectos de disgregar el suelo y facilitar el posterior acceso de la cuchara. Esta herramienta fue especialmente útil para perforar el manto que contaba con la presencia de gravas. El equipo de extracción de muestras se completaba con elementos auxiliares menores, tales como bandejas para almacenar transitoriamente el suelo extraído antes de colocarlo en bolsas selladas, y espátulas que facilitaban la extracción del suelo arcilloso del interior de las cucharas.

La comprobación definitiva del funcionamiento correcto del equipamiento se llevó a cabo el 15 de Mayo de 2006, oportunidad en la que se realizaron 6 perforaciones en el sitio a, 3 bajo cada una de las plantaciones ya descritas. Estos sondeos se ejecutaron con las mismas características que los ejecutados posteriormente durante todo el período de la investigación y confirmaron en consecuencia la aptitud del equipo preparado.

Las tareas se llevaron a cabo con la misma rutina durante todo el período que demandaron las actividades de campo. Luego de ubicadas las localizaciones programadas para los sondeos, los lugares precisos para efectuar las perforaciones se seleccionaron en todos los casos procurando que se encuentren en puntos equidistantes a los árboles más próximos, con el fin de minimizar la probabilidad de que alguna raíz importante obstaculice la penetración del equipo. Si bien en todas las oportunidades los pozos se rellenaron con el suelo remanente al finalizar las tareas, se adoptó el criterio de mantener una distancia mínima de 1 m entre un nuevo sondeo y otro anterior con el fin de evitar posibles alteraciones en el entorno cercano de la perforación. Para este propósito, el lugar de ejecución de cada pozo se identificaba de manera de poder reconocerlo al mes siguiente.

La extracción de muestras se llevó a cabo en forma simultánea en 3 pozos con la intervención de un operador en cada uno de ellos. Una cuarta persona asistía en forma permanente a los anteriores, tanto para la provisión de herramientas requeridas

como para colaborar en el proceso de ordenamiento e identificación del material obtenido. Cada sondeo se ejecutó en forma completa antes de comenzar el siguiente, de manera de evitar posibles desmoronamientos y controlar adecuadamente las profundidades de extracción. Como se expresó anteriormente, éstas se ubicaron sobre la superficie, a 0,5 m, a 1 m, a 1,5 m y finalmente a 2 m de profundidad.

Una vez obtenidas, las muestras eran colocadas en bolsas de polietileno con doble envoltura y convenientemente cerradas, de manera de minimizar eventuales cambios en el contenido de humedad del suelo. En este aspecto, pruebas realizadas con anterioridad al desarrollo de las tareas programadas, indicaron que en esas condiciones las variaciones en la masa de cada muestra podían considerarse despreciables, para el tiempo previsto entre la extracción del suelo y las determinaciones de laboratorio. La labor de campo, efectuada con una frecuencia mensual, para la extracción de las 120 muestras provenientes de las 24 perforaciones ubicadas en los 2 sitios, requirió en todos los casos alrededor de 3 horas.

El criterio de identificación de las muestras se encuentra esquematizado en la Figura 3.4. La primera letra del código empleado indica la ubicación del pozo respecto de la plantación, expresado como interior, frontera o exterior. El número siguiente aclara la distancia en metros a la frontera. Posteriormente, la letra minúscula se refiere al sitio, denominados a ó b, como se expresó anteriormente. Por último se ubican el número del pozo y la profundidad de extracción de la muestra (m).



Figura 3.4: Esquema del criterio de identificación de las muestras

3.4 Determinaciones efectuadas en el laboratorio

Luego de transportadas al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, las muestras fueron ordenadas siguiendo la numeración de los pozos en cada sitio y a su vez teniendo en cuenta la profundidad de extracción. La determinación inicial de la masa de cada muestra se efectuó utilizando una balanza Ohaus Explorer Pro, con capacidad máxima de 32000 g y una precisión de 0,1 g. Estas determinaciones oscilaron, para el total de las muestras, entre 300 g y 800 g, lo cual representó en todos los casos un tamaño suficiente para determinar el contenido de humedad del suelo y a su vez analizar las características de su composición.

Con la finalidad de mantener la trazabilidad de los datos y facilitar los controles, toda la información fue registrada en una planilla preimpresa. Inmediatamente antes de fraccionar la muestra para determinar el contenido de humedad, se realizaba un segundo pesaje de ella, el cual era contrastado con el inicial. Con este procedimiento de doble pesada de muestras completas se aseguró el control sobre eventuales variaciones de humedad entre el momento de la extracción y el procesamiento, ya que estas tareas no podían realizarse el mismo día (UNC 2003). Los resultados confirmaron que el método adoptado fue adecuado, pudiendo considerarse despreciables las variaciones en el contenido de humedad de las muestras en el período comprendido entre su extracción y su procesamiento final, el cual en ningún caso excedió 1 semana.

Determinación del contenido de humedad del suelo

Una vez realizada la operación antes descripta se procedió en cada caso a la determinación de la humedad de las muestras a través del método gravimétrico, ya descripto en el Capítulo 2. La adopción de este método fue decidida luego de compararlo con otros que exigen menor carga de trabajo, cuyas características también fueron expuestas en el capítulo anterior. No obstante, la disponibilidad de equipamiento adecuado y la mayor confiabilidad y precisión de este método en comparación con otros alternativos, que necesitan siempre ser calibrados y ajustados,

se consideró una razón válida para adoptarlo, aún aceptando una labor de mayor envergadura para este tipo de determinaciones.

Con este fin se determinó la masa húmeda (mh) de una pequeña cantidad de suelo proveniente de cada muestra. Se utilizó una balanza AND FX 3000 con una capacidad máxima de 3100 g y una precisión de 0,01 g.

Las determinaciones efectuadas en esta etapa oscilaron en el rango comprendido entre 20 g y 60 g. Con posterioridad el suelo se secó en una estufa marca Dalvo, Modelo BHRI, con regulación de temperatura y una precisión de ± 3 °C. Esta se configuró en 103 °C y se mantuvo a las muestras en ese régimen durante 24 hs como mínimo. La obtención de masa constante se verificó cuando dos pesadas sucesivas con intervalo de 1 h indicaron una diferencia menor al 0,1 %. Este valor fue registrado como masa seca o anhidra (ma). Con los datos obtenidos, aplicando la siguiente expresión, se obtuvo el contenido de humedad de la muestra como porcentaje de masa de agua sobre masa de suelo seco.

$$hg(\%) = \frac{(mh - ma)}{(ma)} \times 100$$

Para determinar la humedad expresada como Lámina (hl) se procedió de la siguiente forma:

$$hl(mm) = hg \times dap \times p$$

Donde:

dap: densidad aparente del suelo (g/cm^3)

p: profundidad considerada (mm)

Análisis de las características del suelo

Las muestras de suelo extraídas de los diferentes horizontes al efectuar los sondeos periódicos fueron descriptas sedimentológicamente en forma tacto visual, utilizándose, en caso de ser necesario, una cartilla granulométrica de comparación Soil Test. Por otra parte, se efectuó un análisis microscópico. Para esta tarea se utilizó un microscopio Olympus con aumentos correspondientes a oculares 10 x y objetivos 2 x. El modelo utilizado permite además realizar aumentos de 1 x a 4 x

(zoom) sobre los anteriores.

Las determinaciones de la densidad del suelo seco, efectuadas sobre las muestras extraídas al ejecutar las 3 calicatas ya citadas, se llevaron a cabo con el mismo equipamiento descrito anteriormente, que fuera utilizado para calcular el contenido de humedad del suelo.

En lo referente a la clasificación edafológica, se utilizó la carta de suelos realizada por el INTA para la región.

3.5 Tratamiento estadístico de los resultados

Luego de finalizadas las tareas de campo y de laboratorio, los datos obtenidos fueron ordenados y procesados utilizando una computadora y un software adecuados para darles tratamiento estadístico, y graficar los resultados. En las operaciones se utilizaron los símbolos matemáticos universales. Cuando se emplearon símbolos particulares los mismos son aclarados junto a su presentación. Las unidades se expresaron para todos los casos en el Sistema Internacional de Unidades actualmente vigente.

Para el análisis estadístico, la media aritmética fue adoptada como medida de centralidad y la desviación estándar y el coeficiente de variación, como medidas de la dispersión. Para este último caso fueron utilizados también los valores mínimo y máximo que determinan el rango de variabilidad.

La determinación del nivel de significación de las diferencias entre medias se llevó a cabo a través de la prueba de hipótesis nula con el modelo de Student. El cumplimiento de la hipótesis de igualdad entre las variancias de las muestras analizadas se verificó utilizando el test de Levene.

4 *Presentación y discusión de los resultados*

En el presente capítulo primeramente se presentan y luego se discuten los resultados obtenidos en la investigación empírica. El Apartado 4.1 se refiere al análisis del contenido de humedad del suelo en las dos forestaciones de *Eucalyptus grandis* ubicadas en los sitios a y b, conforme al Objetivo 1 planteado en la Introducción. En el Apartado 4.2 se hace un análisis comparativo del contenido de humedad del suelo bajo una de las coberturas de *Eucalyptus grandis* con el existente bajo una plantación de *Pinus taeda*, ambas ubicadas en el sitio a, según lo planteado en el Objetivo 2.

Los resultados para el contenido de humedad del suelo, obtenidos de las muestras extraídas de los sitios a y b, se presentan por separado en las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4. Este criterio de agrupación se adoptó para facilitar la observación de la información y su posterior análisis. Los símbolos para la identificación de las muestras (ver la columna 1 de las tablas mencionadas), la ubicación geográfica de los sitios y las características del perfil del suelo en cada caso, ya fueron detallados en el Capítulo 3.

La Tabla 4.1 exhibe los valores encontrados en las muestras extraídas del total de 6 pozos ubicados tanto sobre la frontera como en el interior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a. Puede observarse en la misma que en algunos casos no se presentan los resultados correspondientes a la mayor profundidad (2 m), y en una única oportunidad a la inmediata anterior (1,5 m), lo cual se debe a que resultó imposible perforar el estrato de arenisca continua que se encontró durante la realización de los sondeos (ver la Figura 3.3 del capítulo anterior). De todas formas y como puede apreciarse en la mencionada tabla, fue posible obtener una muy importante cantidad de datos y la ausencia de algunos puede considerarse irrelevante en el contexto general del trabajo. En la Tabla 4.2 se pueden ver los resultados encontrados para los 2 pozos efectuados en el exterior de la misma forestación. Puede apreciarse que no se indica la totalidad de los valores correspondientes a la máxima profundidad proyectada para los sondeos (2 m), por la misma razón ya expresada respecto del contenido de la Tabla 4.1. A su vez, la extracción de muestras se llevó a cabo en 11 oportunidades y no en 12 como en los otros casos, no disponiéndose de los resultados correspondientes a Junio de 2006.

La tabla 4.3 presenta la totalidad de los resultados obtenidos para el contenido de humedad del suelo a partir de las muestras colectadas en la plantación del sitio denominado b, de *Eucalyptus grandis*, en la cual se efectuó un total de 10 perforaciones ubicadas tanto sobre la frontera como en el exterior de la misma. En este caso se encuentran volcados los valores correspondientes a la totalidad de los pozos y para todas las profundidades previstas, en razón de que la naturaleza del perfil del suelo en este sitio permitió ejecutar sin inconvenientes las perforaciones proyectadas.

Tabla 4.1: Contenido de humedad del suelo (%) en la frontera y el interior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a

Muestra	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Sep-06	Oct-06	Nov-06	Dic-06	Ene-07	Feb-07	Abr-07	May-07	Jun-07
F0a7-0,0	7,5	3,4	6,0	3,4	3,9	5,5	9,1	8,0	9,3	6,4	6,0	7,2
F0a7-0,5	10,3	6,6	4,6	3,7	3,7	8,0	29,0	3,5	3,8	7,4	6,3	5,4
F0a7-1,0	12,8	13,5	10,5	9,6	17,0	14,9	16,4	13,6	13,6	16,2	18,6	13,3
F0a7-1,5	9,3	9,5	9,7	9,9	9,6	7,8	13,1	11,9	11,2	14,0	13,0	11,5
F0a7-2,0	6,1	6,4	13,0	7,7	5,4	6,2	12,2	9,6	7,7	11,0	9,5	10,6
I5a8-0,0	7,8	3,4	6,5	2,5	5,7	8,0	9,8	5,2	9,3	7,7	7,7	6,5
I5a8-0,5	8,9	5,2	3,6	4,1	3,3	9,2	9,6	4,6	3,0	8,2	6,9	6,3
I5a8-1,0	14,5	13,3	14,1	16,9	13,8	12,0	14,3	15,8	12,5	19,0	7,4	9,6
I5a8-1,5	7,5	9,5	10,0	7,0	7,0	8,1	10,2	9,6	8,1	9,8	12,6	11,9
I5a8-2,0	8,6	4,5	5,5	5,1	6,8	9,8	8,8		6,8	10,6	7,1	7,7
I10a9-0,0	6,6	5,7	7,2	4,5	6,7	7,3	9,1	6,4	9,0	6,7	6,9	4,2
I10a9-0,5	7,9	5,2	6,2	4,3	4,6	7,5	7,7	3,1	9,8	11,2	6,9	5,8
I10a9-1,0	17,3	5,6	15,3	3,9	2,9	3,7	9,6	10,0	13,8	14,1	6,4	7,5
I10a9-1,5	9,0	5,8	6,3	7,8	4,5	10,4	8,8	11,9	8,8	13,7	8,0	13,3
I10a9-2,0	6,7	5,4	5,6	4,7	4,1	7,2	8,3			12,8	6,9	6,3
F0a10-0,0	7,6	4,5	5,7	3,5	5,6	6,9	8,8	8,8	8,6	9,2	4,8	3,1
F0a10-0,5	14,8	6,2	15,5	3,9	5,7	9,4	18,1	6,9	9,3	20,6	10,6	4,6
F0a10-1,0	10,8	12,8	11,9	14,6	11,9	13,6	15,1	15,0	10,3	16,2	13,4	16,2
F0a10-1,5	10,7	5,7	10,1	10,0	10,6	10,8	10,1	11,1	8,3	10,4	12,3	10,4
F0a10-2,0	8,5			8,0	8,0	8,8	10,9	10,9	9,1			8,2
I5a11-0,0	7,8	4,4	11,0	2,6	5,9	6,9	9,8	7,8	10,0	11,2	4,8	4,9
I5a11-0,5	21,6	14,4	12,4	7,7	3,8	11,8	12,5	4,7	13,2	14,4	12,4	6,0
I5a11-1,0	14,0	13,1	12,4	11,5	13,0	13,6	15,4	12,0	14,1	15,3	5,3	15,1
I5a11-1,5	8,4	11,2	12,7	10,3	9,1	9,6	10,5	11,3	9,5	15,6	8,9	7,9
I5a11-2,0	9,3					7,7	7,6		9,2		12,4	11,8
I10a12-0,0	5,9	9,4	8,3	4,1	10,0	6,6	8,7	11,9	9,7	7,8	5,7	5,8
I10a12-0,5	13,2	8,0	17,3	3,5	5,6	10,4	10,5	5,8	7,6	8,7	10,3	7,5
I10a12-1,0	13,3	14,0	11,8	14,1	14,6	14,6	17,2	11,2	13,2	16,4	15,7	5,9
I10a12-1,5	14,3	10,5		9,1	7,0	10,0	13,1	11,4	10,3	15,4	13,4	5,8
I10a12-2,0	8,0	6,5				6,9	12,6		11,1	15,5		

Tabla 4.2: Contenido de humedad del suelo (%) en el exterior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a

Muestra	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Sep-06	Oct-06	Nov-06	Dic-06	Ene-07	Feb-07	Abr-07	May-07	Jun-07
E5a13-0,0		5,2	8,4	2,2	5,1	5,2	9,4	7,7	11,6	8,8	5,6	3,1
E513-0,5		13,3	16,8	4,7	8,4	10,9	13,7	42,0	14,4	18,2	23,4	14,4
E513-1,0		12,9	13,7	13,6	11,8	12,3	12,6	11,9	12,5	15,7	14,8	15,9
E513-1,5		10,6	9,1	10,7	9,5	5,9	9,7	11,6	10,5	24,9	9,4	12,8
E513-2,0								8,6		14,0	14,9	
E10a14-0,0		7,1	10,2	4,2	8,7	6,2	12,5	10,0	13,8	12,4	8,3	7,3
E10a14-0,5		23,6	20,7	16,8	8,4	17,3	13,3	19,1	20,0	19,5	22,5	11,4
E10a14-1,0		12,9	15,9	12,4	12,4	15,1	13,1	13,8	12,7	17,1	14,3	17,1
E10a14-1,5		9,4	9,1	9,9	10,3	7,8	9,8	8,5	11,0	14,0	20,5	23,5
E10a14-2,0					8,1	14,9				16,1	12,8	10,3

Tabla 4.3: Contenido de humedad del suelo (%) en la frontera y el exterior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio b

Muestra	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Sep-06	Oct-06	Nov-06	Dic-06	Ene-07	Feb-07	Abr-07	May-07	Jun-07
F0b1-0,0	5,2	3,7	3,8	2,0	3,9	5,3	5,0	3,2	7,5	6,3	5,1	4,0
F0b1-0,5	6,3	4,2	5,4	2,2	5,8	5,6	4,8	4,4	4,2	4,9	4,6	4,1
F0b1-1,0	8,1	4,1	8,8	2,7	4,6	5,4	5,6	4,4	12,2	6,1	5,0	4,3
F0b1-1,5	6,8	3,9	3,0	7,6	7,5	14,8	11,9	9,3	8,1	11,3	7,4	8,9
F0b1-2,0	3,3	2,7	5,7	2,9	2,4	5,5	11,0	6,5	5,0	7,4	4,0	5,2
E5b2-0,0	4,3	2,9	4,2	2,5	2,4	3,6	5,6	5,0	5,7	3,8	3,0	1,4
E5b2-0,5	6,8	3,9	5,0	3,3	6,4	5,8	5,9	4,5	3,6	5,8	4,3	4,8
E5b2-1,0	9,9	5,0	3,4	3,4	6,6	6,1	5,9	4,5	7,9	5,6	4,7	3,5
E5b2-1,5	7,0	6,7	3,3	4,8	3,5	11,2	14,3	5,1	9,1	13,2	7,3	8,9
E5b2-2,0	2,8	2,7	2,7	5,0	1,7	5,8	8,9	7,6	6,3	7,5	12,8	4,9
E10b3-0,0	4,6	3,3	3,8	2,1	6,3	3,9	3,8	6,4	7,2	2,9	3,1	1,8
E10b3-0,5	6,4	4,1	6,9	4,8	5,8	5,5	5,6	5,0	4,3	5,4	5,5	4,4
E10b3-1,0	10,5	3,9	6,2	9,3	5,9	5,6	5,9	11,0	5,3	7,6	14,7	4,4
E10b3-1,5	7,6	4,4	8,4	8,9	8,2	7,8	5,7	8,1	8,1	9,7	9,9	5,0
E10b3-2,0	5,2	3,7	5,4	4,2	5,1	5,4	7,0	2,7	4,3	6,7	5,5	6,0
E20b4-0,0	4,7	4,1	4,4	1,7	1,7	3,9	4,7	5,3	5,7	2,9	2,1	2,0
E20b4-0,5	5,4	3,1	5,6	5,0	5,3	5,2	5,3	2,9	8,8	4,5	4,1	4,3
E20b4-1,0	9,6	3,9	6,9	8,7	4,4	8,8	8,2	2,1	7,8	4,4	4,3	5,3
E20b4-1,5	6,0	3,7	5,3	4,5	8,8	5,6	7,9	4,0	6,1	4,5	5,3	5,2
E20b4-2,0	4,8	4,0	3,4	5,1	4,8	5,4	9,0	3,8	3,5	3,9	3,1	4,1
E30b5-0,0	6,7	4,0	3,1	3,0	4,1	4,5	6,5	4,2	3,7	4,2	3,0	2,4
E30b5-0,5	5,5	4,2	5,7	4,5	4,6	5,4	5,2	4,6	5,0	4,7	4,1	4,0
E30b5-1,0	9,0	3,7	4,9	4,2	4,8	5,1	4,4	3,1	9,9	3,1	4,3	4,1
E30b5-1,5	8,0	3,9	4,7	4,0	6,9	7,8	4,8	4,7	10,1	3,6	4,0	3,8
E30b5-2,0	3,9	3,5	3,1	4,0	4,1	4,1	4,4	2,1	6,2	3,3	3,7	2,7
F0b6-0,0	4,8	3,2	3,7	2,5	4,8	4,1	5,8	4,1	6,6	10,9	2,5	2,5
F0b6-0,5	5,8	2,4	5,4	4,1	4,9	5,6	6,1	2,9	7,0	4,6	3,3	3,2
F0b6-1,0	6,3	2,6	2,6	2,5	3,6	2,8	5,0	2,2	6,8	4,9	3,4	3,6
F0b6-1,5	8,7	10,5	10,3	7,9	11,4	12,9	15,8	6,5	10,1	14,3	3,2	9,8
F0b6-2,0	2,2	2,3	3,5	2,6	2,7	2,5	3,8	5,2	3,5	8,1	3,3	7,3
E5b7-0,0	6,5	3,0	3,9	1,7	3,4	4,6	6,1	4,4	7,3	4,0	3,4	3,1
E5b7-0,5	4,9	3,7	5,2	4,3	4,5	5,7	5,6	3,3	5,9	5,5	4,8	4,3
E5b7-1,0	17,0	4,2	3,5	2,7	2,7	5,8	5,7	3,3	6,9	4,8	4,5	4,8
E5b7-1,5	8,1	9,3	10,9	6,1	4,8	11,8	6,0	4,0	7,6	7,3	9,9	4,7
E5b7-2,0	3,0	2,6	7,3	2,6	4,2	6,0	6,0	7,2	5,9	5,0	7,1	4,1
E10b8-0,0	8,0	2,4	6,2	4,7	4,1	5,9	5,5	4,5	6,3	5,9	2,7	2,2
E10b8-0,5	5,4	2,9	5,7	4,3	5,4	5,7	5,5	2,5	6,1	4,7	4,8	3,9
E10b8-1,0	5,9	4,0	3,2	3,8	5,7	5,0	5,8	3,6	6,7	4,4	5,0	4,3
E10b8-1,5	11,7	4,0	11,6	3,2	5,3	11,6	9,1	3,3	11,5	9,4	5,0	4,1
E10b8-2,0	6,7	5,2	6,6	3,2	4,7	5,8	6,1	6,2	4,2	5,0	5,4	7,2
E20b9-0,0	8,0	4,1	5,0	2,8	3,8	4,4	5,2	5,2	6,3	4,9	3,7	2,2
E20b9-0,5	5,5	4,3	5,5	4,6	5,1	5,3	5,6	4,2	5,7	4,4	4,5	4,2
E20b9-1,0	5,7	3,7	4,8	4,3	5,1	5,3	5,1	3,3	6,2	4,5	4,5	4,4
E20b9-1,5	5,6	3,9	3,0	4,4	5,1	5,0	5,6	3,0	6,5	4,2	4,5	4,5
E20b9-2,0	4,8	5,6	3,0	4,3	4,6	4,4	4,8	2,8	5,7	3,9	3,5	3,9
E30b10-0,0	6,2	4,9	5,2	2,0	4,0	4,2	6,3	4,8	7,0	4,9	4,1	3,2
E30b10-0,5	4,7	4,5	5,1	4,6	4,8	5,4	5,3	2,5	5,8	4,2	4,8	3,9
E30b10-1,0	5,5	3,8	5,2	4,6	4,9	5,0	4,8	2,9	5,8	4,5	4,3	4,7
E30b10-1,5	5,5	3,6	4,6	4,0	4,3	4,9	5,4	2,7	5,9	4,2	3,9	4,4
E30b10-2,0	5,4	4,0	3,3	4,2	4,1	4,2	4,9	2,9	3,2	3,1	3,7	3,7

La Tabla 4.4 exhibe la totalidad de los resultados obtenidos a partir de las muestras extraídas de la forestación de *Pinus taeda*, ubicada en el sitio a, en la cual se efectuó un total de 6 pozos tanto sobre la frontera como en el interior de la misma. La inexistencia del manto de arenisca debajo de esta plantación (ver la Figura 3.3 del capítulo anterior) permitió acceder a la máxima profundidad prevista en todas las perforaciones, como puede observarse en la mencionada tabla.

Tabla 4.4: Contenido de humedad del suelo (%) en la frontera y el interior de la forestación de *Pinus taeda* ubicada en el sitio a

Muestra	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Sep-06	Oct-06	Nov-06	Dic-06	Ene-07	Feb-07	Abr-07	May-07	Jun-07
F0a1-0,0	5,9	4,5	6,2	1,8	3,4	4,4	6,1	3,5	6,0	3,8	2,1	1,3
F0a1-0,5	16,2	6,4	7,9	5,5	5,4	8,3	7,7	5,1	8,5	12,7	6,3	5,8
F0a1-1,0	17,6	14,4	14,3	15,5	13,7	13,7	20,4	14,7	12,2	14,8	12,3	17,2
F0a1-1,5	7,8	9,5	6,9	7,6	7,7	8,5	12,3	10,0	8,0	6,6	11,0	23,8
F0a1-2,0	5,7	5,6	5,3	6,0	4,8	5,6	11,6	6,3	4,8	6,9	9,1	8,7
I5a2-0,0	6,3	3,4	7,0	2,6	6,1	4,2	7,2	7,2	7,1	6,6	2,8	3,1
I5a2-0,5	11,4	6,8	5,7	3,3	3,0	6,8	8,7	4,1	10,0	7,0	7,1	5,6
I5a2-1,0	13,6	15,4	13,1	8,6	13,5	10,9	18,1	12,8	12,7	14,4	17,6	9,6
I5a2-1,5	7,1	7,6	10,8	9,5	6,5	7,7	12,5	8,0	7,4	13,6	10,8	10,4
I5a2-2,0	6,5	5,2	9,2	4,4	4,6	5,1	12,4	4,2	5,4	11,8	10,1	9,8
I10a3-0,0	7,3	4,0	5,1	1,6	3,6	5,0	7,1	5,5	8,7	6,5	4,2	2,7
I10a3-0,5	9,9	7,6	7,7	2,7	4,6	6,5	9,1	3,5	10,2	7,5	7,5	7,8
I10a3-1,0	10,6	17,1	13,4	16,2	10,5	12,6	11,7	11,9	11,3	18,2	7,7	13,8
I10a3-1,5	5,6	12,5	6,6	7,8	6,4	6,4	12,0	9,0	10,0	12,0	8,2	10,5
I10a3-2,0	4,4	4,9	5,4	6,0	4,4	5,3	4,7	6,2	8,7	10,9	4,4	8,6
F0a4-0,0	5,2	4,0	4,9	4,8	4,5	6,3	6,6	4,8	8,1	7,1	5,3	3,9
F0a4-0,5	7,9	5,5	6,3	4,8	2,7	10,0	8,2	5,8	9,2	6,9	6,7	5,6
F0a4-1,0	19,8	19,4	13,9	6,0	7,6	11,5	14,0	18,1	13,1	18,2	12,9	14,5
F0a4-1,5	7,9	10,8	7,5	8,3	7,8	9,9	11,4	10,4	8,7	13,2	11,8	10,9
F0a4-2,0	5,0	4,7	5,6	5,0	5,5	6,2	10,4	6,5	8,0	12,2	9,9	10,8
I5a5-0,0	6,5	2,9	4,5	2,2	5,9	11,1	8,9	6,8	10,1	4,6	5,0	4,6
I5a5-0,5	9,6	6,0	6,9	4,3	4,5	8,4	10,3	4,5	10,0	3,7	7,2	5,2
I5a5-1,0	14,9	14,4	16,0	12,1	11,4	8,5	16,4	11,1	12,8	5,6	11,6	14,1
I5a5-1,5	6,8	8,9	8,7	6,2	6,6	8,4	9,2	9,3	7,8	11,8	10,3	8,5
I5a5-2,0	5,1	5,8	5,3	3,7	5,7	6,6	5,3	6,6	5,2	13,2	9,6	7,8
I10a6-0,0	6,7	3,9	5,3	2,0	6,2	7,2	8,2	7,2	9,8	6,6	7,8	5,9
I10a6-0,5	10,2	14,8	3,6	4,3	7,0	9,1	10,8	4,0	8,1	6,8	7,9	5,5
I10a6-1,0	11,1	13,1	14,9	12,1	12,0	17,7	13,2	11,9	12,2	18,0	14,0	12,7
I10a6-1,5	6,8	5,3	6,6	6,3	6,4	7,9	10,1	7,8	8,5	12,5	10,4	7,0
I10a6-2,0	5,3	4,0	4,6	5,9	4,8	5,7	4,2	4,5	5,6	11,6	9,1	7,9

Por su importancia para el análisis de los resultados, en la Tabla 4.5 se presentan las precipitaciones registradas para el período comprendido entre Enero de 2006 y Junio de 2007, de manera de contar también con los valores correspondientes

a los 5 meses previos al comienzo de las extracciones. En la misma tabla se indican sombreados en color gris los días en los cuales se realizó la toma de muestras, con el fin de poder visualizar en forma directa si esta tarea se efectuó luego de un período de sequía o de lluvias intensas y consecuentemente poder cuantificar la cantidad de agua precipitada. Esta información complementaria es considerada fundamental para la discusión de los resultados y debe tenerse en cuenta en forma conjunta con los datos referidos al perfil del suelo, cuyas características se indicaron en el Capítulo 3. Se debe señalar que las precipitaciones normales para la región alcanzan un valor de 1200 mm por año y que en los últimos 12 meses de extracción de muestras de este trabajo se registraron 1552 mm.

Tabla 4.5: Precipitaciones registradas (mm) y días de muestreo

Mes / Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Total		
Ene/06										30		19	20							5					3								77	
Feb/06			17	15																			10	2			5						49	
Mar/06			10									3		5	17										2,5								37,5	
Abr/06												7,5									4			35									46,5	
May/06																	30											2					32	
Jun/06		50	46						37	13													60										206	
Jul/06													10																				10	
Ago/06								28			25															5				3			61	
Sep/06		24																				5					8						37	
Oct/06					55																						10	100		3			206	
Nov/06				21									38																				99	
Dic/06		23										2,5	35			74	4		28	41	70	7			60					20			286,5	
Ene/07		5								33							7		28	33			48										126	
Feb/07			4	28									2	25									18	34		80	45						236	
Mar/07	33		28		20	28	12	17					4				12									11	28	83	18				294	
Abr/07		34			50	13																		16	4								117	
May/07					18	25																												43
Jun/07															23						3					10							36	

4.1 Resultados relacionados al primer objetivo

A continuación se discuten los resultados, teniendo en consideración el contenido de humedad del suelo y sus variaciones en las forestaciones de *Eucalyptus grandis*, ubicadas en los sitios a y b. En este apartado y en los siguientes referidos tanto al primer como al segundo objetivo, además de presentar los valores de tendencia central y de dispersión en forma global para cada plantación, se pone énfasis en un análisis detallado orientado a la consideración de 3 variables independientes que adquieren gran relevancia por las consecuencias prácticas que encierran. Ellas son: i) la distancia a la frontera de la forestación, ii) la profundidad, y iii) la época del año. Los valores encontrados son comparados con los publicados

para otras especies y regiones y, a su vez, son analizados bajo la perspectiva de la cantidad de agua requerida para el normal desarrollo de las plantas.

4.1.1 Resultados para el sitio a

Globalmente, las determinaciones presentadas en la Tabla 4.1, que suman 340, exhiben un valor mínimo de 2,5 %, uno medio de 9,4 % y uno máximo de 29,0 %. La desviación estándar alcanza en este caso un 3,9 % y el coeficiente de variación 41 %. Por su parte, para los 96 resultados mostrados en la Tabla 4.2, los correspondientes niveles para el mínimo, medio y máximo son 2,2 %, 12,6 %, 42,0 % respectivamente, en tanto que la desviación estándar es igual a 5,6 % y el coeficiente de variación alcanza 44 %. Es decir que, en forma global, el valor medio y el máximo correspondientes a la frontera e interior de la forestación fueron menores que los encontrados en el exterior, y aquellos estuvieron acompañados de una dispersión menor. La prueba t indicó que, desde el punto de vista estadístico, la diferencia entre las medias de las tablas 4.1 y 4.2 es altamente significativa, con una probabilidad asociada (p) menor a 0,0005. El test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales debe ser rechazada, ya que el estadístico (F) alcanzó 7,094 con $p = 0,008$, y por consiguiente se asumieron varianzas distintas para la comparación de las dos muestras.

i) Análisis en función de la distancia a la frontera de la forestación

En la Tabla 4.6 se pueden apreciar los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas distancias de la frontera de la plantación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a. El análisis estadístico se efectuó tomando como base la información presentada en las tablas 4.1 y 4.2. Los valores correspondientes a la frontera y a las dos posiciones interiores provienen en cada caso de los datos obtenidos de las extracciones efectuadas de los dos pozos ubicados en cada posición (ver Tabla 4.1). Por su parte, los valores correspondientes al exterior, surgen de los datos colectados de las extracciones efectuadas del único pozo ubicado en cada distancia a partir de la frontera (ver Tabla 4.2). En la Tabla 4.6

se indican entre paréntesis los resultados obtenidos para la frontera y el interior considerando únicamente los 11 sondeos coincidentes en el tiempo con los realizados en el exterior, y descartando el efectuado en Junio de 2006. Como puede observarse, la diferencia encontrada entre los resultados correspondientes a los 12 y 11 sondeos puede considerarse irrelevante y por consiguiente será ignorada en lo sucesivo.

Tabla 4.6: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	2,9 (2,9)	2,5 (2,5)	3,1 (3,1)	2,2	4,2
Med (%)	8,9 (8,8)	9,5 (9,3)	9,8 (9,7)	12,0	13,2
Máx (%)	17,3 (17,3)	21,6 (19)	29,0 (29,0)	42,0	23,6
DE (%)	3,6 (3,6)	3,7 (3,6)	4,2 (4,3)	6,4	4,7
COV (%)	40 (41)	39 (39)	43 (44)	53	36
n	111 (101)	113 (103)	116 (106)	47	49

Es importante señalar que en este caso el valor medio crece desde el interior hacia el exterior de la plantación, mientras que los valores mínimos y máximos, así como la desviación estándar y el coeficiente de variación, no exhiben una tendencia clara. Los valores de este último estadístico son similares en la frontera y el interior, encontrándose los valores extremos en el exterior, con el máximo a los 5 m y el mínimo a los 10 m. Es de destacar que los sitios, como ya se señaló en el Capítulo 3, fueron seleccionados de manera de minimizar variables no controladas, o sea que puede asumirse la existencia de una relación entre la variable independiente escogida para el análisis y el contenido de humedad del suelo.

Como los valores medios son los más representativos, ya que surgen del conjunto de determinaciones efectuadas en todas las profundidades y pozos ubicados a la distancia correspondiente, se ha resuelto graficarlos con el fin de ver más nítidamente su evolución. La Figura 4.1 permite apreciar claramente el incremento de los valores medios desde el interior hacia el exterior de la forestación. Es de señalar que las variaciones experimentadas dentro de la plantación son pequeñas y que el mayor gradiente se produce entre la frontera (9,8 %) y el pozo ubicado a 5 m de la misma hacia el exterior (12,0 %), para luego volver a atenuarse la tasa de

incremento hasta los 10 m de distancia. Considerando, como ya se expresó anteriormente, que el sitio fue seleccionado de manera de minimizar la influencia de variables no controladas y con intervención en la dinámica del agua en el terreno, tales como la pendiente topográfica, las ondulaciones, el clima y los factores meteorológicos, entre otros, las diferencias encontradas para el contenido de humedad medio pueden explicarse por el mayor consumo de la plantación en comparación con la cobertura de gramíneas que se observa en la superficie exterior a la forestación.

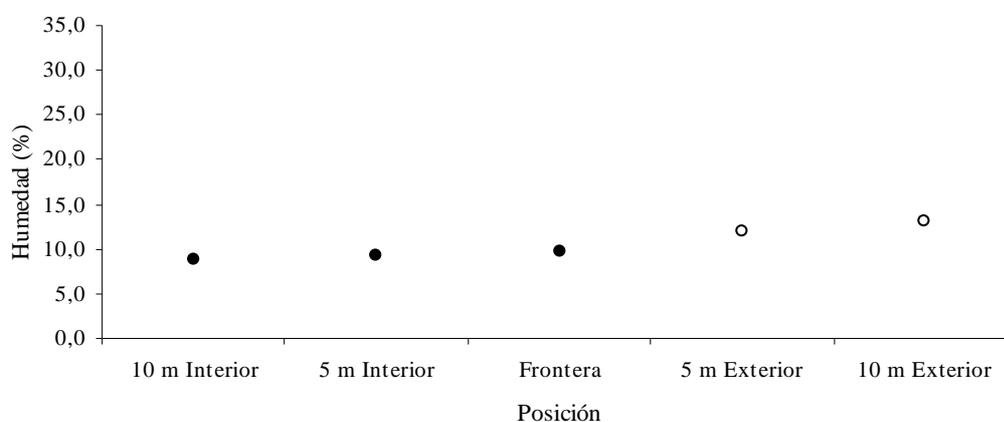


Figura 4.1: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

●: contenido de humedad en la frontera e interior; ○: contenido de humedad en el exterior

Los resultados encontrados en este caso son congruentes con el reporte de Radersma y Ong (2004), quien sostiene que la relación de raíces en superficie para el *Eucalyptus* es 7,5 veces mayor en la región adyacente al árbol que la encontrada a 4,7 m de distancia. Tenores de humedad del suelo comprendidos entre 4 % y 9 % son normales para el punto de marchitez en terrenos franco arenosos o franco arenosos limosos (Dorrnsoro 2007) como el asimilable al de este sitio y, en este caso, tanto los valores medios como los máximos obtenidos para todas las distancias respecto de la frontera se mantuvieron prácticamente en un nivel superior a éstos. A su vez, los mínimos exhiben registros en todos los casos superiores al 50 % del límite inferior del punto de marchitez. Como se verá más adelante, estos valores mínimos

corresponden a casos puntuales en determinadas profundidades y períodos muy cortos del año. En consecuencia puede considerarse que el contenido de humedad del suelo encontrado en esta forestación de *Eucalyptus grandis*, para distintas distancias a la frontera de la plantación, presenta niveles suficientes para el desarrollo de cultivos.

ii) Análisis en función de la profundidad

En la Tabla 4.7 se exhiben los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas profundidades. La parte superior de la tabla muestra los correspondientes a las extracciones realizadas de los 6 pozos ubicados tanto en la frontera como en el interior de la forestación (ver Tabla 4.1). Por su parte, los valores del exterior de la forestación se indican en la parte inferior y provienen de los datos obtenidos de los 2 pozos realizados (ver Tabla 4.2). Como en el caso anterior, para la frontera e interior se indican entre paréntesis los resultados obtenidos considerando solamente los 11 sondeos coincidentes en el tiempo con los realizados en el exterior y descartando el efectuado en Junio de 2006. Puede observarse que también en este caso la diferencia encontrada entre los resultados correspondientes a los 12 y 11 sondeos puede considerarse irrelevante y por consiguiente en lo sucesivo no será tenida en cuenta.

Tabla 4.7: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas profundidades en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

		Profundidad				
		0 m	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m
Frontera e Interior	Mín (%)	2,5 (2,5)	3.00 (3.0)	2,9 (2,9)	4,5 (4,5)	4,1 (4,1)
	Med (%)	6,9 (6,8)	8.5 (8.2)	12,8 (12,7)	10,1 (10,6)	8,4 (8,5)
	Máx (%)	11,9 (11,9)	29.0 (29.0)	21,6 (19)	15,6 (17,2)	15,5 (15,5)
	DE (%)	2,2 (2,3)	4.9 (4.7)	3,9 (3,6)	2,3 (2,7)	2,4 (2,6)
	COV (%)	32 (33)	57% (58%)	31 (28)	23 (25)	28 (31)
	n	72 (66)	72 (66)	72 (66)	71 (66)	53 (47)
Exterior	Mín (%)	2,2	4,7	11,8	5,9	8,1
	Med (%)	7,9	16,9	13,9	11,7	12,5
	Máx (%)	13,8	42,0	17,1	24,9	16,1
	DE (%)	3,1	7,5	1,7	4,9	3,1
	COV (%)	39	44	12	42	25
	n	22	22	22	22	8

Los resultados correspondientes a las muestras extraídas de la frontera y el interior de la forestación indican un claro incremento del contenido de humedad promedio desde la superficie hasta 1 m de profundidad y una posterior disminución hasta los 2 m. Es de destacar que la desviación estándar y el coeficiente de variación no presentan una evolución clara en función de la profundidad y que los valores de este último son similares para distintas profundidades, con la excepción del encontrado a 0,5 m, el cual exhibe un nivel considerablemente mayor que el resto. La variación con la profundidad de los valores medios del contenido de humedad en el exterior de la forestación muestra, a diferencia del caso anterior, un incremento desde la superficie hasta alcanzar el valor máximo a la profundidad de 0,5 m, para luego decrecer hasta 1,5 m y mantenerse prácticamente constante en los 2 m. El coeficiente de variación presenta los mayores valores a 0,5 m, 1,5 m y en superficie, con valores similares entre sí, encontrándose el extremo menor a 1 m y un valor intermedio a 2 m de profundidad.

La Figura 4.2 permite observar claramente los valores medios a distintas profundidades, tanto en la frontera e interior como en el exterior de la forestación. El exterior exhibe siempre valores mayores que la frontera y el interior, pero las diferencias existentes son muy pequeñas tanto en superficie como a 1 m y a 1,5 m, mientras que la mayor divergencia se aprecia a la profundidad de 0,5 m y una diferencia intermedia se encuentra a 2 m. Para interpretar los resultados encontrados es importante tener en cuenta la presencia del manto de arcilla arenosa con motas de óxido de hierro que se encuentra entre las profundidades de 0,87 m y 1,38 m en el interior y entre 0,60 m y 1,20 m en el exterior de la plantación (ver Figura 3.3). Por debajo de él, el contenido de humedad medio muestra menores variaciones, lo cual se explica por la relativamente alta compacidad e impermeabilidad del estrato. Por encima de él, el incremento del valor medio desde la superficie hasta 1 m de profundidad en la frontera e interior de la forestación es coherente, tanto con la retención de agua que puede ejercer el mencionado estrato, como con una mayor presencia de raíces en las zonas superiores.

Zhou et al. (2002) informa un mayor contenido de humedad en el suelo

ubicado a profundidades comprendidas entre 0,6 m y 0,8 m para plantaciones de *Eucalyptus* investigadas en China, mientras que Lima (1996) publica que en un bosque de *Eucalyptus regnons* de 29 años de edad el 98 % del peso seco de las raíces se concentra entre la superficie y 0,6 m de profundidad. Los resultados encontrados en este trabajo, que muestran la mayor diferencia entre los valores medios correspondientes al interior (incluyendo la frontera) y al exterior a 0,5 m, podrían ser debido a una posible disminución de las raíces hacia el exterior (Radersma y Ong 2004). Esta es una profundidad donde las mismas tienen todavía una alta concentración (Lima 1996), en este caso por encima del estrato de arcilla arenosa con motas de óxido de hierro. O a que el estrato impermeable se acerca en el exterior a esta profundidad de muestreo.

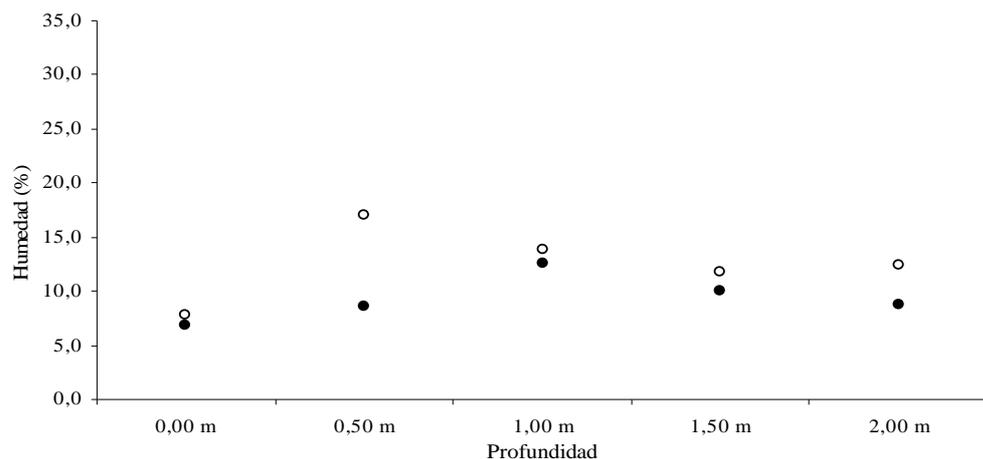


Figura 4.2: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

●: contenido de humedad en la frontera e interior; ○: contenido de humedad en el exterior

Con el propósito de lograr un mayor nivel de detalle, los valores presentados anteriormente para distintas distancias a la frontera y profundidades, son analizados a continuación con un grado más alto de discriminación. La Tabla 4.8 muestra los principales resultados para las 5 distancias a la frontera de la forestación pero separadamente para cada nivel de profundidad estudiado. Por su parte, en la Figura 4.3 se pueden apreciar los correspondientes valores medios. La mayor cantidad de determinaciones (n) que se observa para cada caso de la zona interior (incluyendo la

frontera), en comparación con la exterior, se debe a que en la primera se efectuaron 12 sondeos sobre 6 pozos, en tanto que en la segunda se realizaron 11 sondeos sobre 2 pozos, como ya fue expresado anteriormente.

Tabla 4.8: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas profundidades y distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

Profundidad: 0 m (Superficie)

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	4,1	2,5	3,1	2,2	4,2
Med (%)	7,3	7,0	6,4	6,6	9,1
Máx (%)	11,9	11,2	9,3	11,6	13,8
DE (%)	2,0	2,5	2,1	2,8	2,9
COV (%)	27	36	32	43	32
n	24	24	24	11	11

0,5 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	3,1	3,0	3,5	4,7	8,4
Med (%)	7,9	8,7	9,1	16,4	17,5
Máx (%)	17,3	21,6	29,0	42,0	23,6
DE (%)	3,2	4,7	6,4	9,8	4,7
COV (%)	41	49	70	60	27
n	24	24	24	11	11

1 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	2,9	5,3	9,6	11,8	12,4
Med (%)	11,3	13,3	13,8	13,4	14,3
Máx (%)	17,3	19,0	18,6	15,9	17,1
DE (%)	4,6	2,9	2,3	1,5	1,8
COV (%)	40	22	17	11	13
n	24	24	24	11	11

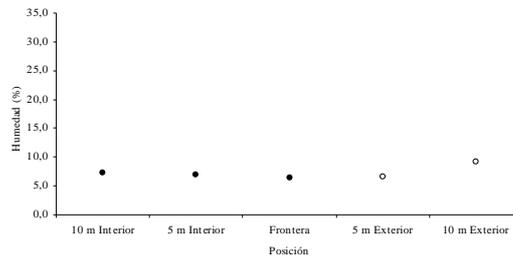
1,5 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	4,5	5,3	5,7	5,9	7,8
Med (%)	9,9	9,8	10,5	11,3	12,2
Máx (%)	15,4	15,4	14,0	24,9	23,5
DE (%)	3,0	2,9	1,8	4,8	5,1
COV (%)	30	26	17	42	42
n	23	24	24	11	11

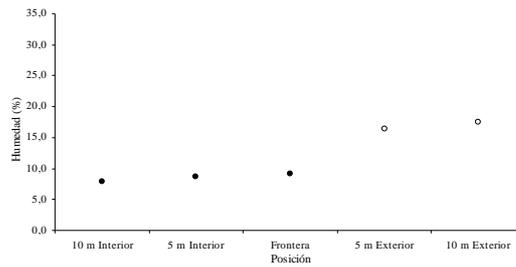
2 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior
Mín (%)	4,1	4,5	5,4	8,6	8,1
Med (%)	8,1	8,2	8,9	12,5	12,4
Máx (%)	15,5	12,4	13,0	14,9	16,1
DE (%)	3,2	2,2	2,1	3,4	3,3
COV (%)	40	27	24	27	26
n	16	17	20	3	5

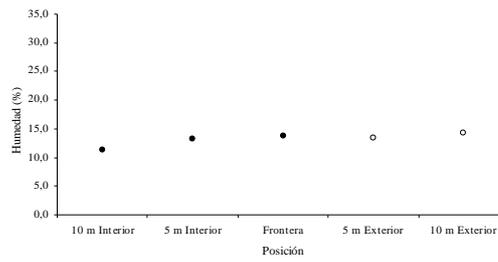
Profundidad: 0 m (Superficie)



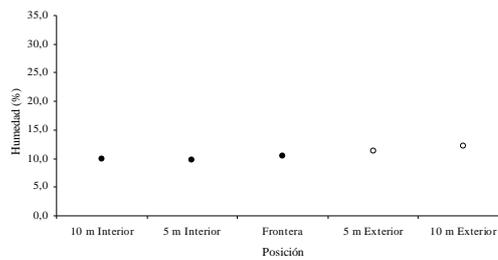
0,5 m



1 m



1,5 m



2 m

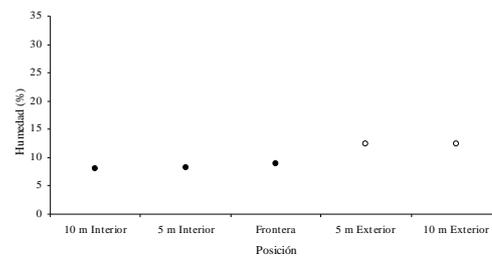


Figura 4.3: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades y distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

●: contenido de humedad en la frontera e interior; ○: contenido de humedad en el exterior

La observación de los valores de la tabla y de la figura muestra ahora más claramente que la altamente significativa ($p < 0,0005$) diferencia, desde el punto de vista estadístico, entre el valor medio del interior (incluyendo la frontera) y del exterior se produce a la profundidad de 0,5 m. También se puede apreciar que a 2 m aparece nuevamente una diferencia relativamente importante entre los mismos, aunque de menor relevancia que la mencionada anteriormente. No se encuentra una razón que justifique esta diferencia, que no se aprecia a las profundidades intermedias de 1 m y de 1,5 m ubicadas también por debajo del manto de arcilla arenosa con motas de óxido de hierro. Por su parte, no es posible apreciar una tendencia clara en la dispersión de valores para las distintas distancias a la frontera y profundidades consideradas.

iii) Análisis en función de la época del año

El estudio de los resultados en función de esta variable, se fundamenta en la conveniencia de conocer la relación existente entre el contenido de humedad del suelo y la cantidad de lluvia registrada en los días previos. Este análisis debe aportar también el rango en el cual oscila ese contenido de humedad durante el período de tiempo analizado, lo cual resulta de gran importancia práctica habida cuenta de que esos límites tienen relación directa con la calidad de los cultivos que se realizan (Santa Olalla y De Juan 1993).

En la Tabla 4.9 se exhiben los principales resultados del contenido de agua del suelo para distintas épocas del año. La parte superior muestra los resultados correspondientes a los 12 sondeos realizados entre Junio de 2006 y Junio de 2007 en los 6 pozos ubicados tanto en la frontera como en el interior de la forestación. La existencia de un número menor a 30 determinaciones (n) corresponde a los meses en los cuales no fue posible extraer muestras de todas las profundidades previstas (ver Tabla 4.1). Los valores correspondientes al exterior provienen de los datos obtenidos de los 11 sondeos efectuados entre Julio de 2006 y Junio de 2007 en los 2 pozos realizados (ver Tabla 4.2). En este caso la existencia de un número menor a 10 determinaciones (n) se registra en los meses donde no fue posible extraer muestras de todas las profundidades previstas.

Tabla 4.9: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

		Jun/06	Jul/06	Ago/06	Sep/06	Oct/06	Nov/06	Dic/06	Ene/07	Feb/07	Abr/07	May/07	Jun/07
Frontera e Interior	Mín (%)	5,9	3,4	3,6	2,5	2,9	3,7	7,6	3,1	3,0	6,4	4,8	3,1
	Med (%)	10,3	8,0	9,7	7,1	7,5	9,1	11,9	9,3	9,7	12,3	9,3	8,3
	Máx (%)	21,6	14,4	17,3	16,9	17,0	14,9	29,0	15,8	14,1	20,6	18,6	16,2
	DE (%)	3,7	3,6	3,8	3,9	3,8	2,7	4,3	3,5	2,6	3,9	3,6	3,4
	COV (%)	36	45	39	55	50	30	36	37	27	31	39	41
	n	30	28	26	28	28	30	30	26	29	28	28	29
Exterior	Mín (%)		5,2	8,4	2,2	5,1	5,2	9,4	7,7	10,5	8,8	5,6	3,1
	Med (%)		11,9	13,0	9,3	9,2	10,6	11,8	14,8	13,3	16,1	14,6	12,9
	Máx (%)		23,6	20,7	16,8	12,4	17,3	13,7	42,0	20,0	24,9	23,4	23,5
	DE (%)		5,6	4,5	5,1	2,2	4,5	1,8	10,8	3,0	4,3	6,0	5,9
	COV (%)		47	35	55	24	43	15	73	23	27	41	46
	n		8	8	8	9	9	8	9	8	10	10	9

Si bien se produjo una sequía extraordinaria para la región en el período previo a estas determinaciones, el que se vio interrumpido precisamente por las lluvias registradas en el primer mes de ejecución de sondeos (Junio de 2006), los valores correspondientes a este mes no evidencian estar afectados por la misma. Un análisis detallado de las fechas en las que se produjeron las lluvias y de la correspondiente a la primera extracción de muestras permite observar que ésta se realizó con posterioridad a las precipitaciones (ver Tabla 4.5), lo cual justifica que los valores del contenido de humedad del suelo en este caso se encuentran dentro de los mayores de todo el período analizado. La observación de la desviación estándar y del coeficiente de variación no permite apreciar una relación clara entre las distintas fechas de muestreo y la dispersión, tanto para el interior como para el exterior de la plantación.

Con el fin de apreciar con mayor claridad la relación entre el nivel de las precipitaciones y el valor medio del contenido de humedad del suelo, en la Figura 4.4 se exhiben ambas variables para cada mes, durante el período de ejecución de las perforaciones. Se observa que el valor medio obtenido en el exterior es mayor que el correspondiente al interior (incluyendo la frontera) en todos los meses excepto en Diciembre de 2006, en el cual prácticamente coinciden. Estos resultados son congruentes con los reportados por Zhou et al. (2002), que muestran un contenido de agua del suelo mayor en un sitio sin vegetación que en otros dos, uno de ellos cultivado con *Eucalyptus* y el otro con especies autóctonas, para un período de

medición de un año. También se aprecia que la variación de ambos valores medios presenta tendencias similares.

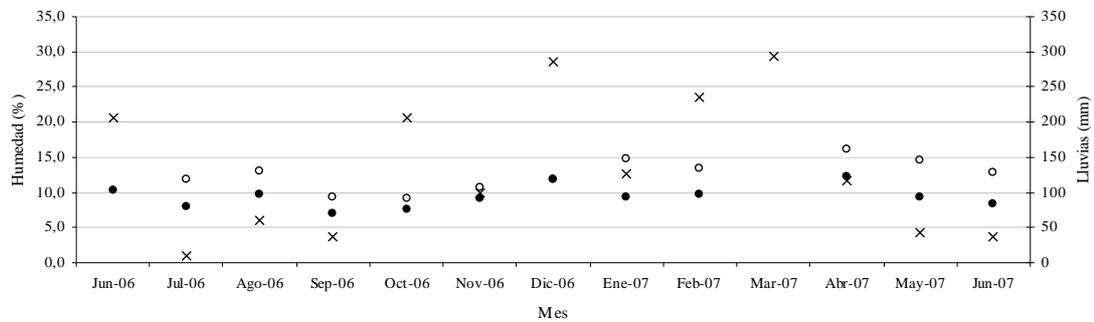


Figura 4.4: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo para distintas épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a
 ●: contenido de humedad en la frontera e interior; ○: contenido de humedad en el exterior; x: lluvias

A su vez, se aprecia una relación entre la cantidad de precipitaciones y el contenido de humedad del suelo en los períodos comprendidos entre Julio y Setiembre de 2006 y entre Abril y Junio de 2007. No obstante, un análisis pormenorizado de las fechas en que se produjeron las lluvias y se extrajeron las muestras de suelo, con el apoyo de la Tabla 4.5, aporta información adicional que confirma una mayor relación entre ambas variables analizadas que la surge de la simple observación de la Figura 4.4. En efecto, existen meses en los cuales los sondeos se efectuaron en una fecha anterior a lluvias importantes, como es el caso de Octubre de 2006. Por su parte, en Noviembre de 2006 se produce una situación opuesta, pues la extracción de muestras se llevó a cabo en una fecha inmediatamente posterior a las precipitaciones, si bien estas fueron de menor entidad que en el mes anterior.

Si se comparan los menores y los mayores valores del contenido de humedad medio del suelo, se encuentra que la máxima diferencia para el interior de la forestación (incluyendo la frontera) se presenta entre los meses de Septiembre de 2006 (7,1 %) y Abril de 2007 (12,3 %), o sea que éste es 75 % mayor que el anterior. Efectuando el mismo análisis para el exterior, se encuentra que en Octubre de 2006 se registró el menor valor medio (9,2 %) y en Abril de 2007 el mayor (16,1 %), alcanzando el último también un incremento de 75 % respecto del primero. Puede

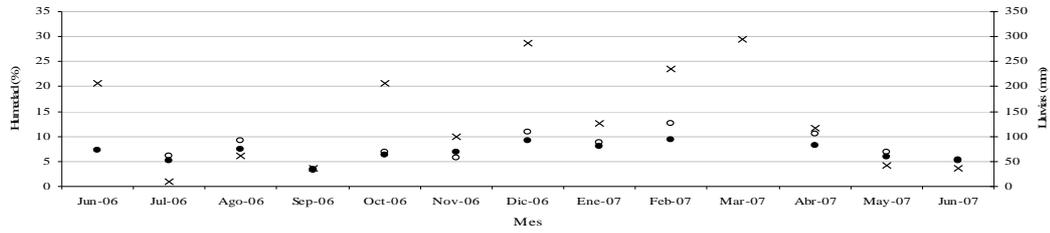
observarse que los menores promedios, tanto en el interior como en el exterior de la plantación, se produjeron luego de un período de importante sequía y que los mayores lo hicieron con posterioridad a un período de intensas lluvias, lo cual corrobora lo expresado en el párrafo anterior.

Con el fin de lograr un mayor nivel de detalle, los valores presentados en la Tabla 4.9 y en la Figura 4.4 son mostrados a continuación separadamente para cada época del año y para cada nivel de profundidad en la Tabla 4.10 y en la Figura 4.5. Se excluyen los correspondientes a 2 m pues, para un análisis tan altamente discriminado, a esa profundidad se cuenta con una baja cantidad de determinaciones debido a la imposibilidad de obtener todas las muestras planificadas por la presencia de un manto impenetrable, como ya se señaló anteriormente. Es posible apreciar que los valores medios obtenidos en superficie presentan una relación más estrecha que el resto con la cantidad de precipitaciones registradas. Por su lado, no se observa la presencia de una relación entre la varianza de los datos y la profundidad analizada en distintas épocas del año, tanto para el interior como para el exterior de la forestación.

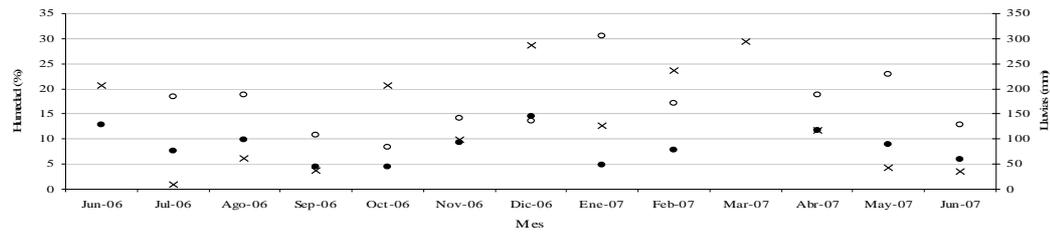
Anteriormente se expresó que tenores de humedad de entre 4 % y 9 % son normales para el punto de marchitez en terrenos franco arenosos o franco arenosos limosos (Dorronsoro 2007; Martínez Fernández et al. 2001), Suelo comparable al que predomina en este sitio. Con el elevado nivel de discriminación logrado en la Tabla 4.10, y en forma complementaria con la información obtenida de las anteriores tablas de este capítulo, es posible evaluar con mayor precisión si la humedad que presenta el terreno en este caso es la adecuada para que las plantas puedan desarrollarse con normalidad.

Con este propósito se considera conveniente efectuar el análisis en primer lugar utilizando los valores medios, pues, para cada profundidad y época del año, son los más representativos del contenido de humedad del suelo tanto para la totalidad de las perforaciones del interior como del exterior de la plantación. Es importante señalar que con la excepción del promedio correspondiente al nivel superficial en el mes de Setiembre de 2006, el cual para el interior de la forestación alcanzó 3,4 % y para el exterior 3,2 %, los valores medios son superiores al 4 % reportado como nivel inferior del punto de marchitez para este tipo de terrenos.

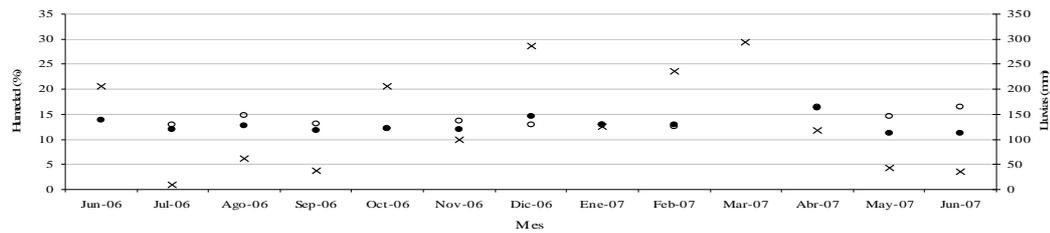
Profundidad: 0 m (Superficie)



0,5 m



1 m



1,5 m

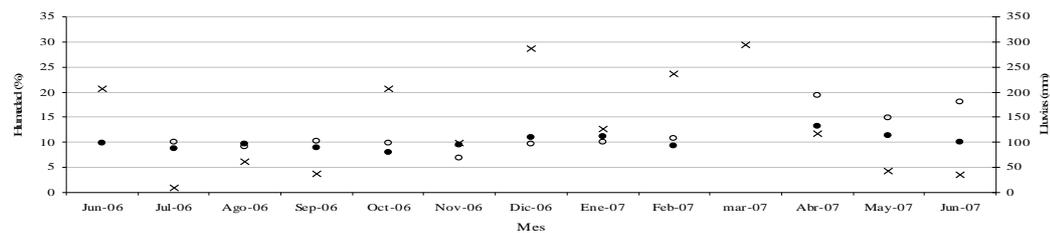


Figura 4.5: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo a distintas profundidades y para diferentes épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio a

●: contenido de humedad en la frontera e interior; ○: contenido de humedad en el exterior; x: lluvias

Como fue señalado anteriormente, estos valores medios se incrementan de manera importante con la profundidad alcanzando sus mayores niveles a 0,5 m en el

exterior y a 1 m en el interior. Debe observarse que los valores máximos siempre superan con holgura el 4 %, en la mayoría de las veces también el 9 %, y que los valores mínimos en algunos casos son menores al 4 %, pero en situaciones temporarias aisladas y relativamente breves. Por consiguiente, considerando que las extracciones difirieron 5 m horizontalmente y 0,5 m verticalmente, una normal extensión de las raíces podría solucionar aquellos pocos casos puntuales tanto en el espacio como en el tiempo en que aparece un contenido de humedad relativamente escaso para las plantas. En consecuencia puede afirmarse que el contenido de humedad del suelo encontrado en esta forestación de *Eucalyptus grandis*, en el período de tiempo considerado y para las distintas distancias a la frontera de la plantación y profundidades analizadas, no constituye un obstáculo para el normal desarrollo de cultivos.

Como se expresó anteriormente, en Setiembre de 2006 se extrajeron las muestras con menor contenido de humedad en el interior de la forestación, ya que esa fecha fue precedida de un prolongado período de sequía. Si se calcula el promedio de agua existente en la parte superior del terreno (1 m) considerando las 4 perforaciones efectuadas a 5 m y 10 m hacia el interior desde la frontera, y el mismo se expresa como Lámina (Ver Apartado 2.2 del Capítulo 2), la cantidad de agua presente en ese mes alcanzó 104 mm, de la cual 41 mm estarían disponible para las plantas. Teniendo en cuenta que el consumo de una forestación típica de *Eucalyptus grandis* puede estimarse entre 475 y 910 mm por año (Oyarzun y Hubert 1999), la cantidad de agua encontrada sería suficiente para un período comprendido entre 16 y 32 días a partir de las determinaciones efectuadas si no se registrasen nuevas lluvias y sin que las plantas exploren profundidades mayores a 1 m. Los resultados de este análisis son congruentes con lo expresado en párrafos anteriores.

4.1.2 Resultados para el sitio b

Como se expresó en el Capítulo 3, la plantación de este sitio fue seleccionada por reunir condiciones ideales para estudiar el contenido de humedad del suelo hasta una distancia importante de la misma (30 m) sin la aparición de accidentes

topográficos u otras variables no controladas. Los sondeos se planificaron sobre su frontera y hacia el exterior, y amplían la información obtenida del exterior de la forestación de la misma especie ya analizada en el Apartado 4.1.1 (sitio a). Adicionalmente, el hecho que esta plantación difiera sensiblemente en edad de la anterior constituye un factor que enriquece la información. Es de destacar también que este sitio presenta un perfil arenoso profundo sin alteraciones hasta los 2 m. Por consiguiente difiere en ese aspecto del que fue objeto del apartado anterior, el cual, si bien tiene una alta proporción de arena, exhibe distintos estratos ya descritos en el Capítulo 3.

Los resultados que se emplean en el presente apartado provienen de la Tabla 4.3. Globalmente, esas determinaciones, que suman 600, exhiben un valor mínimo de 1,4 %, uno medio de 5,2 % y uno máximo de 17,0 %. La desviación estándar alcanza en este caso 2,3 % y el coeficiente de variación 43 %. Estos valores globales del contenido de humedad del suelo, tanto el mínimo como el medio y el máximo, son sensiblemente inferiores a los encontrados en el sitio a para el exterior de la otra forestación de igual especie (ver la Tabla 4.2). La prueba t indicó que la diferencia entre las medias de las tablas 4.2 y 4.3 es altamente significativa desde el punto de vista estadístico, con una probabilidad asociada (p) menor a 0,0005. El test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales debe ser rechazada, ya que el estadístico (F) alcanzó 101,871 con $p < 0,0005$, y por consiguiente se asumieron varianzas distintas para la comparación de las dos muestras.

Considerando que las fechas de extracción de muestras y la cantidad de precipitaciones fueron iguales en todos los casos, y que la topografía del terreno no presenta particularidades con incidencia sobre los resultados, las variables que difieren son las características del perfil del suelo y la edad de las plantaciones.

i) Análisis en función de la distancia a la frontera de la forestación

En la Tabla 4.11 se pueden apreciar los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas distancias de la frontera de la plantación. Como en este caso la naturaleza del suelo permitió alcanzar en todos los casos la profundidad máxima, la cantidad de determinaciones (n) no varía para las distintas distancias. En consecuencia, como en cada posición se ubicaron dos pozos

de los cuales se extrajeron 5 muestras a distintas profundidades y en 12 oportunidades, la cantidad de valores para cada posición asciende a 120.

Contrariamente al caso anterior, y también en oposición a lo reportado por Zhou et al. (2002), en esta forestación el contenido de humedad promedio no crece entre la frontera (5,6 %) y la distancia de 5 m (5,5 %), sino que se mantiene prácticamente constante incluso hasta los 10 m (5,7 %). El valor correspondiente decrece luego a los 20 m (4,8 %), permaneciendo con una casi imperceptible variación a los 30 m (4,6%). Los valores máximos también son menores a las mayores distancias mientras que los mínimos se mantienen casi invariables para todos los casos. Las dos posiciones más alejadas también exhiben menor variabilidad de datos, lo que puede apreciarse por la comparación de los coeficientes de variación.

Tabla 4.11: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	2,0	1,4	1,8	1,7	2,0
Med (%)	5,6	5,5	5,7	4,8	4,6
Máx (%)	15,8	17,0	14,7	9,6	10,1
DE (%)	2,9	2,6	2,3	1,5	1,3
COV (%)	53	48	40	32	30
n	120	120	120	120	120

La Figura 4.6 permite visualizar claramente la evolución de los valores medios desde la frontera hasta los 30 m de distancia de la misma, los cuales muestran una tendencia distinta a la encontrada en el sitio a.

Por tratarse en este caso de un suelo arenoso profundo, el punto de marchitez puede estimarse en 2 %, como ya fuera expuesto en el Capítulo 2. Esto indica que las plantas pueden acceder al agua aún cuando el suelo posee tenores de humedad bajos. La observación de la Tabla 4.11 permite apreciar que solamente los valores mínimos se encuentran en nivel igual o inferior al punto de marchitez estimado y que tanto los medios como los máximos lo exceden siempre, y en el caso de los últimos con holgura. Consecuentemente, si bien aún no se han presentado los resultados con un nivel de discriminación que permita apreciar su variación en profundidad y en el

tiempo, puede afirmarse que tampoco en este sitio el contenido de humedad del suelo es insuficiente para un normal desarrollo de las plantas para todas las distancias a la forestación que se analizaron.

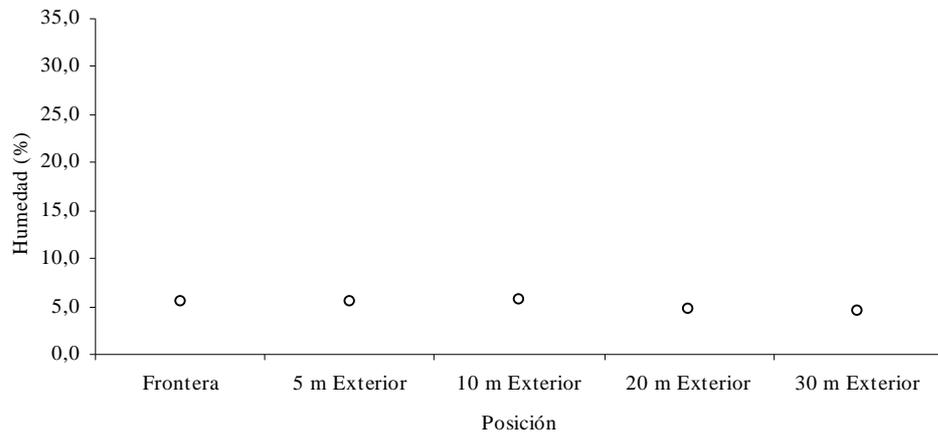


Figura 4.6: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

ii) Análisis en función de la profundidad

En la Tabla 4.12 se exhiben los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas profundidades. A diferencia del sitio a, en este caso el contenido de humedad medio se incrementa desde la superficie (4,3 %) hasta una profundidad de 1,5 m (6,9 %) para luego decrecer hasta los 2 m donde alcanza 4,7 %, nivel prácticamente igual al superficial. La Figura 4.7 permite apreciar gráficamente la evolución señalada.

Tabla 4.12: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas profundidades en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	0 m	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m
Mín (%)	1,4	2,2	2,1	2,7	1,7
Med (%)	4,3	4,8	5,4	6,9	4,7
Máx (%)	10,9	8,8	17,0	15,8	12,8
DE (%)	1,6	1,0	2,4	3,0	1,8
COV (%)	37	21	44	44	39
n	120	120	120	120	120

Resulta interesante efectuar una comparación con lo observado en el exterior del sitio a (ver Tabla 4.7 y Figura 4.2) donde el menor valor medio (7,9 %), obtenido en superficie, fue sensiblemente inferior al resto, y el máximo se encontró a una profundidad de 0,5 m (16,9 %). La presencia en el sitio a de un estrato con mayor nivel de impermeabilidad debido a su contenido de arcilla (ver Calicata 2 en la Figura 3.3) puede explicar las diferencias encontradas entre los dos sitios.

Los valores mínimos y máximos que aparecen en la Tabla 4.12, por su parte, no evidencian tendencia alguna en función de la profundidad. La dispersión muestra su menor nivel a 0,5 m, siendo relativamente uniforme en las otras profundidades.

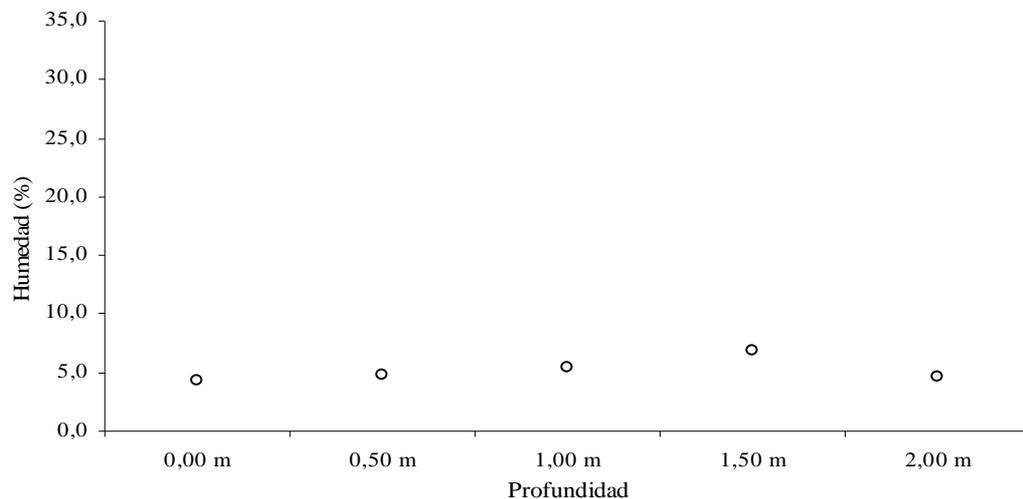


Figura 4.7: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

Con el fin de alcanzar un mayor nivel de detalle, los valores presentados anteriormente para distintas distancias a la frontera y profundidades, son analizados a continuación con un grado mayor de discriminación. La Tabla 4.13 muestra los principales resultados para las 5 posiciones exteriores a la forestación, pero en forma separada para cada nivel de profundidad estudiado. A su vez, en la Figura 4.8 se pueden apreciar las variaciones de los valores medios.

Tabla 4.13: Principales resultados para el contenido de humedad del suelo (%) para distintas profundidades y distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

Profundidad: 0 m (Superficie)

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	2,0	1,4	1,8	1,7	2,0
Med (%)	4,6	4,0	4,5	4,1	4,4
Máx (%)	10,9	7,3	8,0	8,0	7,0
DE (%)	1,9	1,5	1,8	1,6	1,4
COV (%)	42	37	39	38	31
n	24	24	24	24	24

0,5 m

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	2,2	3,3	2,5	2,9	2,5
Med (%)	4,7	4,9	5,0	4,9	4,7
Máx (%)	7,0	6,8	6,9	8,8	5,8
DE (%)	1,2	1,0	1,0	1,1	0,7
COV (%)	27	20	20	23	15
n	24	24	24	24	24

1 m

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	2,2	2,7	3,2	2,1	2,9
Med (%)	4,9	5,5	6,2	5,5	4,9
Máx (%)	12,2	17,0	14,7	9,6	9,9
DE (%)	2,4	3,0	2,7	1,9	1,6
COV (%)	48	54	44	35	33
n	24	24	24	24	24

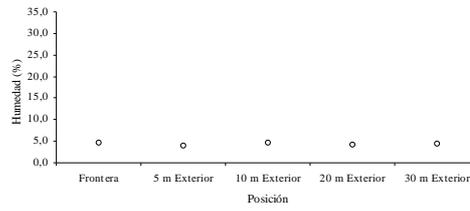
1,5 m

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	3,0	3,3	3,2	3,0	2,7
Med (%)	9,2	7,7	7,6	5,1	5,0
Máx (%)	15,8	14,3	11,7	8,8	10,1
DE (%)	3,4	3,1	2,8	1,4	1,7
COV (%)	36	40	37	27	34
n	24	24	24	24	24

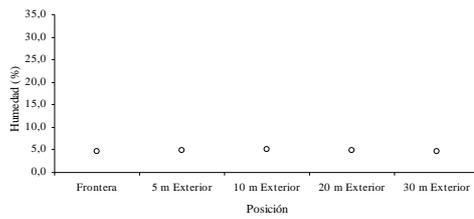
2 m

	Frontera	5 m Exterior	10 m Exterior	20 m Exterior	30 m Exterior
Mín (%)	2,2	1,7	2,7	2,8	2,1
Med (%)	4,5	5,4	5,3	4,4	3,8
Máx (%)	11,0	12,8	7,2	9,0	6,2
DE (%)	2,3	2,5	1,2	1,3	0,9
COV (%)	50	47	22	29	23
n	24	24	24	24	24

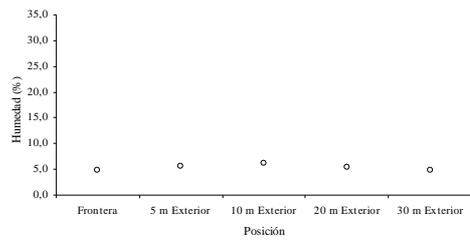
Profundidad: 0 m (Superficie)



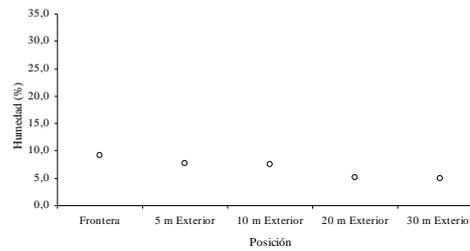
0,5 m



1 m



1,5 m



2 m

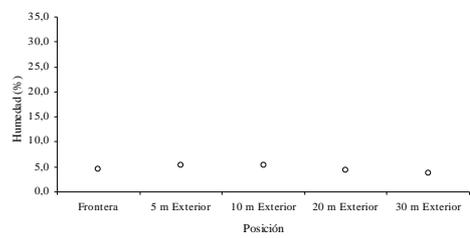


Figura 4.8: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades y distancias a la frontera en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

El nivel de discriminación logrado permite apreciar que tanto en superficie

como a 0,5 m y a 1 m de profundidad la distribución de valores medios es prácticamente simétrica respecto de los 10 m y sus variaciones son muy leves. A una profundidad de 1,5 m se encuentran los mayores promedios en forma decreciente entre la frontera (9,2 %), los 5 m (7,7 %) y los 10 m (7,6 %), y a partir de esa posición se observan nuevamente niveles muy similares al resto. No se encuentra una explicación para la presencia de esos 3 valores medios relativamente altos, que tampoco vuelven a manifestarse a los 2 m de profundidad. La homogeneidad que presenta casi la totalidad de los promedios, y que incluso puede hacerse extensiva a los mínimos y máximos, en todas las distancias y profundidades analizadas, debe señalarse como un rasgo distintivo de este sitio. La variación de la dispersión no muestra una tendencia clara, pero no presenta cambios importantes, apareciendo los menores valores del coeficiente de variación a una profundidad de 0,5 m.

iii) Análisis en función de la época del año

En la Tabla 4.14 se exhiben los principales resultados del contenido de agua del suelo para distintas épocas del año. De la misma forma que en el caso anterior, con el fin de apreciar gráficamente la evolución de los valores medios y a su vez poder compararlos directamente con la cantidad de precipitaciones registradas, en la Figura 4.9 se representan ambas variables.

Se evidencia en este sitio una relación más estrecha entre la cantidad de precipitaciones y el contenido de agua del suelo, que la encontrada en el sitio a para el exterior de la forestación (ver Tabla 4.9 y Figura 4.4). Estos resultados pueden explicarse fundamentalmente por las características del terreno, el cual, como se expresó, en este caso es más arenoso y conserva ese perfil en toda la profundidad indagada. En consecuencia, la capacidad de retención de agua es menor y las variaciones en su contenido de humedad están más vinculadas a las lluvias caídas. Exceptuando los meses en los cuales los sondeos se efectuaron en una fecha anterior a lluvias importantes, como Octubre de 2006, o posterior aunque de menor nivel, como Noviembre de 2006, los mayores valores medios responden más nítidamente en este caso a los meses de mayores precipitaciones, como es el caso de Junio (6,4 %) y Diciembre (6,4 %) de 2006 y Febrero de 2007 (6,5 %). La relación estrecha entre los promedios y las precipitaciones se manifiesta también con los menores

valores medios, que coinciden en mayor medida con los meses de escasas lluvias, como Julio (4,0 %) y Setiembre (4,1 %) de 2006 y Junio de 2007 (4,3 %).

Tabla 4.14: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	Jun/06	Jul/06	Ago/06	Sep/06	Oct/06	Nov/06	Dic/06	Ene/07	Feb/07	Abr/07	May/07	Jun/07
Mín (%)	2,2	2,3	2,6	1,7	1,7	2,5	3,8	2,1	3,2	2,9	2,1	1,4
Med (%)	6,4	4,0	5,2	4,1	4,9	5,9	6,4	4,4	6,5	5,7	4,9	4,3
Máx (%)	17,0	10,5	11,6	9,3	11,4	14,8	15,8	11,0	12,2	14,3	14,7	9,8
DE (%)	2,5	1,5	2,1	1,8	1,7	2,5	2,4	1,9	2,0	2,6	2,4	1,7
COV (%)	39	36	40	44	35	42	38	42	31	45	49	39
n	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

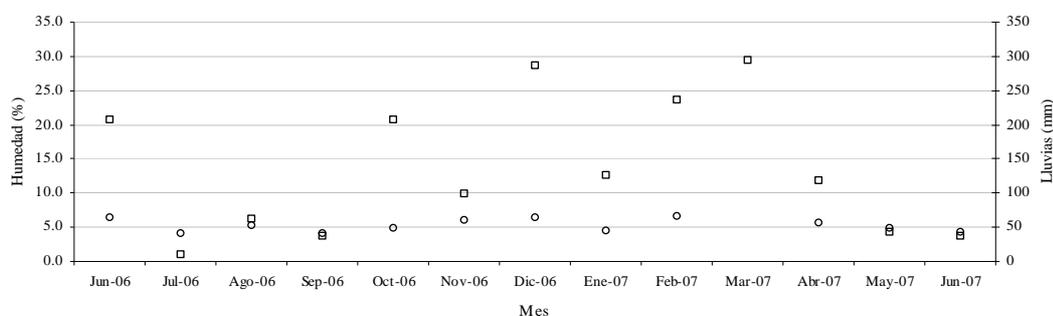


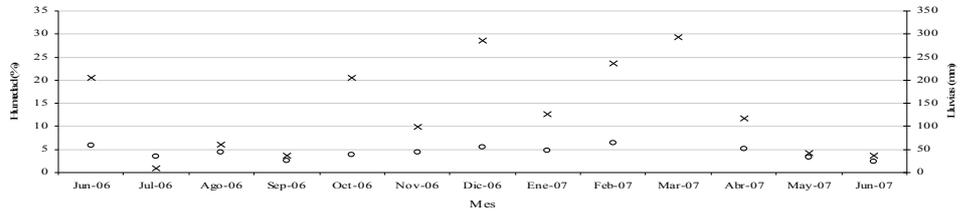
Figura 4.9: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo para distintas épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

o: contenido de humedad; x: lluvias

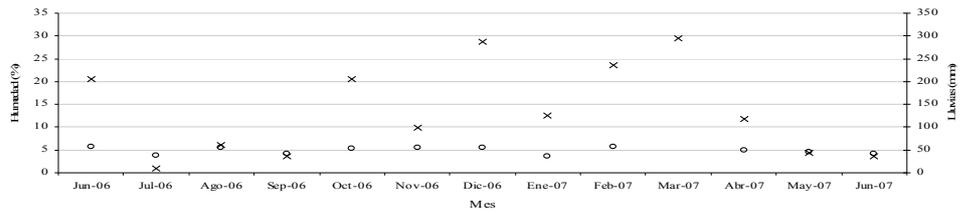
Este sitio exhibe también una mayor homogeneidad en el contenido de agua del suelo a lo largo del tiempo, que el analizado en el Apartado 4.1.1. Si se compara el mayor valor medio obtenido en Febrero de 2007 (6,5 %) con el menor de ellos encontrado en Julio de 2006 (4,0 %) surge que el primero es 63 % mayor que el segundo, en tanto que esta relación fue de 75 % para el sitio a. La desviación estándar y el coeficiente de variación no permiten apreciar una relación clara entre las distintas fechas de muestreo y sus valores, pero ponen de manifiesto una menor dispersión de datos que la encontrada en el sitio a.

Para alcanzar un mayor nivel de detalle, los valores presentados en la Tabla 4.14 y en la Figura 4.9 son mostrados a continuación separadamente para cada época del año y para cada nivel de profundidad en la Tabla 4.15 y en la Figura 4.10.

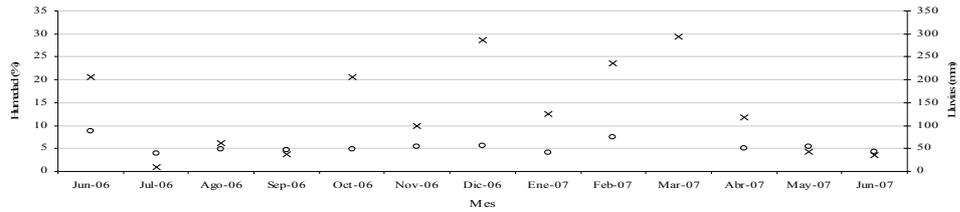
Profundidad: 0 m (Superficie)



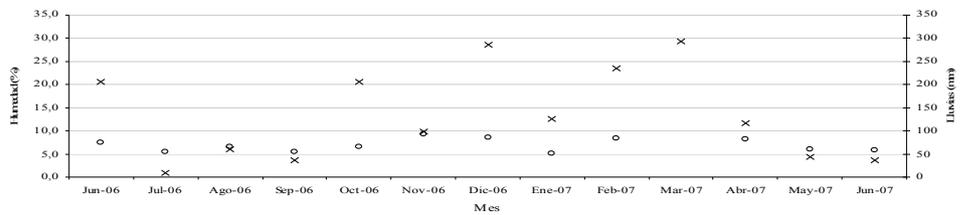
0,5 m



1 m



1,5 m



2 m

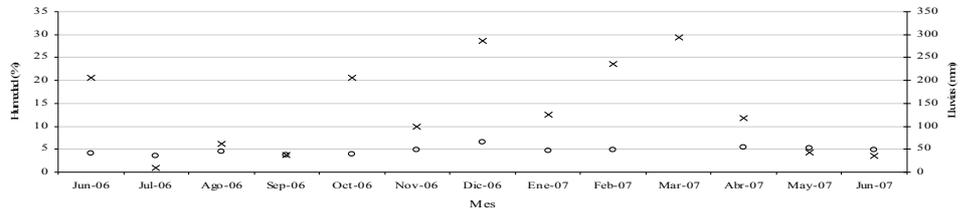


Figura 4.10: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo a distintas profundidades y para diferentes épocas del año en la forestación de *E. grandis* ubicada en el sitio b

o: contenido de humedad; x: lluvias

Es posible apreciar que hasta la profundidad de 1 m inclusive se mantiene la relación relativamente estrecha entre los valores medios del contenido de humedad del suelo y la cantidad de precipitaciones. Esa relación se vuelve menos nítida para las últimas dos profundidades exploradas.

Con relación a la vinculación existente entre el agua disponible en el terreno y la que necesitan las plantas para desarrollarse, es posible también obtener de este análisis discriminado por profundidad y época del año un detallado nivel de información. Anteriormente se expresó que el punto de marchitez de un suelo arenoso profundo como el que se encontró en este sitio b puede estimarse en 2 % (ver también el Capítulo 2). Es fácilmente apreciable, de la observación de la Tabla 4.15, que solamente en el nivel superficial y en 3 de los 12 sondeos efectuados se encontraron valores inferiores al 2 %, los cuales responden además a los mínimos de las 10 determinaciones efectuadas en cada ocasión. Los valores medios se encuentran en la mayoría de los casos en un nivel similar al intermedio entre el correspondiente al punto de marchitez y a la capacidad de campo, la que puede estimarse en aproximadamente 9 %. Los máximos prácticamente alcanzan, si bien con variaciones, el nivel de la capacidad de campo estimada para este terreno. En consecuencia, y teniendo en cuenta la distribución horizontal y vertical de las muestras extraídas, también en este caso los resultados demuestran que una normal extensión de las raíces podría solucionar aquellos pocos casos puntuales tanto en el espacio como en el tiempo en que aparece un contenido de humedad relativamente escaso para las plantas.

4.2 Resultados relacionados al segundo objetivo

A continuación se discuten los resultados obtenidos en las forestaciones de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda*, ambas de similar edad y ubicadas adyacentemente en el sitio a. Se efectúa un análisis comparando los valores que alcanza el contenido de humedad del suelo en estas plantaciones, en primer lugar globalmente y luego en forma más detallada considerando las tres variables independientes ya mencionadas anteriormente.

Para cumplir este propósito, además de que ambas plantaciones exhiben una edad similar y se ubican adyacentemente sobre el mismo sitio, en cada una se utilizó la misma distribución de pozos (sobre la frontera y el interior) y, como en todos los casos, la extracción de muestras se ejecutó simultáneamente (ver Tabla 4.5).

Los resultados generales obtenidos en el lugar de emplazamiento de la forestación de *Pinus taeda* (sitio a) se presentaron en la Tabla 4.4. En la misma se aprecia que en ese lugar fue posible extraer las muestras para todas las profundidades planificadas, las que suman 360, ya que no se encontró el estrato de arenisca existente bajo la plantación de la otra especie ubicada adyacentemente en el mismo sitio (ver Figura 3.3). Como se expresó en el Apartado 4.1.1, la presencia de ese estrato imposibilitó en algunos casos el acceso a la máxima profundidad planificada en la plantación de *Eucalyptus grandis*. No obstante, las muestras faltantes para esta especie fueron muy pocas y no obstaculizan el análisis planteado, ya que se cuenta igualmente con una muy importante cantidad de determinaciones.

Globalmente, los resultados presentados en la Tabla 4.4 para el *Pinus taeda* exhiben un valor mínimo de 1,3 %, uno medio de 8,4 % y uno máximo de 23,8 %. La desviación estándar alcanza 3,9 % y el coeficiente de variación 46 %. Una comparación de estos valores con los correspondientes a la frontera e interior de la plantación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el mismo sitio, indica que el suelo de esta última presentó en general mayores niveles de humedad y a su vez mostró una similar dispersión (ver Tabla 4.1 y Apartado 4.1.1). La prueba t probó que la diferencia entre las medias de las tablas 4.1 y 4.4 es significativa desde el punto de vista estadístico, con una probabilidad asociada (p) igual a 0,001. El test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales en este caso no puede ser rechazada, ya que el estadístico (F) alcanzó 0,02 con $p = 0,889$, y por consiguiente se asumieron varianzas iguales para la comparación de las dos muestras.

i) Análisis en función de la distancia a la frontera de la forestación

En la Tabla 4.16 se pueden apreciar los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas distancias de la frontera de la plantación de *Pinus taeda* ubicada. Los correspondientes valores para la frontera e interior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el mismo sitio fueron

presentados en la Tabla 4.6 y sucesivas (Apartado 4.1.1), y por lo tanto no se reiteran. No obstante, con el fin de facilitar la comparación de los valores medios, en la Figura 4.11 se grafican los correspondientes a las dos especies. Igual criterio se mantendrá en lo sucesivo.

Tabla 4.16: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas distancias a la frontera en la forestación de *P. taeda* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	1,6	2,2	1,3
Med (%)	8,2	8,2	8,7
Máx (%)	18,2	18,1	23,8
DE (%)	3,6	3,6	4,4
COV (%)	44	43	50
n	120	120	120

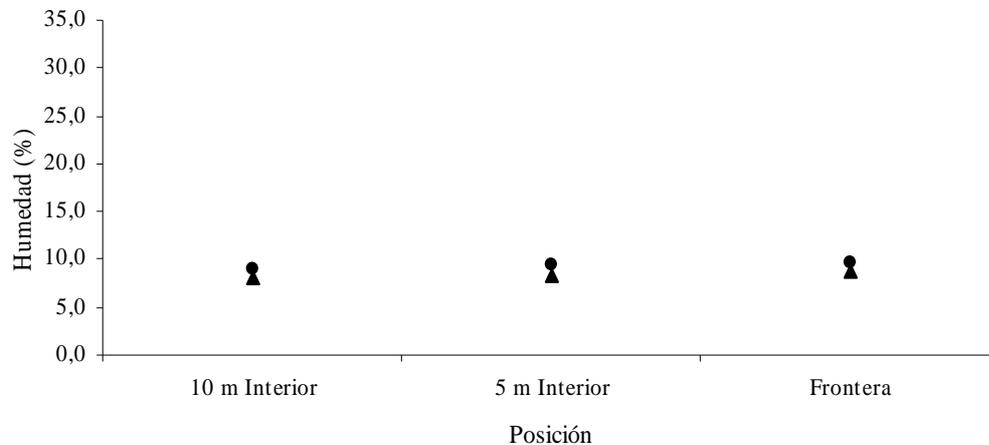


Figura 4.11: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas distancias a la frontera en las forestaciones de *E. grandis* y *P. taeda* del sitio a

●: humedad en el suelo bajo *E. grandis*; ▲: humedad en el suelo bajo *P. taeda*

Como puede apreciarse en la Tabla 4.16, el contenido de humedad del suelo en la forestación de *Pinus taeda* se mantiene prácticamente constante entre los 10 m y los 5 m hacia el interior de la frontera. Sobre esta última exhibe un pequeño incremento del valor medio y del máximo, disminuyendo a su vez el mínimo, lo que

acrecienta el coeficiente de variación. Este último es levemente mayor que el encontrado oportunamente para el suelo bajo la cobertura de *Eucalyptus grandis* en el mismo sitio (ver Tabla 4.6). La evolución de los valores que puede apreciarse en la Figura 4.11 confirma que el suelo donde se implantó el *Eucalyptus grandis* contiene un mayor contenido de humedad promedio que el cultivado con *Pinus taeda* para todas las posiciones respecto de la frontera. Es necesario destacar nuevamente que ambas plantaciones, como ya se señaló en el Capítulo 3, fueron seleccionadas de tal manera de minimizar variables no controladas, o sea que puede asumirse la existencia de una relación entre la variable independiente escogida para el análisis y el contenido de humedad del suelo. En este aspecto, las particularidades que el perfil del suelo exhibe debajo de cada forestación, las que se obtuvieron realizando las calicatas 1 y 3 (ver Figura 3.3), implican variaciones normales dentro de un mismo tipo de terreno predominante y por lo tanto puede admitirse que no afectan el criterio empleado para comparar los valores obtenidos en cada una de las plantaciones.

Si bien los resultados indican que el suelo debajo de la cobertura de *Eucalyptus grandis* posee mayor tenor de humedad que el ubicado en el cultivo de *Pinus taeda*, los niveles que exhibe este último en todas las distancias a la frontera analizadas también son adecuados para un normal desarrollo de las plantas en este tipo de suelo. Es válido en este caso el análisis ya expresado en apartados anteriores de este mismo capítulo para el suelo cubierto por *Eucalyptus grandis* en el sitio a.

ii) Análisis en función de la profundidad

En la Tabla 4.17 se exhiben los principales resultados encontrados para el contenido de humedad del suelo a distintas profundidades. Ellos indican un incremento del contenido de humedad promedio desde la superficie hasta 1 m y un posterior disminución hasta los 2 m. Este comportamiento es similar al encontrado para la frontera e interior de la plantación de *Eucalyptus grandis* del mismo sitio (ver Tabla 4.7). El coeficiente de variación encuentra su menor valor (23 %) en coincidencia con la profundidad de mayor valor medio.

La Figura 4.12 permite observar los valores medios obtenidos debajo de la cobertura de ambas especies a distintas profundidades. Salvo a 1m, donde el contenido de humedad en el suelo debajo del *Pinus taeda* es levemente superior al

encontrado bajo el *Eucalyptus grandis*, en todas las otras profundidades el terreno debajo de esta última especie presenta mayor cantidad de agua.

Tabla 4.17: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas profundidades en la forestación de *P. taeda* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	0 m	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m
Mín (%)	1,3	2,7	5,6	5,3	3,7
Med (%)	5,4	7,1	13,6	9,1	6,8
Máx (%)	11,1	16,2	20,4	23,8	13,2
DE (%)	2,1	2,6	3,1	2,7	2,5
COV (%)	38	37	23	30	36
n	72	72	72	72	72

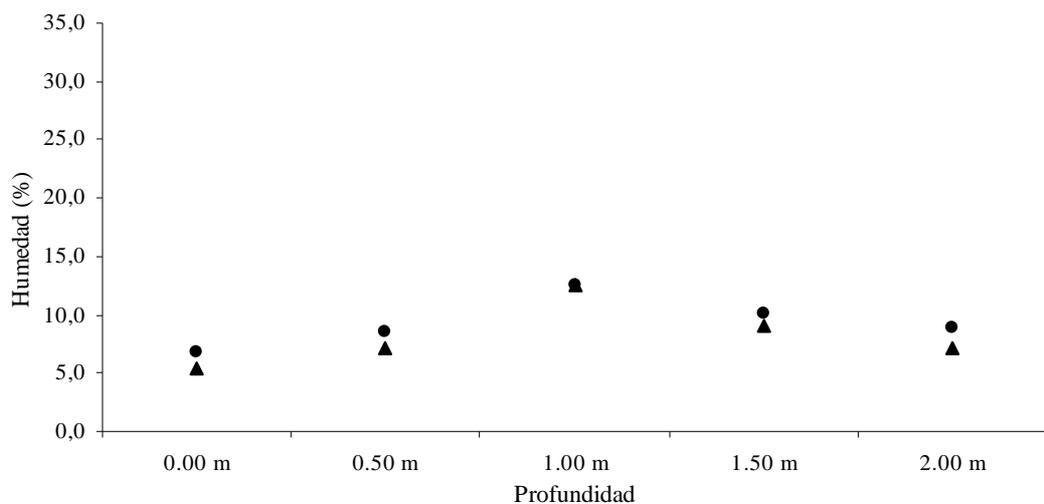


Figura 4.12: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades en las forestaciones de *E. grandis* y *P. taeda* del sitio a

●: humedad en el suelo bajo *E. grandis*; ▲: humedad en el suelo bajo *P. taeda*

Con el objetivo de lograr un mayor nivel de detalle, los valores analizados anteriormente son presentados a continuación en la Tabla 4.18 para las 3 distancias a la frontera de la forestación, pero separadamente para cada nivel de profundidad. Por su parte, en la Figura 4.13 se pueden apreciar los correspondientes valores medios para ambas especies.

Tabla 4.18: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas profundidades y distancias a la frontera en la forestación de *P. taeda* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

Profundidad: 0 m (Superficie)

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	1,6	2,2	1,3
Med (%)	5,8	5,7	4,8
Máx (%)	9,8	11,1	8,1
DE (%)	2,1	2,4	1,7
COV (%)	36	41	35
n	24	24	24

0,5 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	2,7	3,0	2,7
Med (%)	7,4	6,7	7,3
Máx (%)	14,8	11,4	16,2
DE (%)	2,8	2,4	2,8
COV (%)	38	36	38
n	24	24	24

1 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	7,7	5,6	6,0
Med (%)	13,2	12,9	14,6
Máx (%)	18,2	18,1	20,4
DE (%)	2,6	3,0	3,5
COV (%)	20	23	24
n	24	24	24

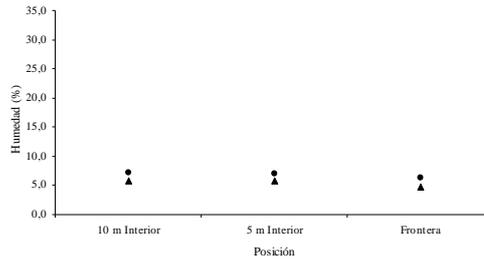
1,5 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	5,3	6,2	6,6
Med (%)	8,5	8,9	9,9
Máx (%)	12,5	13,6	23,8
DE (%)	2,3	2,0	3,5
COV (%)	27	22	35
n	24	24	24

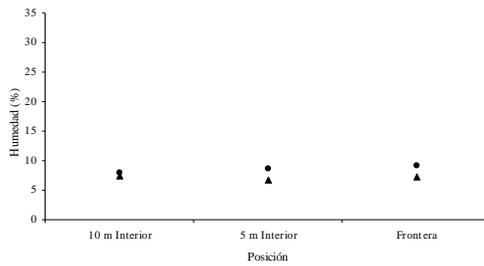
2 m

	10 m Interior	5 m Interior	Frontera
Mín (%)	4,0	3,7	4,7
Med (%)	6,1	7,0	7,1
Máx (%)	11,6	13,2	12,2
DE (%)	2,2	2,8	2,4
COV (%)	35	39	33
n	24	24	24

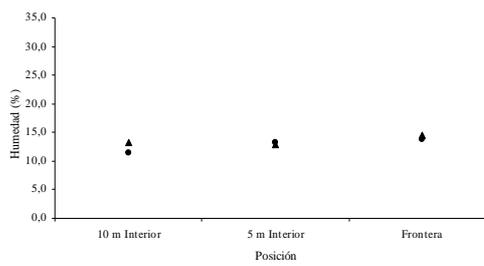
Profundidad: 0 m (Superficie)



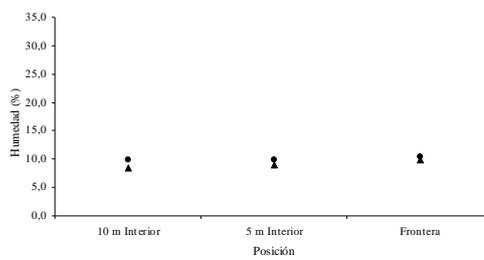
0,5 m



1 m



1,5 m



2 m

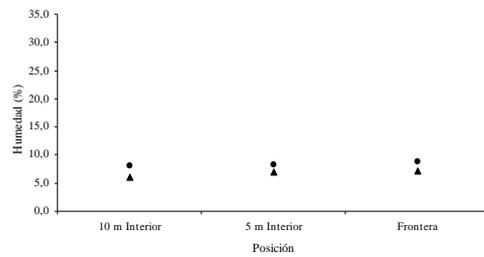


Figura 4.13: Contenido de humedad promedio del suelo para distintas profundidades y distancias a la frontera en las forestaciones de *E. grandis* y *P. taeda* del sitio a

●: humedad en el suelo bajo *E. grandis*; ▲: humedad en el suelo bajo *P. taeda*

Si se comparan los valores de esta tabla con los correspondientes de la Tabla 4.8, se observa el contenido de agua bajo el suelo de ambas especies no presenta grandes diferencias ni en magnitud ni en dispersión. No obstante, se confirma en general un nivel mayor de humedad bajo la cobertura de *Eucalyptus grandis* en casi todas las posiciones analizadas. Es de destacar que el valor promedio es mayor en esta especie que en el *Pinus taeda*, en todas las profundidades y distancias a la frontera, con excepción de las determinaciones efectuadas a 1 m de profundidad sobre la frontera y 10 m hacia el interior.

Se puede apreciar, a través de la información brindada en la Tabla 4.18 y en la Figura 4.13, que la mayor cantidad de agua en el suelo bajo la forestación de *Eucalyptus grandis* no proviene de valores aislados sino que ella se manifiesta en casi la totalidad de las posiciones analizadas y, por lo tanto, constituye una tendencia general. Adicionalmente, esta última figura pone de relieve una destacada similitud en la variación de los valores medios de ambas especies para las distintas posiciones respecto de la frontera en todas las profundidades. Esta particularidad puede explicarse por las condiciones en que se planificó el programa experimental, ya expresadas en el Capítulo 3. En efecto, además de la semejanza en edad de ambas plantaciones, el hecho de que ellas se ubiquen adyacentemente sobre un mismo sitio garantiza que el perfil del suelo bajo ambas sea semejante.

iii) Análisis en función de la época del año

En la Tabla 4.19 se exhiben los principales resultados del contenido de agua del suelo para distintas épocas del año y en la Figura 4.14 se grafican los correspondientes valores medios, siempre acompañados por las precipitaciones registradas en cada mes del período analizado. Coincidiendo con lo encontrado para el suelo ubicado en la frontera e interior de la plantación de *Eucalyptus grandis* del mismo sitio (ver Tabla 4.9), el mayor coeficiente de variación se aprecia en Setiembre de 2006 (61 %) y el menor en Febrero de 2007 (26 %). Es de destacar que el primero fue un mes con muy escasas lluvias (37 mm) y el segundo tuvo abundantes precipitaciones (236 mm). Por otra parte, los valores medios bajo la cobertura de *Eucalyptus grandis* vuelven a exhibir en este análisis mayores niveles

que bajo la de *Pinus taeda* en todos los meses con la excepción de Julio de 2006 y Junio de 2007.

La Figura 4.14 es elocuente acerca de la destacada similitud en la variación de los valores medios de ambas especies durante el período analizado. Esta particularidad, que ya fue analizada para distintas distancias a la frontera y profundidades, es confirmada para este caso y puede explicarse en los mismos términos en que se hizo anteriormente. A su vez, es congruente con el resultado del test de Levene previamente expuesto, el cual indicó que la hipótesis de varianzas iguales entre ambas muestras no puede ser rechazada, pues de hacerlo se tiene una probabilidad igual a 0,889 de cometer un error.

Tabla 4.19: Principales resultados del contenido de humedad del suelo para distintas épocas del año en la forestación de *P. taeda* ubicada en el sitio a

Mín, Med y Máx: valores mínimos, medios y máximos respectivamente; DE: desviación estándar; COV: coeficiente de variación; n: número de determinaciones

	Jun/06	Jul/06	Ago/06	Sep/06	Oct/06	Nov/06	Dic/06	Ene/07	Feb/07	Abr/07	May/07	Jun/07
Mín (%)	4,4	2,9	3,6	1,6	2,7	4,2	4,2	3,5	4,8	3,7	2,1	1,3
Med (%)	8,8	8,3	8,0	6,2	6,6	8,2	10,3	7,7	8,9	10,2	8,7	8,8
Máx (%)	19,8	19,4	16,0	16,2	13,7	17,7	20,4	18,1	13,1	18,2	17,6	23,8
DE (%)	4,0	4,7	3,5	3,8	2,9	3,0	3,8	3,6	2,3	4,3	3,4	4,7
COV (%)	46	56	44	61	45	37	37	47	26	42	39	54
n	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

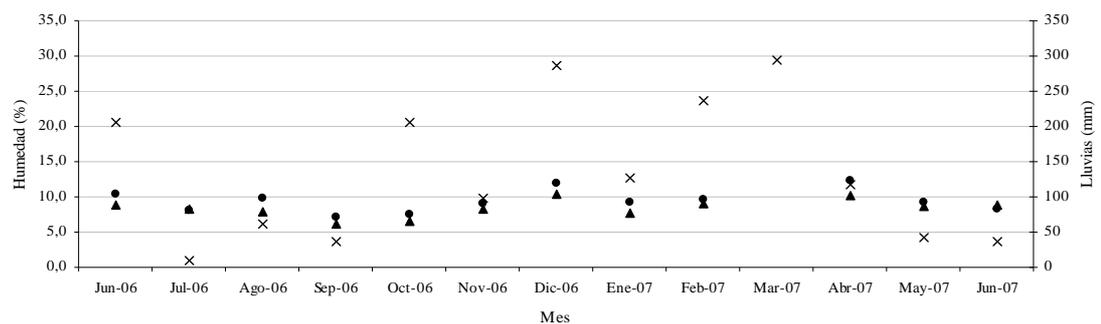
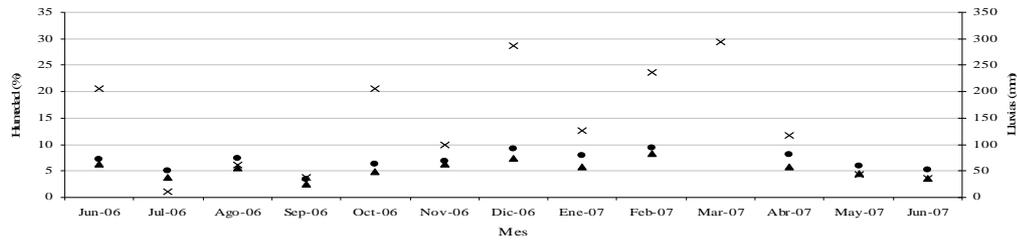


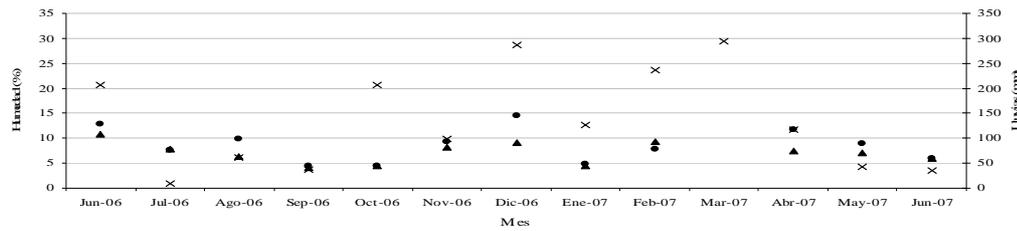
Figura 4.14: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo para distintas épocas del año en las forestaciones de *E. grandis* y *P. taeda* ubicadas en el sitio a

●: humedad en el suelo bajo *E. grandis*; ▲: humedad en el suelo bajo *P. taeda*; x: lluvias

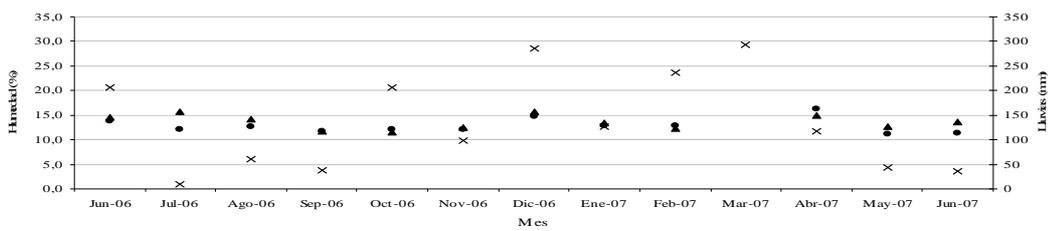
Profundidad: 0 m (Superficie)



0,5 m



1 m



1,5 m

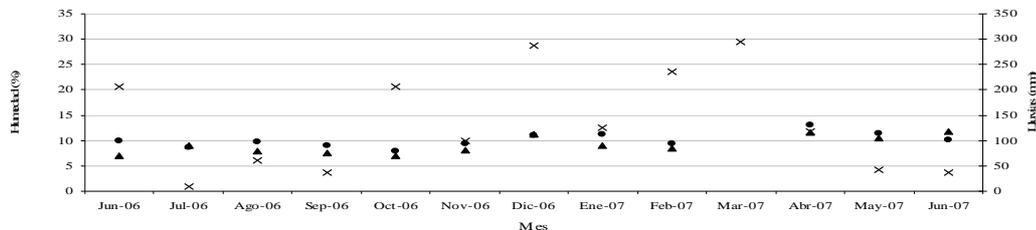


Figura 4.15: Precipitaciones registradas y contenido de humedad promedio del suelo a distintas profundidades y para diferentes épocas del año en las forestaciones de *E. grandis* y *P. taeda* ubicadas en el sitio a

●: humedad en el suelo bajo *E. grandis*; ▲: humedad en el suelo bajo *P. taeda*; x: lluvias

De la tabla anterior no surge que exista una relación entre la dispersión de valores y la profundidad para las distintas épocas del año, de igual forma que fue observado para la otra especie (ver Tabla 4.10). Una comparación de los promedios de ambas especies, los cuales también manifiestan una variación similar durante el período de tiempo estudiado, indica que el suelo bajo *Eucalyptus grandis* tuvo

mayores niveles medios de agua en todos los meses para la superficie y la profundidad de 1,5 m. Esta situación se manifiesta también a 0,5 m con la excepción de los meses de Julio de 2006 y Febrero de 2007, cuando fue mayor el contenido de humedad medio en el terreno bajo el *Pinus taeda*, y de Octubre de 2006 donde se encontraron valores iguales. A la profundidad de 1 m se produjo la mayor similitud (ver Figura 4.12), ya que en 6 meses prevaleció el promedio correspondiente al *Eucalyptus grandis* (Setiembre y Octubre de 2006 y desde Febrero a Junio de 2007) y en los otros 6 el encontrado bajo *Pinus taeda* (Junio a Agosto de 2006 y Noviembre de 2006 a Enero de 2007). La Figura 4.15 permite visualizar con facilidad la información descripta.

Ya se expresó anteriormente que tenores de humedad de entre 4 % y 9 % son normales para el punto de marchitez en terrenos franco arenosos o franco arenosos limosos como el que predomina en este sitio donde se ubican las plantaciones de ambas especies. Con el elevado nivel de discriminación logrado en el análisis anterior es posible confirmar que también bajo el *Pinus taeda*, el contenido de agua encontrado en el suelo se encuentra dentro de los niveles adecuados para que las plantas se desarrollen con normalidad. Este planteo surge de la observación detallada de los valores mínimos, medios y máximos durante el período de tiempo en que se desarrolló la investigación (Tabla 4.20). Esta tabla muestra que, si bien con un tenor de humedad algo menor que el encontrado en el suelo bajo *Eucalyptus grandis*, el que se determinó bajo *Pinus taeda* también evidencia que los contenidos de agua inferiores al punto de marchitez estimado constituyen pocos casos aislados en el tiempo y en el espacio. Las plantas, en consecuencia, podrían resolver esos problemas puntuales con una normal expansión de raíces. Por el contrario, el contenido de humedad predominante evidencia ubicarse bastante por encima de esos valores mínimos y en muchos casos se acerca al de la capacidad de campo estimada.

En esta forestación de *Pinus taeda* también se extrajeron las muestras con menor contenido de humedad en Setiembre de 2006, luego de la prolongada sequía antes mencionada. Reiterando el cálculo efectuado para la plantación de *Eucalyptus grandis* del mismo sitio con los datos correspondientes a la parte superior (1 m) de las 4 perforaciones efectuadas a 5 m y 10 m hacia el interior desde la frontera, y expresando el resultado como Lámina, la cantidad de agua presente en ese mes

alcanzó 95 mm, de los cuales 32 mm estarían disponible para las plantas. Si el consumo de una forestación típica de *Pinus* puede estimarse entre 431 y 936 mm por año (Oyarzun y Hubert 1999), la cantidad de agua encontrada sería suficiente para un período comprendido entre 13 y 27 días a partir de la fecha de extracción de muestras si no se registrasen nuevas precipitaciones y si las plantas no exploran profundidades mayores a 1 m. Los resultados de este análisis también están en línea con lo expresado en párrafos anteriores.

5 *Conclusiones*

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas luego de discutir los resultados de la investigación. Las mismas se redactan por separado para cada uno de los objetivos planteados. Adicionalmente se señalan los temas que ameritan futuras investigaciones pues la necesidad de su análisis surgió durante el desarrollo de este Trabajo de Tesis. Por último se realiza un breve análisis crítico de la metodología adoptada.

Los objetivos de este Trabajo de Tesis, ya expuestos en la Introducción, son:

- 1) Determinar el contenido de humedad del suelo en dos forestaciones de *Eucalyptus grandis* implantadas en sitios característicos de la región, y analizar su variación en función de la distancia a la frontera de la plantación, de la profundidad y de la época del año.

- 2) Determinar el contenido de humedad del suelo en una forestación de *Eucalyptus grandis* y en una *Pinus taeda*, ambas con similar edad y ubicadas en un mismo sitio característico de la región, y analizar su variación en función de la distancia a la frontera de la plantación, de la profundidad y de la época del año.

Las conclusiones se han organizado considerando por separado los dos objetivos, y, en el primero de ellos, teniendo en cuenta cada uno de los dos sitios explorados en virtud de las diferencias que exhiben. Se ha procurado reflejar además la relación entre el contenido de humedad del suelo y las tres variables independientes adoptadas para el análisis: la distancia a la frontera, la profundidad y la época del año. Adicionalmente, se han volcado en párrafos separados aquellas conclusiones que se relacionan con el contenido de agua encontrado y el punto de marchitez estimado para cada sitio, es decir las que surgen de la comparación del agua disponible en el terreno con la que necesitan las plantas para su normal desarrollo.

Preocupaciones vinculadas a un excesivo desecamiento de los suelos, a la competencia de las forestaciones o cortinas arbóreas protectoras con otros cultivos como los cítricos, entre muchas otras mencionadas en la Introducción, son motivo de constante debate. Como todos esos temas inexorablemente se relacionan al régimen de precipitaciones y al tipo de suelo, entre otras variables, las conclusiones obtenidas

del análisis de este caso consideran precisamente las condiciones propias de la región, las cuales tienen en definitiva una importancia decisiva sobre los resultados. La profundidad de terreno involucrada en el problema y la distancia a la forestación en que puede originarse una competencia por el agua constituyen, además del suelo y las lluvias, otras variables de interés, y por lo tanto los resultados obtenidos de esta investigación teniendo en cuenta las tres variables independientes antes mencionadas pueden constituir un aporte para favorecer una discusión basada en información objetiva.

Estas conclusiones se ponen a consideración de quienes tienen a cargo la gestión ambiental, de los productores, y también de las personas ligadas al sector científico-tecnológico, ya que se considera que la suma de estudios puede aportar los conocimientos necesarios para el tratamiento de un problema de gran importancia social. Si bien este trabajo está relacionado a un caso de la región, sus conclusiones pueden ser tenidas en cuenta, con la debida prudencia, para el estudio de problemáticas similares con otras especies y en otras zonas.

5.1 Conclusiones relacionadas al primer objetivo

Sitio a

- Considerado en forma global, el contenido de humedad del suelo en la frontera e interior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a fue menor que el encontrado en el exterior de la misma. La prueba t indicó que la diferencia entre las medias del interior (incluyendo la frontera) y del exterior es altamente significativa desde el punto de vista estadístico, con una probabilidad asociada (p) menor a 0,0005. A su vez, el test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales entre ambas debe ser rechazada, con una probabilidad asociada igual a 0,008.

- Teniendo como referencia la distancia a la frontera de la plantación, el contenido de humedad promedio exhibió un crecimiento desde el interior hacia el exterior, mientras que los valores mínimos y máximos, así como la dispersión, no mostraron una tendencia clara. Las variaciones del valor medio dentro de la

plantación fueron pequeñas y el mayor gradiente se produjo entre la frontera y el pozo ubicado a 5 m de la misma hacia el exterior.

- En relación a la profundidad, en el interior el contenido de humedad promedio creció desde la superficie hasta 1 m, donde exhibió su mayor valor, y luego disminuyó hasta los 2 m. En el exterior, por su parte, el incremento se produjo hasta alcanzar el valor mayor a la profundidad de 0,5 m, para luego decrecer a 1,5 m y mantenerse prácticamente constante en los 2 m. La mayor divergencia entre los valores medios del interior y del exterior se produjo a la profundidad de 0,5 m, lo cual puede explicarse por una posible disminución de las raíces hacia el exterior y por la presencia de un manto de arcilla arenosa relativamente impermeable que se encuentra entre las profundidades de 0,87 m y 1,38 m en el interior y entre 0,60 m y 1,20 m en el exterior de la plantación.

- Considerando el período analizado, el valor medio del contenido de agua obtenido en el exterior fue mayor que el correspondiente al interior en todos los meses excepto en Diciembre de 2006. Se observó la existencia de una relación entre la cantidad de precipitaciones y el contenido de humedad del suelo, que fue más estrecha en la superficie que a mayores profundidades. Los menores promedios del contenido de agua del suelo, tanto en el interior como en el exterior de la plantación, se produjeron luego de un período de importante sequía mientras que los mayores lo hicieron con posterioridad a un período de intensas lluvias.

- Con la excepción del valor medio del contenido de agua correspondiente al nivel superficial en el mes de Setiembre de 2006, los restantes fueron superiores en todos los casos al estimado como punto de marchitez para este terreno. Los valores máximos siempre superaron con holgura ese nivel, y los mínimos resultaron menores que él en situaciones temporarias aisladas y relativamente breves. Por consiguiente, una normal extensión de las raíces constituiría una solución para aquellos pocos casos puntuales, tanto en el espacio como en el tiempo, en que el contenido de humedad del terreno fue relativamente escaso para las plantas. Puede afirmarse, consecuentemente, que el contenido de humedad del suelo encontrado tanto en el interior (incluyendo la frontera) como en el exterior de esta forestación, en el período de tiempo considerado y para las distintas distancias a la frontera y profundidades analizadas, se encuentra dentro del rango que posibilita el desarrollo de cultivos.

Sitio b

- El contenido de humedad del suelo encontrado en la forestación de *Eucalyptus grandis* del sitio b fue sensiblemente inferior al determinado en el sitio a para la otra plantación de la misma especie. La prueba t indicó que la diferencia entre las medias de ambas muestras es altamente significativa desde el punto de vista estadístico, con una probabilidad asociada (p) menor a 0,0005. El test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales debe ser rechazada, con $p < 0,0005$. Como las fechas de extracción de muestras y la cantidad de precipitaciones fueron iguales, y considerando que la topografía del terreno no presentó particularidades con incidencia sobre los resultados, las variables que pueden explicar las diferencias encontradas entre ambos sitios son las disímiles características del perfil del suelo y la edad de las plantaciones.

- Un análisis en función de la distancia a la frontera de la forestación indica que el contenido de humedad promedio no creció en este caso entre el borde y la distancia de 5 m hacia el exterior como ocurrió en el sitio a, sino que se mantuvo prácticamente constante, estado que exhibió hasta los 10 m. Curiosamente, disminuyó luego a los 20 m y permaneció con una casi imperceptible variación a los 30 m de distancia hacia el exterior de la frontera. Estos resultados, que difieren de los encontrados para la otra plantación de la misma especie, ponen de manifiesto la importancia de considerar el perfil del suelo existente en cada caso particular y de actuar con prudencia en la generalización de las conclusiones.

- Tomando como referencia la profundidad, el contenido de humedad medio se incrementó desde la superficie hasta alcanzar un máximo a 1,5 m para luego decrecer hasta 2 m, donde mostró un nivel prácticamente igual al superficial. La homogeneidad que presentó el contenido de humedad del suelo en todas las distancias y profundidades analizadas, debe señalarse como un rasgo distintivo de este sitio. La ausencia en este caso del estrato con elevada impermeabilidad debido a su contenido de arcilla, que se encontró en el sitio a, puede explicar las diferencias encontradas entre los resultados de ambos predios.

- En todo el período de tiempo que involucró la investigación se evidenció una relación más estrecha entre la cantidad de precipitaciones y el contenido de agua del

suelo que la encontrada en el sitio a. Esa relación se manifestó con claridad en este sitio desde la superficie y hasta la profundidad de 1 m inclusive y apareció con menos nitidez en las últimas dos profundidades exploradas. Se encontró una mayor homogeneidad en los valores del contenido de agua del suelo a lo largo del tiempo que la existente en el otro sitio. Estos resultados pueden explicarse fundamentalmente por las características del terreno, que en este caso presenta un perfil arenoso profundo.

- Considerando el bajo punto de marchitez estimado para el suelo de este sitio, el contenido de humedad del suelo se mantuvo en niveles satisfactorios para un normal desarrollo de las plantas en las distancias a la frontera, profundidades y período de tiempo investigado. Los resultados también demostraron para este predio que una normal extensión de las raíces constituiría una solución para aquellos pocos casos puntuales, tanto en el espacio como en el tiempo, en los que apareció un contenido de humedad relativamente escaso para las plantas.

5.2 Resultados relacionados al segundo objetivo

- Tomado en forma general, el suelo bajo la frontera e interior de la cobertura de *Eucalyptus grandis* exhibió un mayor contenido de humedad que el encontrado bajo la plantación de *Pinus taeda* ubicada en el mismo sitio, y con una similar dispersión de valores. La prueba t probó que la diferencia entre las medias de ambas muestras es significativa desde el punto de vista estadístico, con una probabilidad asociada (p) igual a 0,001. El test de Levene arrojó que la hipótesis de varianzas iguales en este caso no puede ser rechazada, con $p = 0,889$.

- El suelo donde se implantó el *Eucalyptus grandis* mostró un mayor contenido de humedad promedio que el cultivado con *Pinus taeda* para todas las posiciones interiores respecto de la frontera. A su vez, las variaciones que experimentaron en esas posiciones pueden considerarse muy pequeñas. La existencia de perfiles de suelo semejantes debajo de ambas plantaciones, que son adyacentes, y la similar edad de éstas, pueden explicar la similitud encontrada en la variación de los datos.

- Tomando como referencia la profundidad, el suelo bajo la cobertura de *Pinus*

taeda exhibió un claro incremento del contenido de humedad promedio desde la superficie hasta 1 m y un posterior decremento hasta los 2 m. Su variación fue muy similar a la que mostró el suelo bajo la frontera e interior de la plantación de *Eucalyptus grandis* en el mismo sitio. Salvo a la profundidad de 1m, donde el contenido de humedad en el suelo debajo del *Pinus taeda* fue levemente superior al encontrado bajo el *Eucalyptus grandis*, en todas las otras profundidades el terreno debajo de esta última especie presentó mayores niveles promedio de agua, lo cual constituyó una tendencia general. En línea con lo expresado acerca de la variación de valores respecto de la frontera, hay que señalar la semejanza encontrada en la variación de los promedios de ambas especies para todas las profundidades estudiadas.

- Los valores medios bajo la frontera e interior de la cobertura de *Eucalyptus grandis* exhibieron mayores niveles de agua que bajo la de *Pinus taeda* en todos los meses involucrados, con la excepción de Julio de 2006 y Junio de 2007. Se encontró también una destacada similitud en la variación de los promedios de ambas especies durante el período de tiempo analizado. Esta afirmación, junto a las expresadas en párrafos anteriores, es congruente con el resultado del test de Levene, que indicó que la hipótesis de la igualdad de varianzas entre las muestras extraídas del suelo de ambas especies no puede ser rechazada.

- Si bien el suelo bajo la frontera e interior de la cobertura de *Eucalyptus grandis* mostró mayor tenor de humedad que el ubicado en el cultivo de *Pinus taeda*, los niveles que exhibió este último también se encuentran dentro de los requeridos para un normal desarrollo de las plantas en este tipo de suelo.

5.3 Nuevas investigaciones y análisis crítico de la metodología empleada

Nuevas investigaciones

Los resultados encontrados responden de manera satisfactoria a los objetivos planteados. No obstante, algunos de ellos originan a su vez un nuevo interrogante cuya respuesta amerita la concreción de otra investigación, pues no puede ser explicado en el marco del presente trabajo.

Un caso es el referido al estudio de las causas que produjeron que el contenido de humedad del suelo se mantuviera constante entre la frontera y 10 m de distancia hacia el exterior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio b, para luego disminuir a mayores distancias. En efecto, las condiciones del suelo y de la topografía no permiten explicar claramente en primera instancia que el contenido de agua del suelo haya permanecido casi invariable en el entorno cercano a la plantación, y que incluso luego haya disminuido al aumentar la distancia a la misma. El esclarecimiento de este interrogante aportaría con seguridad mayor información de utilidad para el análisis de la problemática general.

Otro interrogante a resolver, y que puede relacionarse al planteado en el párrafo anterior, es el que surge del desconocimiento del contenido de agua en el suelo a distancias mayores que 10 m desde la frontera y hacia el exterior de la forestación de *Eucalyptus grandis* ubicada en el sitio a. El interés radica en que éste presenta un perfil estratigráfico diferente al mencionado en el párrafo anterior. Como se señaló en el Capítulo 3, en la elección del sitio a fue priorizada la existencia de una plantación de *Eucalyptus grandis* y una adyacente de *Pinus taeda*, de similar edad, aunque las condiciones del entorno impidieran extender el análisis a mayores distancias que la señalada.

Análisis crítico de la metodología empleada

En este aspecto se considera que el análisis debe separar por un lado las técnicas de extracción y traslado de muestras al laboratorio, así como la ejecución de calicatas, y por el otro las determinaciones del contenido de humedad por medio del método gravimétrico.

En el primer caso la metodología adoptada resultó adecuada y no presentó aspectos negativos a destacar. Tanto el diseño y ejecución de herramientas para realizar los sondeos, como la organización de las perforaciones y la extracción de muestras, se pudieron llevar a cabo de acuerdo a lo previsto en todas las ocasiones. En este sentido es necesario señalar la excelente disposición de las empresas propietarias de las forestaciones para colaborar con la ejecución de los sondeos. El sistema de protección de las muestras, con doble embolsado, probó ser muy eficiente pues las pruebas de pérdida de peso confirmaron una estanqueidad excelente, aún

para períodos de tiempo muy superiores a los necesarios para llevar a cabo las determinaciones de laboratorio.

La adopción del método gravimétrico para determinar el contenido de humedad del suelo aportó por una parte una alta confiabilidad y por la otra significó una elevada carga de trabajo que debe ser tenida en cuenta. La fidelidad de los resultados quedó además garantizada por el hecho que siempre se dispuso de una mayor cantidad de suelo que la estrictamente necesaria para efectuar la determinación, lo que permitió efectuar comprobaciones en los casos necesarios. La importante cantidad de horas requeridas para las tareas de laboratorio involucradas fue satisfecha con la colaboración de asistentes de investigación debidamente entrenados. Paralelamente, es necesario recalcar que dentro de las ventajas del método para la ejecución de este tipo de tareas, y además de la precisión ya mencionada, se encuentra la circunstancia de que el mismo no requiere de calibraciones previas.

Bibliografía

Alonso E. (2000) Uso eficiente del agua en frutales y viñas con riego tecnificado. Memorias 1º Seminario internacional de fertirriego, Santiago, Chile.

Alzugaray P. (2003) Efecto del volumen radicular y la tasa de fertilización sobre el comportamiento en terreno de plantas de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) producidas con método 1 + 1. Memorias Silvotecnía 2003, Chile.

Associação Brasileira de Produtores de Madeira, ABPM (2001) Eucalipto. Ed. Especial Revista da Madeira, Curitiba.

Braier G. (2004) Tendencias y perspectivas del sector forestal al año 2020 Argentina. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable , Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la nación, FAO. Argentina.

Brown A. G. y Hillis W. E. (1978) General Introduction. in *Eucalypts for Wood Production*, Eds. W. E. Hillis and A. G. Brown, pp. 3-5. CSIRO, Melbourne.

Calder I.R. Hall R.L. y Adlard P.G. (1992) *Growth and Water Use of Forest Plantations*. John Wiley and Sons, Chichester, 381 p.

Contreras Camacho D., Fuentes Díez N. Y Saucó Martínez C. (2006) análisis y determinación de la composición de un suelo. Instituto de educación Enrique Flórez, España

Crockford R. H. y Richardson D. P. (1990) Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in Southeastern Australia. The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of this forest, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrological Processes*, 4(2): 169-198.

Davies W.J., Metcalfe J, Lodge T.A. y Da Costa A.R. (1986) Plant growth substances and the regulation of growth under drought". *Australian Journal of Plant Physiology*, 13:105- 25.

Díaz D., Tesón N. y García M. (2006) Efectos ambientales de las forestaciones de eucaliptos en el noreste de Entre Ríos. XXI Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. 15 p.

Domínguez A. (1996) *Fertirrigación*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.

Donoso C. (1992) *Ecología Forestal: El bosque y su medioambiente*. Universidad Austral de Chile, Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 368 Pp.

Doorenbos J. y Pruitt W.O. (1976) Las necesidades de agua de los cultivos. FAO, 24: 194 p.

Dorronsoro C (En línea) Introducción a la edafología. <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema00/progr.htm>,

(consulta: Octubre 2007).

FAO (1987) Efectos ecológicos de los eucalyptus. FAO montes, 59, Roma: 106 p.

Feller M. C. (1981) Water balance in *Eucalyptus regnans*, *E. oblicua*, and *Pinus radiata* forest in Victoria. *Australian Forestry*, 44(3): 153-161.

Fischesser B. (2000) *El árbol*. El Drac, Madrid.

Gil R. (2001) *El Comportamiento Físico-Funcional de los Suelos*, Instituto de suelos, INTA Castelar.

Hibbert A. R. (1976) Percolation and streamflow in range and forest lands. Watershed management on Range and Forest Lands. Proceedings of the Fifth Workshop of the United States/Australia Rangelands Panel Boise, Idaho, June 15-22, 1975. Utah Water Research Laboratory. Utah . 61-72.

Honorato R. (2000) *Manual de edafología*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, 168 Pp.

Huber A. J. (2003) Efecto de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don sobre el balance hídrico en Chile. Instituto de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Santiago Chile.

Hunter I. y Gybson A. (1984) Predicting *Pinus Radiata* Site Index from environmental Variables. *N.Z.J.For. Sci* 14.

Hsiao T. C. (1973) Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.

INTA-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1995) *Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina*. Grupo Forestal, EEA INTA

Concordia, Argentina.

Israelsen O.W. y Hansen, V.E. (1985) Principios y aplicaciones del riego. Editorial Reverté, 395 p.

Jensen W.A. y Salisbury F.B. (1988) Botánica. Editorial McGraw-Hill, 762 p.

Jones H. (1985) Stomatal behavior and breeding for drought resistance. *Plant Physiology*, 61:122-126.

Kramer P. J. (1974) Relaciones hídricas del suelo y plantas. Una síntesis moderna. Centro regional de ayuda técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D). México/Buenos Aires. 538p.

Lane P.N.J., Morris J., Ningnan Z., Guangyi Z., Guoyi A. Daping X. (2004) Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 253-267.

Lanzara P. y Pizzetti M. (2003) Árboles. Grijalbo, Toledo.

Le R. 1980. *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York. 349p.

Lima W. P. (1996) Impacto ambiental do eucalipto. San Pablo, Edusp.

Martínez Fernández J., Ceballos Barbancho A., Angel Luengo Ugidos M. (2001) La sequía edáfica en la cuenca del Duero. *Ecosistemas Año X N° 3*, España.

Osava M (2001) Eucalipto contra viento y marea. Reportaje. *Tierramérica*, Rio de Janeiro. <http://www.tierramerica.net/2002/1021/articulo.shtml>.

Oyarzun C. E. Y Huber A. (1999) Balance hídrico en las plantaciones de *Eucalyptus glóbulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *Terra volumen 17, número 1*, Chile.

Palmberg-Lerche C. y Patiño F. (1999) Impacto ambiental de las plantaciones de especies del género eucalyptus en las regiones tropicales y subtropicales, Seminario Internacional sobre el Eucalipto: impacto ambiental, tecnologías y beneficios. México D.F.

Pereira de Lima R. A. (2004) Antropización, dinámicas de ocupación del territorio y desarrollo en la amazonía brasileña: el caso del estado de Amapá. Universidad Autónoma de Barcelona.

Perez Arrarte (2000) Plantaciones forestales en la pradera uruguayas. Grupo Guayubira, Maldonado Uruguay.

Perez Arrarte (2007) Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua, un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay. Ed Hersilia Fonseca, Montevideo.

Perrier A. (1984) Updated evapotranspiration and crop water requirement definitions. In: Les besoins en eau des cultures / Crop Water Requirements, Conference Internationale, París, 11/14 se., 886-887. CIID-INRA.

Philip J. R. (1957) the theory of infiltration. Soil Science 83: 345 – 357

Radersma S, Ong C. K. (2004) Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry system in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models, Forest ecology and management, pp 77-89, ELSEVIER.

Rébori M. (2001) Requerimientos de agua del Eucalyptus dunnii en su implantación y monte adulto. Medición y contribución al balance hídrico regional. Investigación Forestal al Servicio de la Producción II, Ministerio de Economía y Producción Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos Dirección de Forestación, Buenos Aires.

Ritchie J.T. (1972) A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover, *Water Resources Research* 8(5), 1204-1213.

Salisbury F.B. y Ross C.W. (1994). *Fisiología Vegetal*. Editorial Iberoamérica. 759 p.

Sánchez Acosta M y Vera L. (2005) Situación forestoindustrial de Argentina al 2005. III Simposio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal Ubatuba San Pablo Brasil.

San Martín J. P. y Acevedo E. (2001) Temperatura de canopia, CWSI y rendimiento en genotipos de trigo. Laboratorio de relación suelo – agua - planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 64p.

Santa Olalla M. F. y De Juan J. A. (1993) *Agronomía del riego*. Ediciones Mundi-Prensa, 731 p.

Secretaría de Estado de la Producción de Entre Ríos y INTA Concordia (2002) Relevamiento de industrias forestales primarias de la costa del Río Uruguay de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.

Sivori E. (1986) *Fisiología Vegetal*. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Vol. 4, 389 p.

Soares J. V. y Almeida A. C. (2001) Modeling the water balance and soil water fluxes in fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of hydrology* 253, 130-147.

Taiz L. Zeiger E. (1998) *Plant physiology*. Sinauer associate. Inc Publishers, USA: 792 p.

UNC (en línea) Determinación del contenido hídrico del suelo. (http://vaca.agro.uncor.edu/~ceryol/documentos/ecofisiologia/GUIA_AGUA.pdf).

USDA (1999) Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Washington, DC: 871 p.

Vihavainen T. (1995) Environmental aspects of timber. In Timber Engineering STEP 1, pp. A16/1-A16/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Zhang, J. y Davies, W.J. (1990) Changes in the concentration of ABA in xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth. *Plant, Cell and Environment*, 13:277-285.

Zhou G.Y., Morris J.D., Yan J.H., Yu Z., Peng S.L. (2002) Hydrological impacts of reforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. *Forest ecology and Management*, ELSEVIER.
