

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACIÓN ESTACIONAL DE LA HIDROFOBICIDAD DEL SUELO EN
DOS EXPOSICIONES DE REMANENTES DEL BOSQUE ESCLERÓFILO DE
LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

NATALIA IGNACIA SUAZO QUIÑONES

Santiago, Chile

2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACIÓN ESTACIONAL DE LA HIDROFOBICIDAD DEL SUELO EN
DOS EXPOSICIONES DE REMANENTES DEL BOSQUE ESCLERÓFILO DE
LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

**SEASONAL ASSESSMENT OF SOIL HYDROPHOBICITY IN TWO HILLSIDE
OF THE SCLEROPHYLLOUS FOREST REMNANTS OF THE O'HIGGINS
REGION**

NATALIA IGNACIA SUAZO QUIÑONES

Santiago, Chile

2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**EVALUACIÓN ESTACIONAL DE LA HIDROFOBICIDAD DEL SUELO EN
DOS EXPOSICIONES DE REMANENTES DEL BOSQUE ESCLERÓFILO DE
LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

NATALIA IGNACIA SUAZO QUIÑONES

Profesor Guía		Calificaciones
Sr. Óscar Seguel. Ingeniero Agrónomo, Dr.		7,0
Profesores Evaluadores		
Sr. Profesor Marco Pfeiffer. Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,9
Sra. M. Verónica Díaz M. Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc.	 <small>Maria Veronica Diaz Martinez 8.401.965-8 03/01/2023 - 10:32 UNIVERSIDAD DE CHILE ESTE DOCUMENTO CONTIENE FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA https://icropapel.uchile.cl/validacion/verificador CV: 63b42e5d8552247093f39c4</small>	6,8
Profesor Colaborador		
Sr. José Neira. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.		

Santiago, Chile
2022

A mis amigas, familia, profesores y personas que estuvieron en esta etapa de mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
SUMMARY	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	5
Objetivos específicos.....	5
METODOLOGÍA	6
Área de Estudio	6
Tratamiento y diseño experimental	7
Objetivo 1: Determinar la hidrofobicidad de los suelos según especies arbóreas en remanentes del bosque esclerófilo de dos laderas opuestas en invierno y primavera.....	8
Muestreo de Suelo.....	8
Objetivo 2: Analizar el efecto espacio-temporal de la hidrofobicidad en las muestras de suelo provenientes de las condiciones antes mencionadas	10
Objetivo 3: Relacionar el efecto de la hidrofobicidad, considerando las especies arbóreas, en muestras de suelo seco y a capacidad de campo	10
RESULTADOS.....	12
Objetivo 1: Determinar la hidrofobicidad de los suelos según especies arbóreas en remanentes del bosque esclerófilo de dos laderas opuestas en invierno y primavera .	12
Objetivo 2: Analizar el efecto espacio-temporal de la hidrofobicidad en las muestras de suelo provenientes de las condiciones antes mencionadas	14
Análisis considerando todas las variables explicativas	14
Análisis espacial	15
Análisis temporal	16
Análisis de especies arbóreas.....	17
Objetivo 3: Relacionar el efecto de la hidrofobicidad, considerando las especies arbóreas, en muestras de suelo seco y equivalente a capacidad de campo.....	19
Variables de suelo.....	19
Análisis de Componentes Principales según ladera.....	19
Análisis de Componentes Principales según temporalidad	20
Análisis de Componentes Principales según especies arbóreas	21
DISCUSIÓN	23
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27
APÉNDICES.....	31
Apéndice 1. Índice R de individuos en función de la ladera, temporada y especies arbóreas.....	31

RESUMEN

La repelencia del suelo a la humectación por agua es un factor relevante para entender los procesos hidrológicos, como la erosión o la capacidad de almacenamiento de agua, sobre todo en un contexto de cambio climático y sequías en un clima mediterráneo como la zona central de Chile. Se analizaron 144 muestras de suelo colectadas bajo la influencia de cuatro especies arbóreas dominantes en dos remanentes (exposiciones) del bosque esclerófilo, recopiladas en invierno y primavera en Malloa y San Vicente (Región de O'Higgins). Se determinó si las muestras de suelo presentan carácter hidrofóbico o hidrofílico a través del Índice de Repelencia (R) y se analizó su relación con propiedades físicas del suelo. De los factores del estudio (4 especies arbóreas, 2 sitios, 2 fechas) diez de los dieciséis valores de R son hidrófobos, es decir, presentan repelencia al agua, predominantemente en época de invierno y bajo *Peumus boldus*; por su parte, *Escallonia pulverulenta* es la única especie que presentó valores cercanos a la hidrofilia. La fecha de muestreo fue la única variable que presentó efecto significativo sobre los valores de R ($p=0,0408$), con una mayor repelencia en invierno. Respecto al análisis de componentes principales, este logró discriminar los sitios (exposiciones), posiblemente debido a un efecto textural. Los suelos muestreados de la zona central de Chile presentan un comportamiento predominantemente hidrofóbico, sin embargo, es necesario continuar estudiando el efecto del contenido de materia orgánica y la textura del suelo sobre la repelencia al agua en suelos de Chile.

Palabras clave: Repelencia al agua, Índice R, temporalidad.

SUMMARY

The soil repellency to wetting by water is a relevant factor to understand hydrological processes, such as erosion or the water storage capacity, especially in a context of climate change and droughts in a Mediterranean climate like the central zone of Chile. 144 soil samples were collected and analyzed under the influence of four dominant tree species in two remnants (Slope exposure) of the sclerophyllous forest, collected in winter and spring in Malloa and San Vicente (O'Higgins Region). It was determined if the soil samples have a hydrophobic or hydrophilic character by the Repellency Index (R), analyzing its relationship with soil physical properties. Ten of the sixteen factors of the study (4 tree species, 2 sites, 2 seasons) show R values considered as hydrophobic, thus, they present water repellency, predominantly in winter and under *Peumus boldus*; On the other hand, *Escallonia pulverulenta* is the only species that presented values close to hydrophilicity. The sampling date was the only variable that showed a significant effect on the R values ($p=0.0408$), with the highest repellency in winter. The principal component analysis discriminated well between the sites (slope exposures), possibly due to a textural effect. The soils sampled from the central zone of Chile has a predominantly hydrophobic behavior; however, it is necessary to continue studying the effect of the organic matter content and soil texture on water repellency in Chilean soils.

Keywords: Water repellency, R Index, temporality.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno a escala global que ha generado variaciones en las precipitaciones durante las últimas décadas, impactando negativamente a la zona central de Chile (Universidad de Chile, 2014). Al respecto, Rockstro *et al.* (2009) predicen que los suelos en un futuro presentarán periodos más secos en los meses estivales, por lo que existirá una disminución en la cantidad de agua del suelo. Teniendo en cuenta la importancia del recurso suelo como reservorio de agua, es imprescindible estudiar cómo sus propiedades afectan la disponibilidad hídrica, destacando entre otras:

- La *curva característica de retención de agua*, que relaciona la fuerza que ejerce el suelo con un cierto volumen de agua en sus poros a distintas presiones (Lamparter *et al.*, 2010), determinando el agua disponible para las especies.
- La *conductividad hidráulica*, la cual corresponde a la capacidad del suelo de conducir fluidos en el espacio poroso, relacionándose con procesos de infiltración y escorrentía en el suelo (Dirksen, 1999; Lado *et al.*, 2004).
- La *sortividad*, la que corresponde a la capacidad del suelo para absorber líquidos por capilaridad, especialmente el agua (Jury y Horton, 2004).
- La *hidrofobicidad*, que corresponde a la repelencia que tiene el suelo a la humectación por el agua y que según Hallet (2007) resulta ser un factor relevante para explicar la escasez hídrica al afectar los procesos de retención y conducción del agua.

La hidrofobicidad se caracteriza por ser una propiedad dinámica que depende de la presencia de sustancias hidrófobas en las partículas del suelo, por lo que afecta la tasa de humectación y la retención del agua (Hallet, 2007; Beatty y Smith, 2013), impactando grandes superficies y una amplia variedad de ecosistemas, tanto naturales como agrícolas (Bedini *et al.*, 2009; DeBano, 2000). Esta propiedad se produce principalmente en la superficie del suelo y disminuye con la profundidad, dependiendo del tamaño de las partículas que lo forman (Urbanek *et al.*, 2007), como también del tipo y cantidad de materia orgánica que contenga (Lamparter *et al.*, 2009). Por ejemplo, los suelos arenosos tienen una superficie específica menor que suelos limosos o arcillosos, por lo que la materia orgánica cubre rápidamente el área expuesta, afectando una mayor cantidad de partículas (Hallet, 2007). A su vez, dependiendo del tipo de vegetación y su hojarasca, los procesos de escorrentía y erosión serán diferentes en función de la hidrofobicidad del suelo (Seitz *et al.*, 2015).

Por otro lado, la sortividad, explica los procesos de humectación inicial de los suelos en función de la atracción matricial de estos, por lo que eventualmente permite determinar la repelencia del suelo, definiendo su carácter hidrofílico o hidrofóbico (Jury y Horton, 2004). Tanto la conductividad hidráulica como la sortividad dependen de la forma, volumen y tortuosidad de los poros del suelo, pero también del contenido de agua, de manera que, en el caso del suelo seco, la conductividad hidráulica será menor y la sortividad será mayor que en el suelo húmedo (Warrick, 2002; Orellana *et al.*, 2004). Por otra parte, un suelo con poros más grandes tiene una mayor conductividad hidráulica y una sortividad menor que un suelo con poros más pequeños (Hallet, 2007). Finalmente,

las coberturas hidrófobas en el sistema poroso cambian las propiedades del agua por lo que se puede utilizar la sortividad para evaluar la repelencia al agua de los suelos (Hallet y Young, 1999).

El desarrollo del comportamiento hidrófobo del suelo se debe tanto a factores bióticos, en los que participa la materia orgánica, en conjunto con la flora, fauna y funga; como también a factores abióticos, en los que se destacan la temperatura, la humedad y la textura del suelo (Doerr *et al.*, 2000). El principal efecto del comportamiento hidrófobo del suelo se relaciona con el ciclo hidrológico, ya que incrementa la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión, además de incrementar el riesgo del movimiento de contaminantes a través del suelo por efecto de flujos preferenciales (Lado *et al.*, 2004). Eventualmente una capa hidrófoba superficial forma una barrera capilar, siendo un factor clave en la estabilidad física del suelo, ya que reduce el proceso de evaporación y humectación (Jaramillo, 2006; Hallet, 2007).

Dentro de los factores bióticos, se encuentran los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), los que corresponden a organismos simbioses mutualistas que viven en asociación con las raíces de la mayoría de las plantas terrestres, liberando ácidos orgánicos que no sólo se asocian a la estabilidad estructural del suelo, sino que también con la hidrofobia (Hallet, 2007). Estos organismos cumplen una función ecosistémica, ya que ayudan a las plantas a enfrentar procesos de estrés abiótico, como por ejemplo la sequía o incendios, aportando en la restauración de ecosistemas degradados (Silva-Flores *et al.*, 2019). En un bosque esclerófilo se podría esperar diferencias en la repelencia del agua por efecto de la exposición o del tipo de especie, en función del tipo o cantidad de materia orgánica que aporta. Además, en un clima mediterráneo marcadamente seco en primavera-verano y húmedo en otoño-invierno, la dinámica de la materia orgánica y de la actividad microbiológica se podría ver afectada y debiera influir en la hidrofobia, ya que esta es una propiedad que depende fuertemente del contenido del agua en el suelo, manifestándose mayoritariamente en condiciones secas (Doerr *et al.*, 2000). Por otra parte, se ha observado que las micorrizas minimizan el estrés biótico y abiótico de las plantas, tales como la sequía y los herbívoros, aportando con esta simbiosis en los ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo, en la regulación de la diversidad vegetal y la supervivencia de las plántulas (Smith y Read, 2008). Es necesario considerar lo anterior, ya que en la zona central de Chile no se ha estudiado con profundidad la relación entre la formación vegetacional nativa con factores físico químicos del suelo en distintas estaciones del año y exposiciones.

Considerando la importancia de los factores bióticos como abióticos y las propiedades físicas del suelo en las posibles influencias que pueden tener en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua en el suelo, es fundamental estudiar si existe alguna relación entre la hidrofobicidad con las especies arbóreas del remanente del bosque esclerófilo en la zona central de Chile.

Objetivo General

Evaluar el efecto estacional de la hidrofobicidad del suelo en dos exposiciones de remanentes del bosque esclerófilo en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Objetivos específicos

1. Determinar la hidrofobicidad de los suelos según especies arbóreas en remanentes del bosque esclerófilo de dos laderas opuestas en invierno y primavera.
2. Analizar el efecto espacio-temporal de la hidrofobicidad en las muestras de suelo provenientes de las condiciones antes mencionadas.
3. Relacionar el efecto de la hidrofobicidad, considerando las especies arbóreas, en muestras de suelo seco y equivalente a capacidad de campo.

METODOLOGÍA

El presente trabajo complementa el proyecto de doctorado “*Factors affecting arbuscular mycorrhizal fungi spore Density in the Chilean Mediterranean-Type Ecosystem*” (Silva-Flores *et al.*, 2019), en el que se estudian otras propiedades físicas y químicas del suelo y del que se obtuvieron las muestras de suelo a analizar.

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a remanentes de bosque esclerófilo ubicados en sitios cercanos de las comunas de Malloa (M) y San Vicente de Tagua Tagua (SV), en la Región del Libertador Bernardo O’Higgins (Figura 1). Estas comunas se caracterizan por su clima mediterráneo típico de la zona central de Chile, donde el verano es seco y el invierno es húmedo y frío. Ambos sitios poseen remanentes del bosque esclerófilo con especies perennes en sectores que aún no han sido intervenidos por el ser humano, los que se encuentran entre los 30° - 36° latitud sur (Underwood *et al.*, 2009). El primer sitio de estudio corresponde a Malloa, específicamente la ladera “Cerro Caracoles” (34°26’S, 70°57’W), zona relativamente seca, ya que presenta orientación noreste. Por otra parte, el segundo sitio es la ladera “Monte Requegua” (34°26’S, 70°59’W) en San Vicente de Tagua Tagua, con orientación suroeste, caracterizándose por ser una zona más húmeda que Malloa, ya que está menos expuesta a la radiación solar.

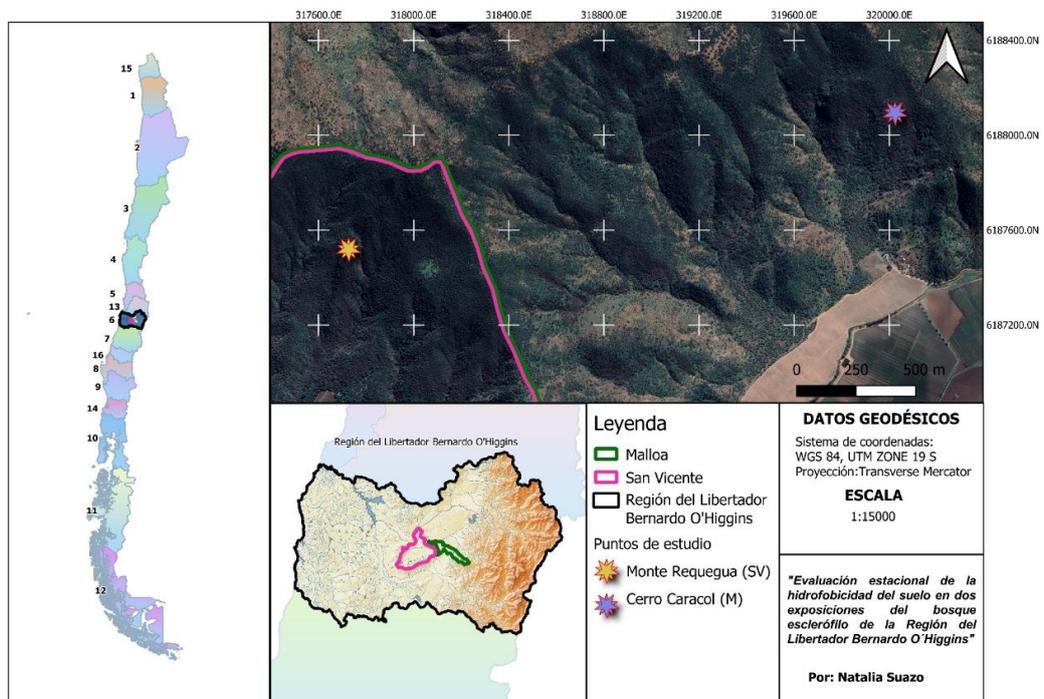


Figura 1. Área de estudio, Malloa y San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

El trabajo de campo se realizó en invierno y primavera del año 2016, donde las precipitaciones medias fueron 194 mm y 40 mm, respectivamente, con temperaturas medias atmosféricas de 13°C y 18°C y la temperatura del suelo fue 11°C y 19°C, respectivamente para las épocas de invierno y primavera.

De acuerdo con CIREN (1996), el suelo corresponde a la asociación La Lajuela, la cual es un miembro de la familia franca mixta térmica de los Ultic Haploxeralf, que deriva del mismo material parental pero que presenta diferencias según la exposición. Por ejemplo, la exposición norte correspondiente a Malloa, destaca por su color pardo amarillento oscuro en seco y pardo amarillento en húmedo, tiene una textura franco arcillo arenosa, con estructura de bloques angulares medios y finos, moderados, actividad biológica abundante con raíces finas abundantes, poros finos y medios comunes, presencia de clastos angulares de hasta 10 cm de diámetro, comunes a abundantes. Por su parte, la exposición sur presenta color pardo a pardo oscuro en seco y pardo amarillento en húmedo, posee una textura franco arcillo arenosa, con estructura de bloques subangulares medios y finos; también destaca por su buena actividad biológica, donde sus raíces son finas y medias muy abundantes y poros finos y medios abundantes (CIREN, 1996).

Los remanentes de los bosques esclerófilos de las dos laderas tenían presencia de árboles y arbustos, con vegetación de tipo siempre verde. En el caso de Malloa, las especies arbóreas dominantes fueron *Lithraea caustica* (Anacardiaceae), *Peumus boldus* (Monimiaceae), *Escallonia pulverulenta* (Escalloniaceae) y *Kageneckia oblonga* (Rosaceae). Por otra parte, las especies dominantes en el remanente elegido de SV fueron *Lithraea caustica* (Anacardiaceae), *Peumus boldus* (Monimiaceae), *Cryptocarya alba* (Lauraceae) y *Quillaja saponaria* (Quillajaceae) (Silva-Flores *et al.*, 2019). Es decir, los sitios comparten dos especies en común y además presentan especies específicas de cada lugar.

La fenología de las especies arbóreas fue similar en todos los individuos, donde el crecimiento vegetativo comenzó en primavera, en verano se formaron los brotes florales y ocurrió el proceso de floración, la fructificación ocurrió en otoño y en invierno no hubo actividad al respecto (Orshan, 1989).

Tratamiento y diseño experimental

El estudio se estructura en un diseño de parcela dividida, donde la parcela principal corresponde al factor exposición (Malloa exposición norte, San Vicente exposición sur) y la subparcela corresponde al factor especie arbórea (Cuadro 1). Además, se considera el factor tiempo (invierno y primavera) para evaluar el efecto del clima (temperatura y humedad) sobre la dinámica de la materia orgánica y la expresión de la hidrofobia.

Cuadro 1. Información espacial, temporal y arbórea de las laderas ubicadas en Malloa (M) y San Vicente (SV).

Ladera	Estacionalidad	Nombre científico	Nombre vernacular	Símbolo
M	I	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	B

M	I	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	L
M	I	<i>Escallonia pulverulenta</i>	Corontillo	C
M	I	<i>Kageneckia oblonga</i>	Bollén	K
SV	I	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	B
SV	I	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	L
SV	I	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo	P
SV	I	<i>Quillaja saponaria</i>	Quillay	Q
M	P	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	B
M	P	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	L
M	P	<i>Escallonia pulverulenta</i>	Corontillo	C
M	P	<i>Kageneckia oblonga</i>	Bollén	K
SV	P	<i>Peumus boldus</i>	Boldo	B
SV	P	<i>Lithraea caustica</i>	Litre	L
SV	P	<i>Cryptocarya alba</i>	Peumo	P
SV	P	<i>Quillaja saponaria</i>	Quillay	Q

M: Malloa, SV: San Vicente, I: Invierno, P: Primavera, B: *Peumus boldus*, C: *Escallonia pulverulenta*, K: *Kageneckia oblonga*, L: *Lithraea caustica*, P: *Cryptocarya alba*, Q: *Quillaja saponaria*.

Cabe destacar que todas las especies arbóreas son de tipo siempreverde y son dominantes en los remanentes del bosque esclerófilo. El peumo, quillay y el corontillo son árboles o arbustos hasta 10 metros de altura, el boldo se presenta como árbol y arbusto con una altura entre 3 y 6 metros, y por último el litre y el bollén se presentan como árboles y arbustos de 1 a 4 metros de altura (Hoffmann, 2012).

Objetivo 1: Determinar la hidrofobicidad de los suelos según especies arbóreas en remanentes del bosque esclerófilo de dos laderas opuestas en invierno y primavera

Muestreo de Suelo. En cada ladera, M y SV, se identificaron las cuatro especies arbóreas dominantes de remanentes del bosque esclerófilo, dos de ellas comunes a ambos sitios: *Lithraea caustica* (L) y *Peumus boldus* (B). Además, para el caso de M, se identificó a *Escallonia pulverulenta* (C) y *Kageneckia oblonga* (K), mientras que para SV se destacan como especies dominantes a *Quillaja saponaria* (Q) y *Cryptocarya alba* (P).

El área de muestreo fue delimitada por una parcela de 100 x 100 m². Las muestras de suelo se recolectaron en cada sitio en dos estaciones del año, invierno y primavera, durante 3 días. Se escogieron tres individuos de cada especie arbórea y se recolectaron 3 repeticiones de suelo por individuo, obteniendo un total de 144 muestras (2 laderas x 2 estaciones del año x 4 especies arbóreas dominantes x 3 individuos de cada especie arbórea x 3 muestras de suelo por individuo). Los individuos de las especies arbóreas fueron seleccionadas al azar en el área delimitada, tomando en cuenta una altura promedio de 2 m y que la distancia entre individuos fuera de al menos 10 m, con el fin de garantizar independencia entre las muestras (Maherali y Klironomos, 2012).

El muestreo consistió en retirar la hojarasca del suelo, tomar las muestras a través de núcleos cilíndricos de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro, desde una profundidad de entre 1 a 10 cm, los que fueron trasladados al laboratorio, dejándose secar a temperatura ambiente.

Determinación de la Hidrofobicidad. Se determinó si las muestras de suelo presentan carácter hidrófobo o hidrofílico a través del Índice de Repelencia (en adelante Índice R), basado en la metodología propuesta por Tillman *et al.* (1989) con muestras secas al aire, utilizando agua y etanol como líquidos infiltrantes a -1 hPa de tensión, según la Ecuación 1. Se utilizó etanol debido a que infiltra fácilmente el suelo en caso de ser de carácter hidrófobo, debido a las propiedades del contacto sólido – líquido (Hallet y Young, 1999).

$$R = 1.95 * \left(\frac{S_e}{S_w} \right) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

S_e : Sortividad del etanol

S_w : Sortividad del agua destilada

1.95: Constante que explica las diferencias entre los dos líquidos en función de la viscosidad y la tensión superficial (Hallet y Young, 1999).

Para determinar la sortividad (S), tanto en agua como en etanol, se utilizó un dispositivo de infiltración descrito por Leeds-Harrison *et al.* (1994) (Figura 2). El proceso de infiltración se realizó en una pequeña área de la muestra de suelo seco, el que consistió en un capilar de vidrio de 2 mm de diámetro en el que se introdujo una esponja en un extremo, mientras que en el otro extremo se ubicó un recipiente con el líquido a infiltrar ubicado en una balanza (Figura 2) obteniendo como registro la variación de masa cada 15 segundos, lo que, al considerar su densidad, permite calcular el volumen del líquido que ingresó a la muestra de suelo. El detalle de la medición y cálculo de la sortividad se encuentra en Hallet y Young (1999).

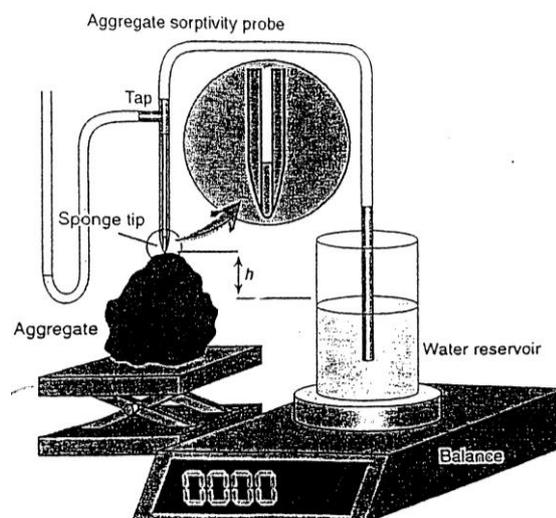


Figura 2. Dispositivo de infiltración para medir sortividad.

A partir de los datos obtenidos, se consideró que el suelo es hidrofóbico si el valor de R es mayor a 1.95 e hidrofílico si el valor de R es menor a 1.95 (Tillman *et al.*, 1989).

Objetivo 2: Analizar el efecto espacio-temporal de la hidrofobicidad en las muestras de suelo provenientes de las condiciones antes mencionadas

En primer lugar, se identificaron variables explicativas correspondientes al estudio, las que destacan la ladera (Malloa o San Vicente), estacionalidad (invierno o primavera) y las especies arbóreas presentes en las laderas (B, C, L, K, P, Q); mientras que la variable respuesta es el valor del Índice R. Cabe destacar que las primeras variables son categóricas y la variable respuesta es de tipo continua, la que posteriormente y, según el valor de repelencia, se categorizó como hidrofóbico o hidrofílico.

Luego, a través de un Modelo Lineal Multivariado, se realizaron transformaciones lineales tomando en cuenta diferentes vectores (variables explicativas) con el fin de determinar cómo interactúan sobre la variable respuesta (Ecuación 2). La importancia de este modelo radica en que se analizan los efectos de las variables explicativas (ladera, estacionalidad y especie) de forma individual y sus posibles combinaciones, identificando cuáles son significativas para el valor del R. El modelo se realizó de dos formas, la primera tomando en cuenta las especies comunes entre las laderas (B y L), y en el otro tomando en cuenta todas las especies arbóreas. El modelo resultante está definido por: PromedioR ~ Ladera * Especie * Temporada.

Matemáticamente, el Modelo Lineal Multivariado se expresa en la siguiente ecuación:

$$T: x \rightarrow f(x),$$

$$f(x) = \alpha + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \dots + \beta_ix_i \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde (Hallet y Young, 1999):

T: Transformación lineal
 x_i : Variable explicativa
 $f(x)$: Variable respuesta
 α : Intercepto en $f(x)$
 β_i : Pendiente de la recta

Posteriormente, para identificar diferencias entre variables individuales se realizó el Test de Kruskal y Test de Wilcoxon en función de la cantidad de tratamientos. Para todos los análisis estadísticos se utilizó el software R versión 4 .0.1 (R Core Team, 2021).

Objetivo 3: Relacionar el efecto de la hidrofobicidad, considerando las especies arbóreas, en muestras de suelo seco y a capacidad de campo

Se utilizó la misma metodología de muestreo que en el Objetivo 1, pero en este caso se tomaron en cuenta las muestras de suelo en estado seco y húmedo a capacidad de campo (-33 kPa), para la evaluación del Índice R.

Se analizó si existe un efecto en las características del suelo en estado húmedo y seco, tomando en cuenta su distribución espacial, las especies y la temporalidad. Para analizar las muestras, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), donde se identificaron las variables de suelo (variables contextuales) y luego se realizó la combinación de los datos para conocer las correlaciones entre las variables de suelo según los criterios antes mencionados.

El objetivo del Análisis de Componentes Principales (ACP) es identificar qué variables contextuales determinan mayor variabilidad en las muestras de suelo en un espacio bivariado, donde ambos ejes son combinaciones lineales de diferentes variables. En este caso, los ejes corresponden a las variables mencionadas anteriormente, y las variables que caracterizan las muestras de suelo son ladera, estacionalidad y especies. Para efecto de simplificar las variables contextuales en los gráficos de este estudio, en el Cuadro 2 se presenta la abreviación con la respectiva variable contextual, en cuyo caso se dispuso del resultado como insumo para el cumplimiento del objetivo 3.

Cuadro 2. Variable de suelo y su abreviación correspondiente.

Variable contextual	Abreviación
Arena	a
Limo	L
Arcilla	A
Densidad real	dr
Densidad aparente	da
Retención de agua:	
-0,2 kPa	-0,2 kPa
-6 kPa	-6 kPa
-33 kPa (Capacidad de Campo)	CC
-1500 kPa (Punto de Marchitez Permanente)	PMP
Porosidad total	PT
Porosidad de drenaje rápido	PDR
Porosidad de drenaje lento	PDL
Humedad aprovechable (CC-PMP)	Ha
Relación de dispersión	RD

Todos los métodos están descritos por Sandoval *et al.* (2011), con excepción del método de la relación de dispersión, cuyo detalle se encuentra en Seguel *et al.* (2003).

RESULTADOS

Objetivo 1: Determinar la hidrofobicidad de los suelos según especies arbóreas en remanentes del bosque esclerófilo de dos laderas opuestas en invierno y primavera

Se estimó el Índice R como método para determinar el carácter hidrofóbico o hidrofílico a partir de la sortividad en agua y en etanol. El detalle de cada individuo se encuentra en el Apéndice 1.

En el Cuadro 3 se encuentran agrupados los resultados de R a nivel de estacionalidad (I o P), ladera (M o SV) y especie arbórea (B, C, K, L, P o Q), mostrando en cada fila el promedio del valor de R de las 9 muestras de suelo según los criterios descritos anteriormente.

Cuadro 3. Índice R en función de la ladera, estacionalidad y especies arbóreas.

Ladera	Estacionalidad	Especie arbórea	Valor de R	Categoría
M	I	B	3,51 ± 0,88	HFB
M	I	C	2,66 ± 1,20	HFB
M	I	K	3,38 ± 1,06	HFB
M	I	L	2,10 ± 0,54	HFB
SV	I	B	4,03 ± 1,98	HFB
SV	I	L	4,25 ± 0,64	HFB
SV	I	P	4,95 ± 0,74	HFB
SV	I	Q	5,18 ± 1,55	HFB
M	P	B	1,76 ± 0,92	HFL
M	P	C	1,96 ± 0,17	HFB
M	P	K	1,69 ± 0,43	HFL
M	P	L	2,24 ± 0,86	HFB
SV	P	B	1,48 ± 0,65	HFL
SV	P	L	1,21 ± 0,10	HFL
SV	P	P	1,94 ± 1,07	HFL
SV	P	Q	1,16 ± 0,09	HFL

I: Invierno, P: Primavera, SV: San Vicente, M: Malloa, Q: *Quillaja saponaria*, B: *Peumus boldus*, L: *Lithraea caustica*, P: *Cryptocarya alba*, K: *Kageneckia oblonga*, C: *Escallonia pulverulenta*. HFB: Hidrofóbico, HFL: Hidrofílico.

Como se aprecia en el Cuadro 3, diez de los dieciséis valores de R son hidrofóbicos, es decir, los suelos presentan repelencia hídrica por su valor de R mayor a 1,95, destacándose mayoritariamente SV en invierno, con valores mayores a 4,0. Los seis promedios restantes corresponden a valores hidrofílicos, donde cuatro de ellos se encuentran en SV (Q, L, P y B) y dos en M (B y K), todas presentes en primavera. Lo anterior se interpreta por sus valores menor a 1,95 y por su menor resistencia a infiltrar,

demonstrando el sitio SV una alta estacionalidad (variación de R en invierno y primavera).

La Figura 3 presenta los valores de invierno y primavera según laderas y especies arbóreas, donde el promedio de invierno es hidrofóbico ($3.76 \pm 1,07$) y el de primavera es hidrofílico ($1.68 \pm 0,54$).

Los valores más hidrofóbicos se ubicaron en la ladera de SV, destacando *Quillaja saponaria* (Q), *Lithraea caustica* (L), *Cryptocarya alba* (P) y *Peumus Boldus* (B). Por otra parte, la menor variación invierno primavera fueron presentadas por *Lithraea caustica* (L) con 0,14, *Escallonia pulverulenta* (C) con 0,70; *Kageneckia oblonga* (K) con 1,69 y *Peumus Boldus* (B) con 1,75, todos ubicados en la ladera de Malloa. Es necesario destacar que *Lithraea caustica* (L) fue la única especie que presentó un valor de R mayor en primavera que en invierno en la ladera de Malloa, con una diferencia de 0,14.

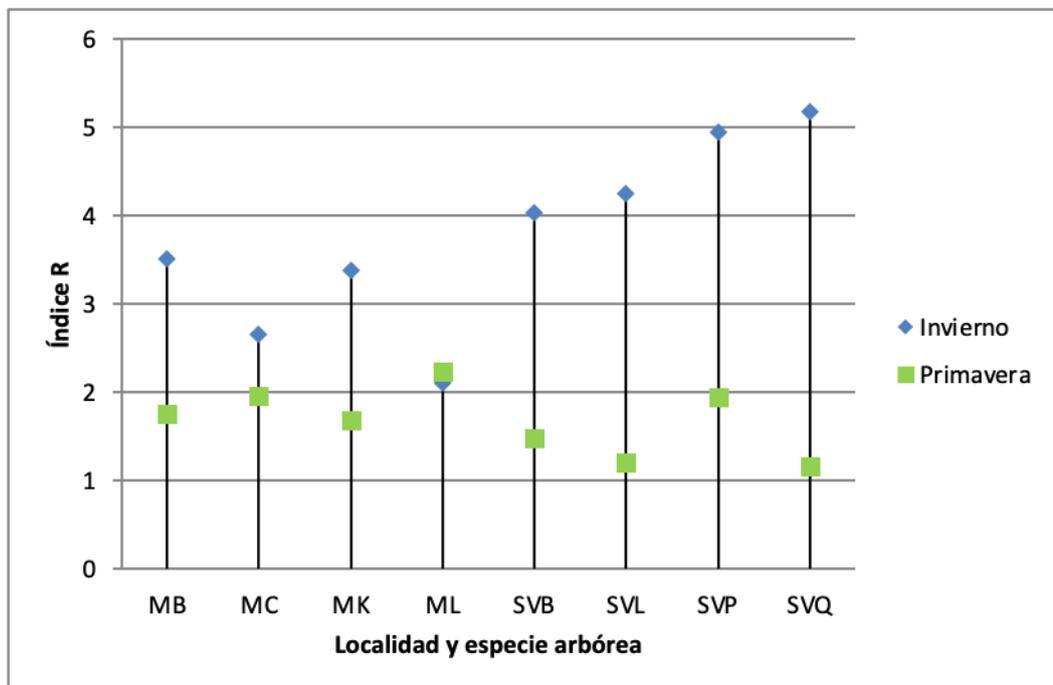


Figura 3. Índice R en función de la orientación (M y SV), estacionalidad y especies arbóreas.

Es importante destacar que las mayores diferencias entre invierno y primavera se presentan en SV, donde la especie *Quillaja saponaria* (Q) presenta los valores extremos del Índice R, con una variación de 4,02, con el valor hidrofóbico de 5,18 en invierno e hidrofílico de 1,16 en primavera. Por otra parte, se comportan de manera similar *Lithraea caustica* (L) con valores hidrofóbicos de 4,25 en invierno e hidrofílico de 1,21 en primavera, *Cryptocarya alba* (P), con 4,95 en invierno y 1,94 en primavera y *Peumus boldus* (B), con valores de 4,03 en invierno y 1,48 en primavera.

Objetivo 2: Analizar el efecto espacio-temporal de la hidrofobicidad en las muestras de suelo provenientes de las condiciones antes mencionadas

Los resultados de este objetivo se estructuran en cuatro subtemas, las cuales son: Análisis considerando todas las variables explicativas, análisis temporal (I y P), análisis espacial (SV y M) y análisis de especies arbóreas (B, C, K, L, P y Q).

Análisis considerando todas las variables explicativas

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del Modelo Lineal Multivariado, tomando en cuenta sólo las especies comunes (B y L), en el cual se identifica que existe efecto en la variable temporada, donde en primavera se encontró un valor menor del Índice R que en invierno.

Cuadro 4. Modelo Lineal, considerando especies arbóreas comunes (*Lithraea caustica* (L) y *Peumus boldus* (B)).

Modelo : PromedioR ~ Ladera * Especie * Temporada r2= 0.5205 p=0.005672				
Variable	E	SE	T	P
Origen	35.100	0.5550	6.325	1.01e-05
Ladera SV	0.5167	0.7848	0.658	0.5197
Especie L	-14.133	0.7848	-1.801	0.0906
Temporada P	-17.467	0.7848	-2.226	0.0408
Ladera SV: Especie L	16.333	11.099	1.472	0.1605
Ladera SV: Temporada P	-0.8033	11.099	-0.724	0.4796
Especie L: Temporada P	18.900	11.099	1.703	0.1079
Ladera SV: Especie L: Temporada P	-23.767	15.696	-1.514	0.1495

L: *Lithraea caustica*, P: Primavera, SV: San Vicente, E: Coeficiente estimado, SE: Error estándar, T: valor de t, P: valor de p.

A través de este análisis, se identificó la variable temporada como la única variable explicativa que presenta efecto sobre los valores del Índice R ($p=0.0408$). La variable primavera ($R=1,68 \pm 0,54$) presenta dirección negativa (-17.467) respecto a la variable invierno ($R=3,76 \pm 1,07$), es decir, primavera presenta un valor menor de naturaleza hidrofílica en comparación a invierno, que presentó un valor de R hidrofóbico.

A continuación, el Cuadro 5 muestra los resultados del Modelo Lineal Multivariado con todas las especies presentes en las dos laderas.

Cuadro 5. Modelo Lineal, considerando todas las especies arbóreas.

Modelo: PromedioR ~ Ladera * Especie * Temporada			r ² =0.6093	p=1.334e-05
Variable	E	SE	T	P
Origen	351000	0,54470	6444	3,02e-07
Ladera SV	0,51667	0,77033	0,671	0,5072
Especie C	-0,85000	0,77033	-1103	0,2781
Especie K	-0,13000	0,77033	-0,169	0,8670
Especie L	-141333	0,77033	-1835	0,0759
Especie P	0,92667	0,77033	1,203	0,2378
Especie Q	115,667	0,77033	1,502	0,1430
Temporada P	-174,667	0,77033	-2,267	0,0303
Ladera SV: Especie L	163,333	108,941	1,499	0,1436
Ladera SV: Temporada P	-0,80333	108,941	-0,737	0,4662
Especie C: Temporada P	105,000	108,941	0,964	0,3424
Especie K: Temporada P	0,05333	108,941	0,049	0,9613
Especie L: Temporada P	189,000	108,941	1,735	0,0924
Especie P: Temporada P	-0,46667	108,941	-0,428	0,6713
Especie Q: Temporada P	-147,000	108,941	-1,349	0,1867
Ladera SV: Especie L: Temporada P	-237,667	154,065	-1,543	0,1328

P: Primavera, SV: San Vicente, C: *Escallonia pulverulenta*, K: *Kageneckia oblonga*, L: *Lithraea caustica*, P: *Cryptocarya alba*, Q: *Quillaja saponaria*, E: Coeficiente estimado, SE: Error estándar, T: valor de t, P: valor de p.

Tal como se observa en el cuadro anterior, la única variable que presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) es la temporalidad, esta vez con un valor de $p = 0,0303$, confirmando que la formación vegetacional (bosque esclerófilo) agrupa especies de características similares, no generando diferencias entre especies arbóreas. Por otra parte, el factor ladera (exposición norte en Malloa y exposición sur en San Vicente), tampoco presentó significancia.

Análisis espacial

El análisis espacial corresponde a la amplitud de los valores del R según las laderas, SV y M, considerando las especies arbóreas comunes en ambas laderas y todas las especies arbóreas (Figura 4).

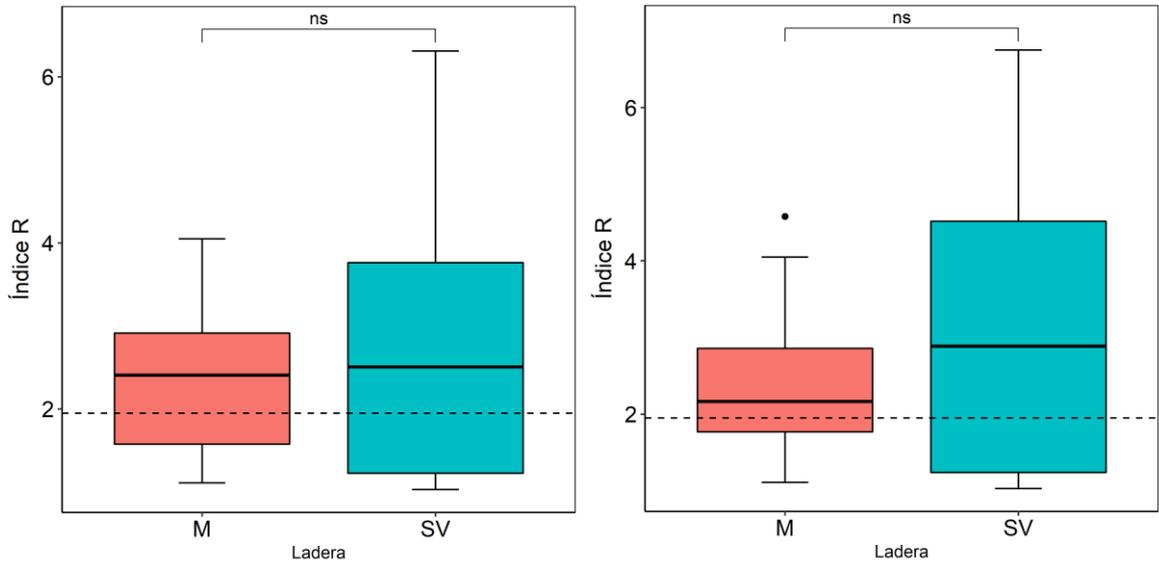


Figura 4. Índice R en función de la interacción entre las laderas, considerando las especies arbóreas comunes (izquierda) y considerando todas las especies arbóreas (derecha). M: Malloa, SV: San Vicente.

En la Figura 4 (izquierda) se observa que las especies *Lithraea caustica* (L) y *Peumus boldus* (B) presentan un comportamiento similar en ambas laderas, lo que estadísticamente se denota en la ausencia de diferencias significativas en el Índice R (test de Wilcoxon, $p=0.5786$). Sumado a lo anterior, se evidencia que si bien ambas laderas presentan una mediana similar, San Vicente presenta una mayor variabilidad. Por otra parte, en la Figura 4 (derecha) se consideran todas las especies, destacando que la mediana y la amplitud del sitio de Malloa disminuyen, en tanto, en San Vicente aumentan ambas.

Análisis temporal

En este caso, el análisis temporal muestra las diferencias del Índice R en invierno y primavera, tomando en cuenta las especies arbóreas comunes en ambas laderas y todas las especies arbóreas (Figura 5).

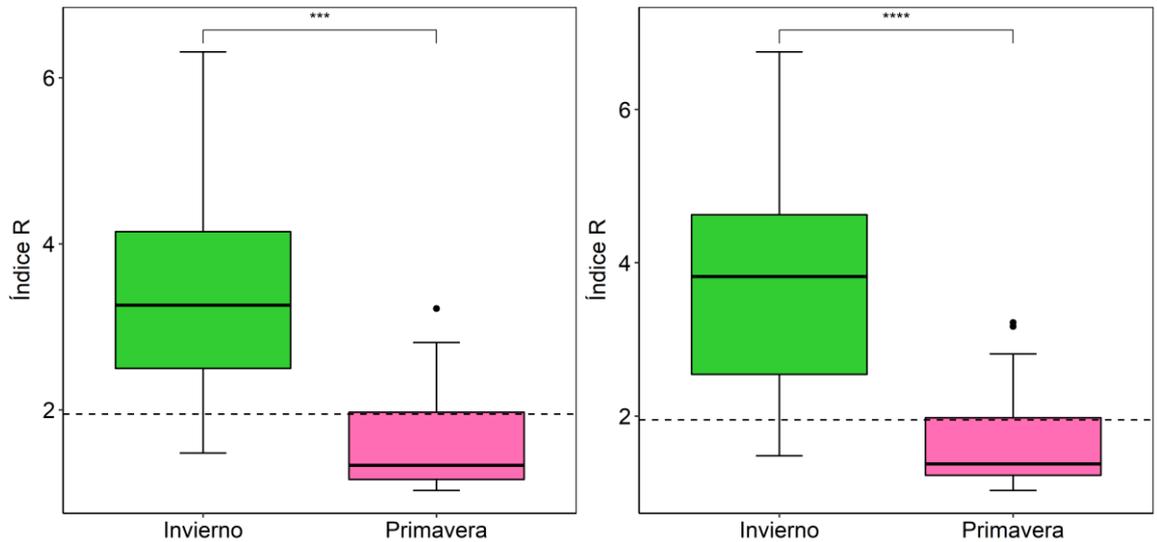


Figura 5. Índice R en función de la interacción entre las temporadas, considerando las especies arbóreas comunes (izquierda) y considerando todas las especies arbóreas (derecha). I: Invierno, P: Primavera.

A partir de la Figura 5 se observa que los valores hidrófobos ($R > 1,95$) corresponden a muestras de suelo que fueron extraídas en invierno, mientras que los que presentan carácter hidrofílico son de primavera.

En la Figura 5 (izquierda), con el análisis con especies arbóreas comunes, se muestra que la mediana de invierno es hidrófoba y la amplitud de valores de repelencia es más amplia que en la medición de primavera, la cual presenta una mediana hidrofílica, con un rango del Índice R cercano al límite inferior. Por otra parte, al considerar todas las especies (Figura 5, derecha) se mantiene la misma tendencia, aunque aumenta la media de repelencia para la medición de invierno. Para efectos de temporalidad, las mediciones de invierno (hidrofóbicas) son significativamente mayores a las de primavera (hidrofílicas).

Análisis de especies arbóreas

Si bien la variable temporada influye en el estudio, su interacción con la variable especies arbóreas no es significativa, sin embargo, es importante destacar el comportamiento arbóreo del remanente de las laderas de Malloa y San Vicente (Figura 6).

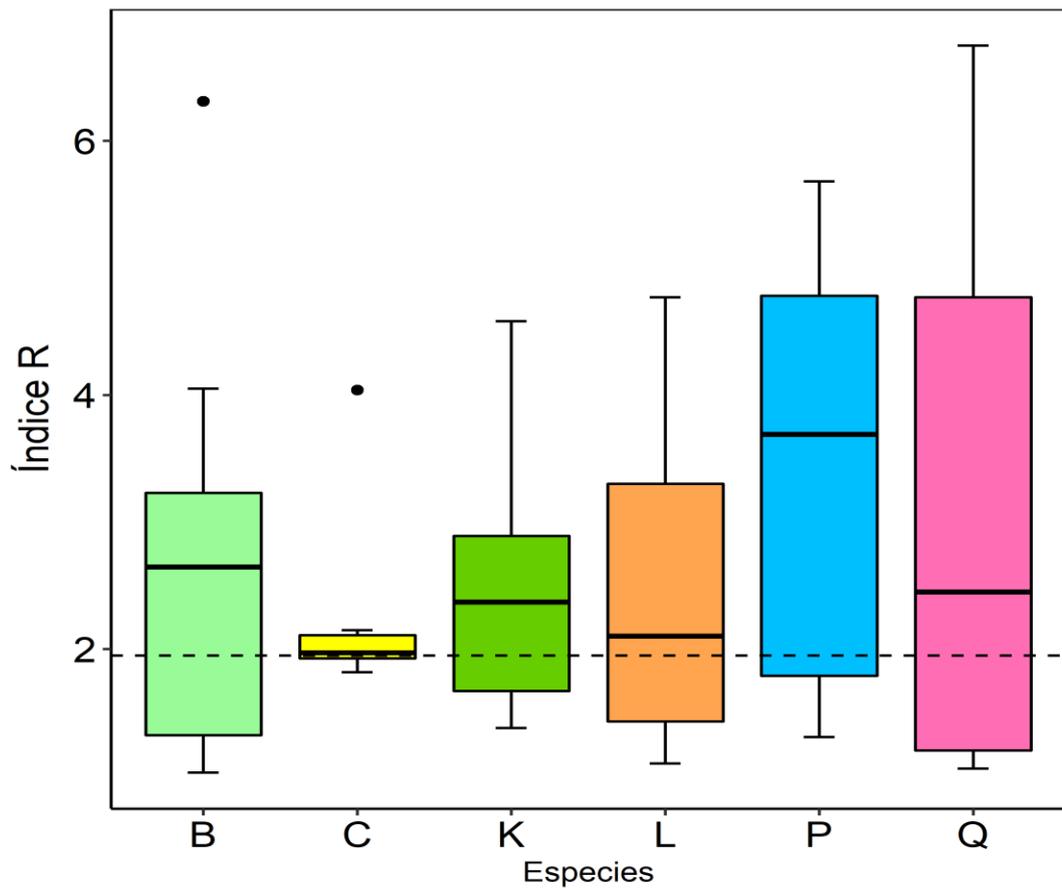


Figura 6. Índice R en función de las especies arbóreas. B: *Peumus boldus*, C: *Escallonia pulverulenta*, K: *Kageneckia oblonga*, L: *Lithraea caustica*, P: *Cryptocarya alba*, Q: *Quillaja saponaria*.

Es necesario mencionar que todas las especies comparten un rango común del Índice R, donde *Escallonia pulverulenta* (C), destaca por su estrecha variabilidad en el Índice R, al contrario de *Quillaja saponaria* (Q) que presenta los valores más extremos.

Respecto a las medianas, *Cryptocarya alba* (P) presenta el valor más alto del Índice R, es decir, es más hidrófobo. Por otra parte, *Peumus boldus* (B), *Kageneckia oblonga* (K) y *Quillaja saponaria* (Q) se comportan de manera similar, mientras que *Escallonia pulverulenta* (C) y *Lithraea caustica* (L) presentan las medias más bajas, aunque siguen siendo hidrófobas.

A pesar que todas las medianas son hidrófobas, es importante recalcar que todas las especies arbóreas presentaron al menos un valor de las muestras de suelo de carácter hidrofílico. Por ejemplo, *Lithraea caustica* (L), si bien muestra un rango amplio de valores de R, presenta valores mínimos del Índice R (1,21).

Objetivo 3: Relacionar el efecto de la hidrofobicidad, considerando las especies arbóreas, en muestras de suelo seco y equivalente a capacidad de campo

Los resultados de este objetivo se estructuran en cuatro subtemas, las cuales son: Variables de suelo, Análisis de Componentes Principales según ladera, Análisis de Componentes Principales según temporalidad y Análisis de Componentes Principales según especies arbóreas.

Variables de suelo

En base a las variables contextuales (variables de suelo) detalladas en la metodología (Cuadro 2), se presenta el Análisis de Componentes Principales (ACP), el que logra explicar un 53,5% de la varianza de los datos, tal como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9, separadas según factor (ladera, temporalidad y especies arbóreas). El resultado indica una baja relación entre variables, aunque se pueden destacar algunas asociaciones.

A partir de las variables analizadas, se destaca que las variables más relevantes para el componente principal 1 son la densidad real, capacidad de campo, poros de drenaje lento (PDL) y retención de agua a -6 kPa, mientras que porosidad total, arcilla y densidad aparente (da) son las que tienen más influencia en el componente principal 2. Propiedades como el punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (Ha) y las partículas del suelo (a, I y A) se distribuyen en ambos componentes principales.

Análisis de Componentes Principales según ladera

En la Figura 7 se presenta el mapa de variables del Análisis de Componentes Principales (ACP) a partir de la distribución de las muestras de suelo provenientes de distintas laderas.

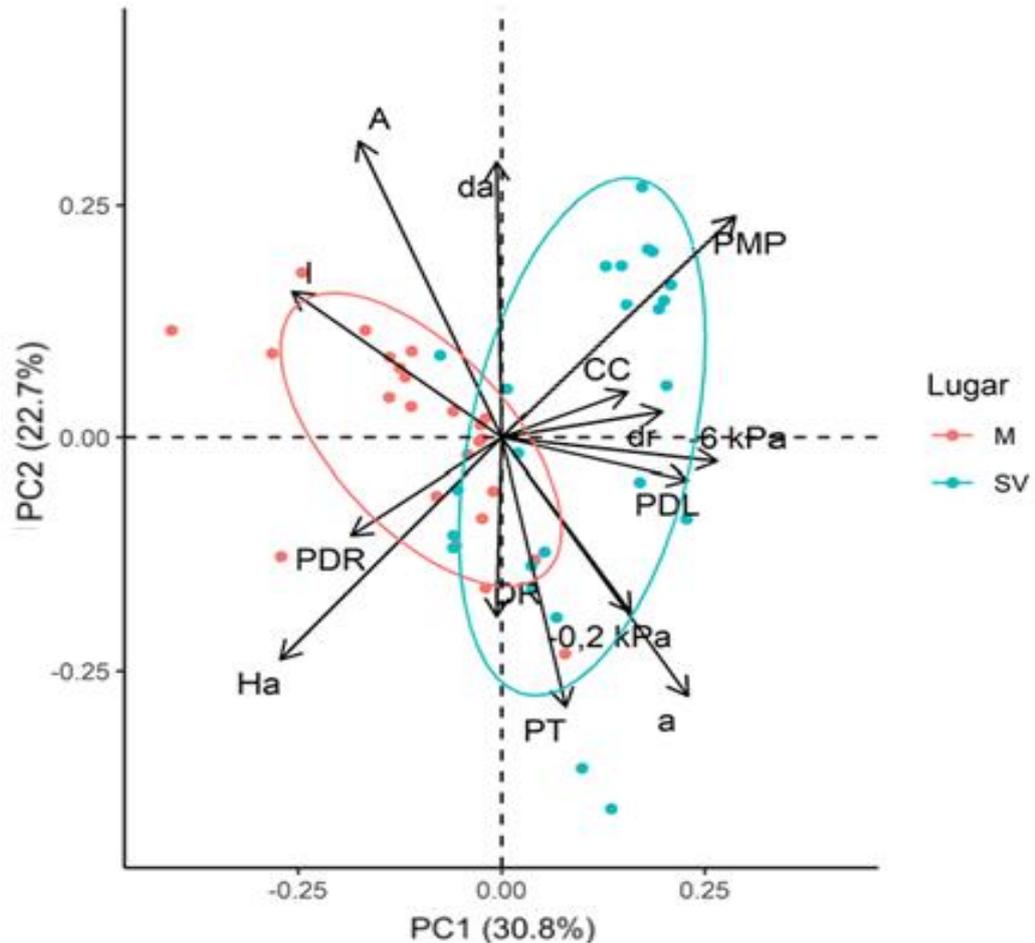


Figura 7. Distribución de las muestras de suelo de Malloa (M) y San Vicente (SV), a partir del mapa de variables contextuales del Análisis de Componentes Principales.

Se observa en el componente principal 1 que las muestras se distribuyen hacia los dos lados del plano cartesiano, en el cual se presenta una zona en común en el centro de las coordenadas, mientras que en el componente principal 2 no se genera una diferenciación entre sitios.

Las muestras de suelo de Malloa poseen mayor proporción de porosidad de drenaje rápido (PDR), humedad aprovechable (Ha) y contenido de limo (l), mientras que el suelo de San Vicente se relaciona con una alta retención de agua a -6 kPa, lo que determina la dominancia de poros de drenaje lento (PDL), además de un elevado contenido de agua en punto de marchitez permanente (PMP).

Análisis de Componentes Principales según temporalidad

A partir de la Figura 8, se generó el mapa de variables del Análisis de Componentes Principales (ACP) para visualizar la distribución de las muestras de suelo de invierno y primavera.

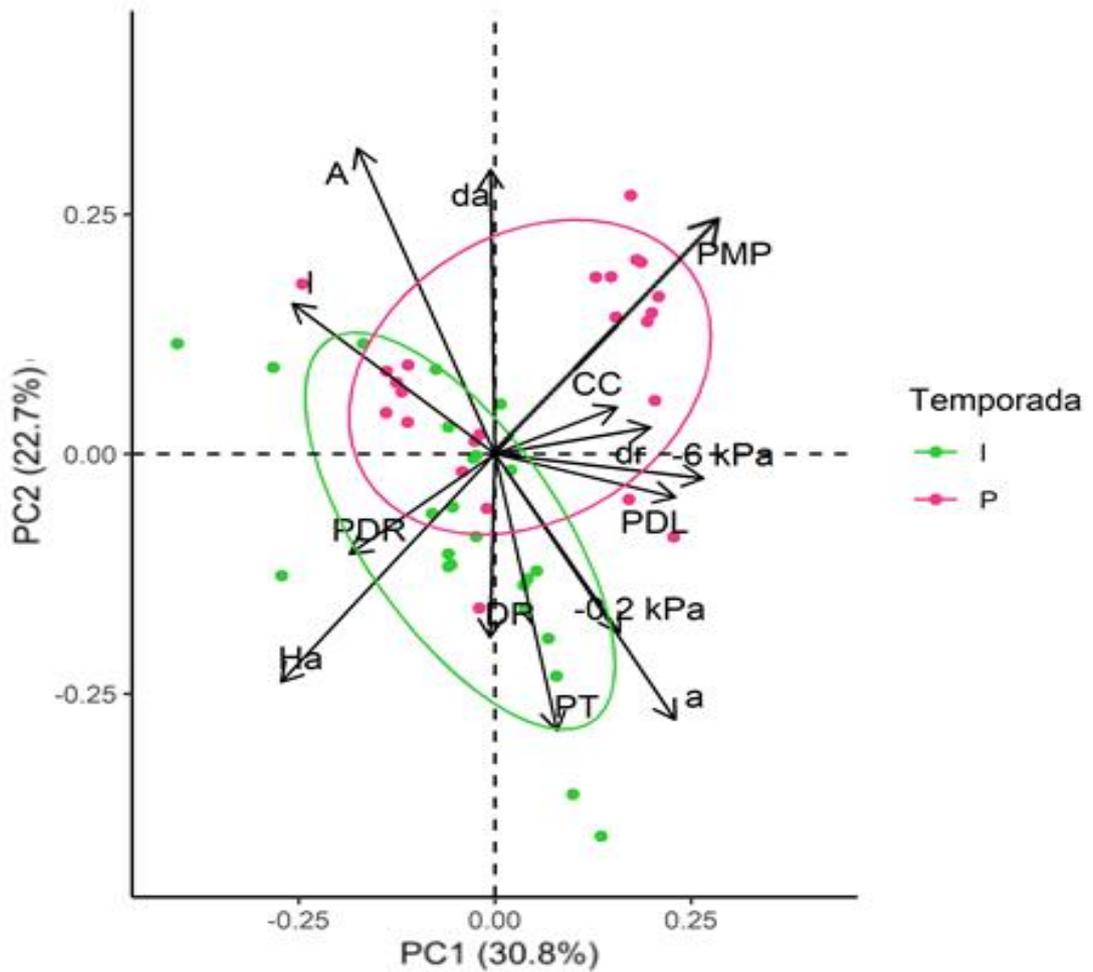


Figura 8. Distribución de las muestras de suelo de invierno (I) y primavera (P), a partir del mapa de variables contextuales del Análisis de Componentes Principales.

Tomando en cuenta las zonas no compartidas por ambas épocas, existe más proporción de muestras en primavera que en invierno relacionadas, por ejemplo, con la densidad aparente, el contenido de arcilla (A) y el punto de marchitez permanente (PMP), en cambio, la medición de invierno se asocia con la porosidad total (PT), el agua aprovechable y el contenido de arena (a). La temporalidad es la variable que afecta el estado de desecamiento respecto a la hidrofobicidad de las muestras, que en el caso de las mediciones de invierno fue el momento en que se manifestó una hidrofobia excesiva.

Análisis de Componentes Principales según especies arbóreas

En la Figura 9 se presenta el Análisis de Componentes Principales tomando en cuenta las especies arbóreas presentes en ambas laderas.

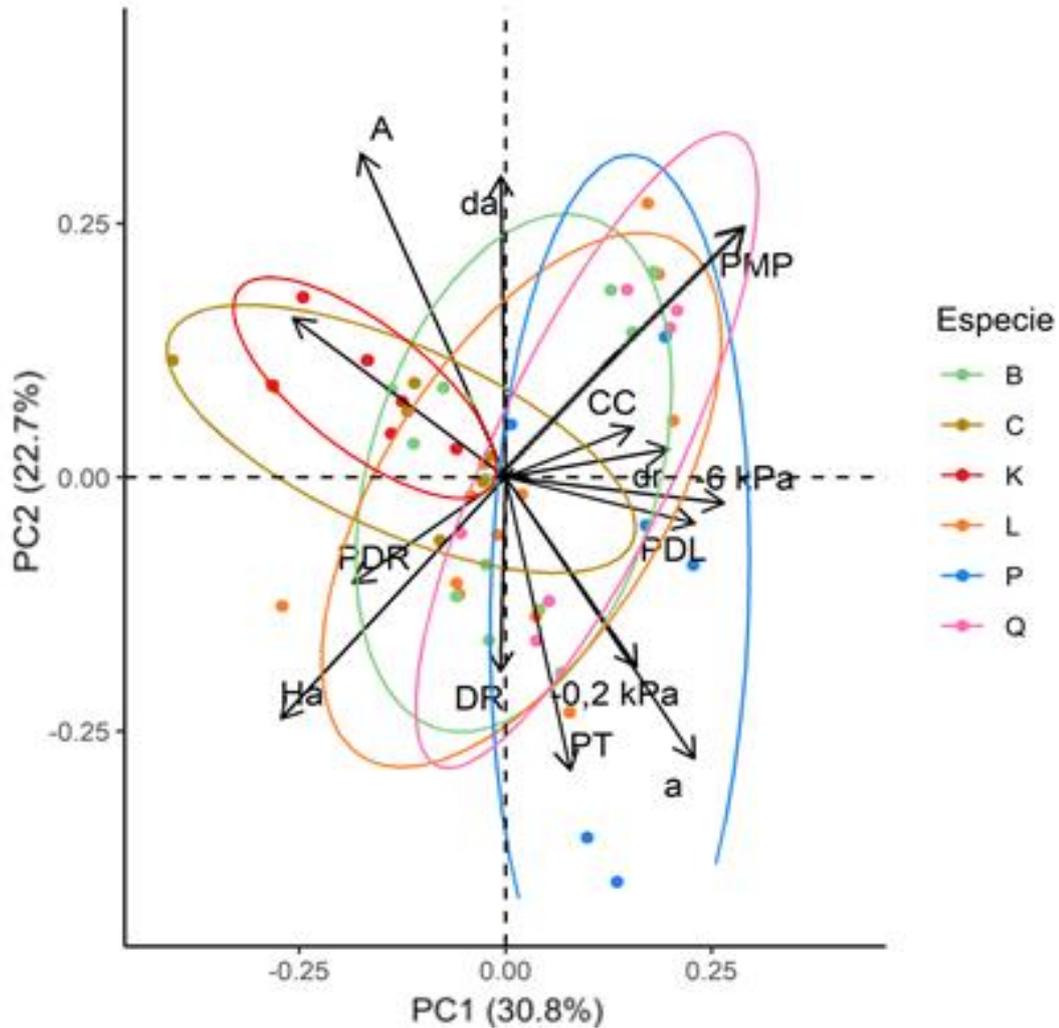


Figura 9. Distribución de las muestras de suelo de las especies arbóreas, a partir del mapa de variables contextuales del Análisis de Componentes Principales.

A partir de la Figura 9, se observa una clara segregación en el componente principal 1 de *Kageneckia oblonga* (K) y *Escallonia pulverulenta* (C), las que se diferencian de *Peumus boldus* (B), *Lithraea caustica* (L), *Cryptocarya alba* (P) y *Quillaja saponaria* (Q). *Lithraea caustica* (L) y *Cryptocarya alba* (P) son las especies que menos se alejan del centro de las coordenadas, no asociándose a ninguna variable en particular; por su parte, *Kageneckia oblonga* (K) es la menos segregada, y se ubican mayoritariamente en el cuadrante superior izquierdo del plano cartesiano. También es necesario destacar que *Peumus boldus* (B) comparte asociaciones con todas las especies y en el componente principal 2 no existe una diferenciación de especies, presentando *Cryptocarya alba* (P) la mayor dispersión.

Se presentan dos comportamientos similares. Por un lado, todas las muestras de *Kageneckia oblonga* (K) están contenidas en el espacio abarcado por *Escallonia pulverulenta* (C), las que se asocian a la porosidad de drenaje rápido (PDR), humedad aprovechable (Ha) y limo (l), mientras que el resto de las especies abarcan un espectro más amplio del plano cartesiano, asociándose a los poros de drenaje lento (PDL), retención de agua a -6 kPa y punto de marchitez permanente (PMP).

DISCUSIÓN

La hidrofobicidad corresponde a la repelencia del agua, por lo que el hecho de que en invierno se obtuvieron suelos más hidrofóbicos que en primavera, podría deberse a condiciones climáticas de mayor humedad y/o de menor temperatura, mientras que cuando la humedad relativa baja y hay altas temperaturas, se generan condiciones de sequedad y necesidad de agua para el recurso suelo y la vegetación, manifestándose en una alta sortividad de los suelos (Bodí *et al.*, 2012). La hidrofobicidad es considerado un fenómeno cada vez más común en el área científica (Doerr *et al.*, 2000), ya que en primera instancia se identificó en áreas semiáridas y mediterráneas como California y Australia, y posteriormente se realizaron estudios de suelo en Suecia, norte de EEUU, Portugal, Reino Unido y Holanda, concluyendo que se presenta en varios climas y tipos de vegetación en todo el mundo (Bodí *et al.*, 2012) Se ha demostrado que la conjugación de factores como el tipo de suelo, clima y tipo de vegetación resultan en procesos de hidrofobia en todo el mundo (DeBano, 2000; Doerr *et al.*, 2000; Jaramillo *et al.*, 2000).

En el presente estudio y, en concordancia con otros estudios realizados en climas mediterráneos (Keizer *et al.*, 2007), la repelencia del agua es mayor en invierno porque se intensifica durante la estación estival previa y va desapareciendo en primavera, disminuyendo a su vez el Índice R para todas las especies y laderas del presente estudio, excepto en el caso del Litre presente en Malloa, donde presenta una hidrofobicidad mayor en primavera que en invierno.

Otro punto importante a mencionar es que existen variables que se asocian a una misma temporada y a una misma ladera, por ejemplo, invierno presenta distribución similar a Malloa, y primavera a San Vicente. Lo anterior puede deberse a la exposición que presentan cada una de las laderas, ya que Malloa presenta exposición nororiente, siendo más seca respecto a San Vicente. Por otra parte, se destaca una relación directa entre los valores del Índice R y la altura promedio de las especies en los boques mediterráneos (Garrabaleón-Galeote *et al.*, 2013). Es así como el Quillay y el Peumo son las especies más altas (hasta 10 metros) y a su vez presentan los valores más altos del Índice R; seguido del Boldo (6 metros), el Litre (L) y el Bollén (K), los que alcanzan una altura aproximada de 4 metros (Hoffmann, 2012). La excepción ocurre con el Corontillo (C), el que posee el menor valor hidrófobo y según bibliografía alcanza alturas de hasta 10 metros.

En cuanto a cómo varía temporalmente la hidrofobicidad, el Quillay es la especie que presenta la mayor amplitud en los valores del Índice R, es decir, es el más hidrofóbico e hidrofílico en SV. Esto puede deberse que al ser hidrófobo en invierno, el suelo presenta una capa repelente al agua, por lo que existe mayor escorrentía y menor infiltración. En cambio, en primavera es hidrofílica y el suelo absorbe más rápido el agua a través del mismo proceso (Jordán *et al.*, 2008). Dado lo anterior, el Quillay podría considerarse un indicador “biológico”, ya que presenta una gran distribución entre el río Limarí en la Región de Coquimbo hasta Collipulli en la Región de la Araucanía (INFOR *et al.*,

2000). Sumado a lo anterior, varios autores han recomendado agregar la hidrofobicidad como un indicador en los análisis de calidad física de los suelos por su fácil determinación y porque tiene gran relación con otras propiedades del suelo. Por ejemplo, la hidrofobicidad reduce la capacidad de infiltración y afecta en la geomorfología e hidrología de las cuencas, impactando instantáneamente en la supervivencia y crecimiento de las plantas (Jordán *et al.*, 2010; Gabarrón-Galeote *et al.*, 2013; Seitz *et al.*, 2015).

Cabe destacar que todas las especies presentes en los remanentes del bosque esclerófilo de este estudio son de tipo perenne, las que según autores como Jordán *et al.* (2013) se asocian a la hidrofobicidad la que se ha encontrado en condiciones de clima semi-desértico (DeBano, 2000), matorral mediterráneo (Jordán *et al.*, 2008; Jordán *et al.*, 2010) y áreas templadas (Mallik y Rahman, 1985). Además, los suelos con vegetación herbácea también pueden resistir la infiltración por efecto de la hidrofobicidad, lo que se ha observado en presencia de especies herbáceas características de ecosistemas dunares (Moral *et al.*, 2002; Moral García *et al.*, 2005; Doerr *et al.*, 2005).

Si bien no se conoce con exactitud las sustancias capaces de producir la hidrofobicidad en los suelos (Doerr y Shakesby, 2009), se tiene noción que estas son abundantes en los ecosistemas y se liberan a través de los microorganismos (Hallett y Young, 1999; Schaumann *et al.*, 2007), los restos orgánicos en descomposición (McGhie y Posner, 1981), la fauna presente en el suelo y los exudados de las raíces (Dekker y Ritsema, 1996; Doerr *et al.*, 2000). Además, se ha determinado que estas sustancias son de carácter anfifílico, es decir, presentan una zona hidrofóbica y una zona hidrofílica, donde la repelencia ocurre en determinados tipos de interacciones moleculares en una superficie sólida en las zonas polares, relacionadas a las cargas del suelo, dejando expuesto el lado apolar hacia el medio poroso (Doerr *et al.*, 2000; Graber *et al.*, 2009). En general, los grupos ésteres, carboxílicos y fenólicos de la materia orgánica manifiestan procesos de condensación, la cual afecta la humectabilidad de los suelos (Diehl, 2013).

La infiltración ocurre mayoritariamente en zonas donde actúan las fuerzas de capilaridad (Gabarrón-Galeote *et al.*, 2013). En el caso de disminuir la tasa de infiltración del agua en la superficie del suelo, aumenta más rápido la escorrentía, aumentando también el flujo superficial, dando como consecuencia el aumento de la erosión, y las vías de flujo preferencial (Fuentes *et al.*, 2015). Por otra parte, la hidrofobicidad aumenta la estabilidad estructural (Blanco-Canqui y Lal, 2009) y la captación de carbono (Urbanek *et al.*, 2007; Jordán *et al.*, 2010)

El aporte temporal de agua al suelo se relaciona con el crecimiento y desarrollo de microorganismos y hongos presentes en el suelo, donde los Basidiomicetes aportan en el proceso de descomposición de la hojarasca (Hartge y Horn, 2016; Jordán *et al.*, 2010). Por otra parte, el estudio elaborado por Silva-Flores *et al.* (2019), identificaron a las esporas como un vector asociado a la hidrofobicidad, donde la densidad de esporas bajo dosel de los individuos de Litre (L) fue significativamente mayor a las otras especies arbóreas dominantes de los remanentes. Para el mismo estudio, en invierno se encontró la menor densidad de esporas, mientras que la mayor densidad se encontró en las temporadas de crecimiento de la planta (primavera-verano-otoño), en ambas laderas

y con el mismo comportamiento (Silva-Flores *et al.*, 2019). A pesar de que existen estudios sobre la relación suelo-hongo-hidrofobicidad, Feeney *et al.* (2006) siguen proponiendo que se realicen investigaciones para analizar el efecto que causan los microorganismos en la respuesta hidrofóbica del suelo (Jordán *et al.*, 2013).

Un aspecto importante a considerar es la alta probabilidad de que ocurran incendios en la zona central del país, desencadenando procesos de hidrofobicidad en el suelo. Se tiene registro que entre los años 1985 y 2016 han ocurrido 1.476 incendios mayores a 200 ha, lo que equivale a 1.243.407 ha de vegetación quemada (Vidal *et al.*, 2017). Diversos autores (Witter *et al.*, 1991; Dekker y Ritsema, 1996; Moral *et al.*, 2002; Moral García *et al.*, 2005; García-Chevesich *et al.*, 2019) plantean que el fuego puede ser un fenómeno que puede inducir la hidrofobicidad, sin embargo, también se ha observado repelencia de forma natural. Por otra parte, plantean que post la intervención del fuego a temperaturas mayores a 270°, se podría destruir o debilitar la repelencia en el suelo, mientras que otros autores han comprobado que el agua puede ser captada por el suelo posterior a la intervención a altas temperaturas (DeBano 2000; Doerr *et al.*, 2005). Además, se han realizado estudios en el cual se observó que se puede inducir la hidrofobicidad en superficies donde no se evidenciaba en un inicio, como también se identificó variación en la repelencia en suelos donde sí se conocía la existencia de la repelencia en el agua, relacionando estos cambios a la cantidad de combustible, la temperatura de la combustión, la humedad del suelo que existía antes del fuego y el tipo de suelo (Doerr *et al.*, 2000, Jordán *et al.*, 2010).

Este estudio abre una arista de investigación de suma relevancia, ya que es fundamental conocer más en profundidad la interacción suelo agua en la zona central de Chile, ya que según CIREN (2010) la VI Región presenta el 60% de la superficie amenazada y un 20% de su superficie está categorizada como vulnerable. Lo anterior declara que es una de las zonas más críticas relacionadas a la crisis climática, donde es necesario conocer y gestionar la eficiencia hídrica para la conservación de las especies y formaciones remanentes que existen actualmente.

CONCLUSIONES

Se determinó la hidrofobicidad en suelos de especies dominantes de remanentes del bosque esclerófilo, donde presentaron repelencia al agua en temporada de invierno, independiente de la exposición (M o SV); sin embargo, en Malloa, el Litre (L) y el Corontillo (C) siguieron siendo hidrofóbicos en primavera. Además, en la relación con las propiedades de suelo, el Corontillo (C) y el Bollén (K) se discriminan de las otras especies, asociándose a sitios con mayor contenido de partículas finas y agua aprovechable.

Se determinó que el factor temporalidad fue el único que presentó significancia. Al analizar la interacción entre las laderas (M y SV), temporalidad (I y P) y las especies arbóreas (B, C, K, L, P y Q), se concluye que los remanentes de bosques esclerófilo poseen carácter hidrofóbico en invierno y carácter hidrofílico en primavera, implicando que los suelos requieren agua en la época estival, específicamente en la temporada donde hay menor cantidad disponible, evidenciando la necesidad de planificar de manera integral la gestión del recurso hídrico, incluyendo esta variable dentro de los servicios ecosistémicos en la planificación territorial, a fin de conservar estos remanentes y que no se transformen en relictos.

Finalmente, se puede considerar para investigaciones futuras la toma de muestras en las cuatro estaciones del año, para conocer de una manera más integral el comportamiento de la hidrofobicidad en las muestras de suelo de los remanentes del bosque esclerófilo.

BIBLIOGRAFÍA

- Beatty, S. and Smith, J. (2013). Dynamic soil water repellency and infiltration in post-wildfire soils. *Geoderma*, 192: 160–172.
- Bedini, S., Pellegrino, E., Avio, L., Pellegrini, S., Bazzofi, P., Argese, E. and Giovannetti, M. (2009). Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology & Biochemistry*, 30:1-6.
- Blanco-Canqui, H. and Lal, R. (2009). Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149:171-180.
- Bodí M., Muñoz-Santa I., Armero C., Doerr, S., Mataix-Solera M. and Cerdà, A. (2012). Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena*, 108:14–25.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (1996). Descripción de suelos y materiales y símbolos, Estudio agroecológico Región Metropolitana, 425.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. *Centro de Información de los Recursos Naturales*, 139.
- DeBano L. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*, 231: 4–32.
- Dekker, L. and Ritsema, C. (1996). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89–105.
- Diehl, D. (2013). Soil water repellency: dynamics of heterogeneous surfaces. *Physicochemical Engineers Aspects*. 432: 8:18.
- Dirksen, C. (1999). Soil physics measurements. *Geo Ecology paperback*.
- Doerr, S. and Shakesby, R. (2009). Soil water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments.
- Doerr, S., Llewellyn, C., Douglas, P., Morley, C., Mainwaring, K., Haskins, C. *et al.* (2005). Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 225-237.
- Doerr, S., Shakesby, R. and Walsh, R. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics, and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science*, 51: 33-65.
- Feeney, D., Hallett, P., Rodger, S., Bengough, A., White, N. and Young, I. (2006). Impact of fungal and bacterial biocides on microbial induced water repellency in arable soil. *Geoderma*, 135, 72-80.
- Fuentes, I., Casanova, M., Seguel, O., Padarian, J., Nájera, F., and Salazar, O. (2015). Preferential flow paths in two alluvial soils with long-term additions of pig slurry in the Mediterranean zone of Chile. *Soil Research*. **53**, 433-447.
- Gabarrón-Galeote, M., Martínez-Murillo, J., Quesada, M., and Ruiz-Sinoga, J. (2013). Seasonal changes in the soil hydrological and erosive response depending on aspect, vegetation type and soil water repellency in different Mediterranean microenvironments. *Solid Earth*, 4, 497–509.
- García-Chevesich, P. Martínez, E. García, A., Castillo, M., Garfias, R. and Neary, D. (2019). Formation of post-fire water repellent layers on *Nothofagus glauca* (Hualo)

- forest, after the historical “Las Máquinas” wildfire in south-central Chile. *American Journal of Environmental Sciences* 15(1):1-6.
- Graber, E., Tagger, S. and Wallach, R. (2009). Role of divalent fatty acids in soil water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 541-549.
- Hallet, P. (2007). An introduction to soil water repellency. *International Society for Agrochemical Adjuvants (ISAA)*. 6-9.
- Hallet, P. and Young, I. (1999). Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*.50:45-40.
- Hoffmann, A. (2012). Flora Silvestre de Chile Zona Central, Quinta Edición. Fundación Claudio Gay.
- INFOR (Instituto Forestal), FIA (Fundación para la Innovación Agraria), INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). (2000). Monografía de *Quillaja saponaria*.
- Jaramillo, D. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 30 (115): 215-232.
- Jaramillo, D., Dekker, L., Ritsema, C. and Hendrickx, J. (2000). Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-232; 105-111.
- Jordán, A., González, F. and Zavala, L. (2010). Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain), *Hydrological Processes*, 24, 736-748.
- Jordán, A., Martínez-Zavala, L. and Bellinfante, N. (2008). Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena*, 74, 137-143.
- Jordán, A., Zavala, L, Mataix-Solera and J., Doerr, S. (2013). Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena*, 108 (2013) 1–5
- Jury, W., and Horton, R. (2004). *Soil Physics*. Sixth Edition. John Wiley & Sons Inc.
- Keizer, J., Doerr, S., Malvar, M., Ferreira, A. and Pereira, V. (2007). Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*, 21, 2317-2324.
- Lado, M., Paz, A. and Ben-Hur, M. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 935–942.
- Lamparter, A., Bachmann, J., Deurer, M. and Woche, S. (2010). Applicability of ethanol for measuring intrinsic hydraulic properties of sand with various water repellency levels. *Vadose Zone Journal*, 9:445–450.
- Lamparter, A., Bachmann, J., Goebel, M. and Woche, S. (2009). Carbon mineralization in soil: Impact of wetting–drying, aggregation and water repellency. *Geoderma*, 150 (3-4): 324-333.
- Leeds-Harrison, P., Youngs, E. and Uddin, B. (1994). A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 45(3): 269-272.
- Maherali, H. and Klironomos, J. (2012). Phylogenetic and trait-based assembly of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Plos One* 7(5): e36695.
- Mallik, A. and Rahman, A. (1985). Soil water repellency in regularly burned Calluna heathlands: comparison of three measuring techniques. *Environmental Management*, 20, 207-218.
- McGhie, D. and Posner, A. (1981). The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water-repellent soils. *Australian Journal of Agricultural Research*, 32; 609-620.

- Moral García, F., Dekker, L., Oostindie, K. and Ritsema, C. (2005). Water repellency under natural conditions in sandy soils of southern Spain. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 291-296.
- Moral, F., Giráldez, J. y Laguna, A. (2002). La hidrofobia en los suelos arenosos del parque natural de doñana: caracterización y distribución. *Ingeniería del Agua*, 9: 37-50.
- Orellana, I., Ellies A. y Seguel, O. (2004). Variación de la capacidad de humectación de suelos en relación al contenido de materia orgánica. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Boletín* 20: 399-406.
- Orshan, G. (1989). Plant pheno-morphological Studies in Mediterranean Type Ecosystems, *Geobotany*, Kluwer Academic Publishers.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at <https://www.R-project.org/>.
- Rockstro, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S. and Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research*, 45:7-16.
- Hartge, K. and Horn, R., (2016). Essential Soil Physics: An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics, in: Horton, R., Horn, R., Bachmann, J., Peth. St. (Eds.), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 391 p.
- Schaumann, G., Braun, B., Kirchner, D., Rotard, W., Szewzyk, U. and Grohmann, E., (2007). Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples. *Hydrological Processes*, 21, 2276-22.
- Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J. y Rivera, D. (2011). Métodos de análisis físico de suelos. *Sociedad chilena de la ciencia del suelo*. 75p.
- Seguel, O., García de Cortázar, V. y Casanova, M. (2003). Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*. 63(3):287-297
- Seitz, S., Goebes, P., Zumstein, P., Assmann, T., Kühn, P., Niklaus, P., Schuldt, A. and Scholten, T. (2015). The influence of leaf litter diversity and soil erosion in subtropical forests. *Earth Surface Process and Landforms*. 40, 1439– 1447
- Silva-Flores, P., Bueno, G., Neira, J. and Palfner, G. (2019). Factors affecting arbuscular mycorrhizal fungi spore density in the Chilean Mediterranean-Type Ecosystem. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19: 42-50.
- Smith, S. and Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London.
- Tillman R., Scotter D., Wallis M. and Clothier B. (1989). Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research*, 27: 637–644.
- Underwood, E., Viers, J., Klausmeyer, K., Cox, R. and Shaw, M. (2009): Threats and biodiversity in the mediterranean biome. *Biodiversity Research*. 15, 188–197.
- Universidad de Chile. (2014). Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido. Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana, Chile. Ministerio del Medio Ambiente.
- Urbanek, E., Hallet, P., Feeney, D. and Horn, R. (2007). Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140: 147-155.

- Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W. y Honeyman, P. (2017). Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del L. G. B. O'Higgins, Chile. *Crossref*. 50: 59-69.
- Warrick, A. (2002). *Soil Physics Companion*. CRC Press.
- Witter, J., Jungerius, P. y Ten Harkel, M. (1991). Modelling water erosion and the impact of water repellency. *Catena*, 18, 115-124.

APÉNDICES

Apéndice 1. Índice R de individuos en función de la ladera, temporada y especies arbóreas

Temporada	Ladera	Especie	Individuo	Promedio R	Clasificación
I	M	B	1	2,50	HFB
I	M	B	2	4,05	HFB
I	M	B	3	3,98	HFB
I	M	C	1	4,04	HFB
I	M	C	2	1,95	HFB
I	M	C	3	1,99	HFB
I	M	K	1	3,00	HFB
I	M	K	2	2,56	HFB
I	M	K	3	4,58	HFB
I	M	L	1	1,48	HFL
I	M	L	2	2,31	HFB
I	M	L	3	2,05	HFB
I	SV	B	1	6,31	HFB
I	SV	B	2	2,79	HFB
I	SV	B	3	2,98	HFB
I	SV	L	1	4,77	HFB
I	SV	L	2	4,43	HFB
I	SV	L	3	3,54	HFB
I	SV	P	1	4,21	HFB
I	SV	P	2	4,97	HFB
I	SV	P	3	5,68	HFB
I	SV	Q	1	5,14	HFB
I	SV	Q	2	3,66	HFB
I	SV	Q	3	6,75	HFB
P	M	B	1	1,11	HFL
P	M	B	2	1,37	HFL
P	M	B	3	2,81	HFB
P	M	C	1	2,15	HFB
P	M	C	2	1,92	HFL
P	M	C	3	1,82	HFL
P	M	K	1	2,18	HFB
P	M	K	2	1,38	HFL
P	M	K	3	1,5	HFL
P	M	L	1	1,61	HFL
P	M	L	2	3,22	HFB
P	M	L	3	1,89	HFL
P	SV	B	1	1,03	HFL

P	SV	B	2	2,22	HFB
P	SV	B	3	1,18	HFL
P	SV	L	1	1,10	HFL
P	SV	L	2	1,29	HFL
P	SV	L	3	1,24	HFL
P	SV	P	1	1,31	HFL
P	SV	P	2	3,17	HFB
P	SV	P	3	1,33	HFL
P	SV	Q	1	1,24	HFL
P	SV	Q	2	1,06	HFL
P	SV	Q	3	1,19	HFL

I: Invierno, P: Primavera, M: Malloa, SV: San Vicente, B: *Peumus boldus*, C: *Escallonia pulverulenta*, K: *Kageneckia oblonga*, L: *Lithraea caustica*, P: *Cryptocarya alba*, Q: *Quillaja saponaria*, HFB: Hidrofóbico, HFL: Hidrofílico