

Medición y análisis de la redistribución de precipitación en plantaciones de Eucalyptus, en el clima templado húmedo de Uruguay

Jimena Alonso, Agustín Menta, Gabriel Perazza, Pablo Pais & Santiago Ford

To cite this article: Jimena Alonso, Agustín Menta, Gabriel Perazza, Pablo Pais & Santiago Ford (2023) Medición y análisis de la redistribución de precipitación en plantaciones de Eucalyptus, en el clima templado húmedo de Uruguay, Ribagua, 10:2, 91-111, DOI: [10.1080/23863781.2023.2300482](https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2300482)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2300482>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 24 Jan 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 291



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Medición y análisis de la redistribución de precipitación en plantaciones de *Eucalyptus*, en el clima templado húmedo de Uruguay

Jimena Alonso ^a, Agustín Menta^a, Gabriel Perazza^b, Pablo Pais^a and Santiago Ford^b

^aInstituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay; ^bFundación Julio Ricaldoni, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

RESUMEN

La interceptación de la precipitación por la cubierta vegetal es uno de los principales componentes del balance hídrico en los sistemas forestales. Este trabajo describe el diseño de instalaciones de medición y registro de redistribución de precipitación y presenta información de siete parcelas experimentales ubicadas en plantaciones de *Eucalyptus* de Uruguay. Los resultados muestran que la fracción de precipitación que es interceptada por el dosel forestal de primera rotación o de replantación varía entre 14 y 30% de la precipitación total, mientras que en la plantación sin manejo de rebrote se alcanza el valor máximo de 50%. La precipitación neta que alcanza al suelo se compone principalmente de precipitación directa y en menor medida de escurrimiento fustal (42–80% y 2–8% respectivamente). Mediante regresión lineal múltiple y prueba de análisis de varianza (ANOVA) se identificó dependencia significativa (p -valor < 0.01) de la interceptación con la especie, edad y densidad de plantación. La información local obtenida es fundamental para la cuantificación del proceso de redistribución de la lluvia en plantaciones forestales de rápido crecimiento, bajo clima templado húmedo y su análisis resulta relevante para la modelación numérica de este proceso.

Measurement and analysis of the rainfall partitioning in *Eucalyptus* plantations, in the temperate humid climate of Uruguay

ABSTRACT

The interception of rainfall by the vegetation cover is one of the main components of the water balance in forest systems. This study describes the design of measurement and recording facilities for precipitation redistribution and presents information from seven experimental plots located in *Eucalyptus* plantations in Uruguay. The results show that the fraction of precipitation intercepted by the forest canopy of first rotation or replanting varies between 14% and 30% of the total precipitation, while in the unmanaged regrowth plantation, a maximum value of 50% is reached. The net precipitation reaching the ground consists mainly of throughfall (directly falling on the ground) and, to a lesser extent, stemflow (42–80% and 2–8% respectively). Through multiple linear regression and analysis of variance (ANOVA), a significant dependence (p -value < 0.01) of interception on species, age, and planting density was identified. The local data obtained is essential for quantifying the rainfall redistribution process in fast-growing forest plantations under humid temperate climates, and its analysis is relevant for numerical modeling of this process.

ARTICLE HISTORY

Received 29 August 2022
Revised 12 December 2023
Accepted 25 December 2023

PALABRAS CLAVE

Interceptación de la precipitación; plantaciones forestales; *Eucalyptus*; redistribución de la precipitación; parcelas experimentales

KEYWORDS

Rainfall interception; forest plantations; *Eucalyptus*; rainfall redistribution; experimental plots

1. Introducción

La demanda mundial por pulpa y papel, así como otros usos de la madera convirtieron a las plantaciones de *Eucalyptus* sp. en el principal cultivo para obtención de productos madereros en Uruguay generando un 81% de la producción nacional de madera en rollo [1]. La respuesta a esta demanda mediante políticas que incentivan el desarrollo de la forestación industrial, con énfasis en la producción de celulosa, llevó a un rápido crecimiento de las áreas plantadas en zonas que

en su mayor parte estuvieron previamente ocupadas por pasturas naturales (vegetación baja, herbácea con predominancia de gramíneas) dedicadas exclusivamente a la ganadería extensiva vacuna y ovina [2], alcanzando actualmente las 1.087.109 hectáreas efectivas destinadas a este uso [3].

Esta sustitución de pastura natural por plantaciones forestales, resulta un factor clave de cambio en las componentes del ciclo hidrológico: principalmente el aumento de la evapotranspiración y consecuente

CONTACT Jimena Alonso  jalonso@fing.edu.uy  Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República J. Herrera y Reissig 565, Montevideo C.P. 11200, Uruguay

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

reducción de las escorrentías [4,5]. La mayor evaporación de agua de los bosques en comparación a la vegetación baja o a los cultivos anuales se debe principalmente a dos procesos: i) la mayor tasa de evaporación en condiciones de humedad (interceptación) generada por la mayor capacidad de almacenamiento en el dosel de las plantaciones y la mayor rugosidad aerodinámica de éstas en comparación a pasturas o cultivos de menor altura [6]; ii) la mayor tasa de transpiración de las plantaciones forestales debida a que la mayor profundidad de sus sistemas radiculares permiten alcanzar una mayor disponibilidad de agua [7–9]. Un tercer factor que incide en la regulación de la evapotranspiración en las plantaciones forestales es el contenido de agua disponible en los suelos para la transpiración, debido a que la cantidad de agua que efectivamente alcanza el suelo se reduce en función de la redistribución de la precipitación en el dosel forestal.

Cuando se produce precipitación sobre un bosque, una fracción del agua es interceptada y temporalmente retenida en el dosel forestal (hojas y ramas) antes que alcance la superficie del suelo, parte de esa fracción es reintegrada a la atmósfera por evaporación (interceptación), otra parte pasa directamente a través de los espacios libres del dosel o gotea desde éste alcanzando el suelo (precipitación directa o trascolación) y la última escurre por las ramas y troncos hasta alcanzar el suelo (escurrimiento fustal o cortical), configurando el proceso hidrológico conocido como redistribución de la precipitación [10,11,12].

Este proceso de redistribución es altamente dependiente de factores bióticos como la altura, diámetro de fuste, la cobertura del dosel y características superficiales de las distintas especies, además de factores climáticos como la tasa de evaporación, volumen e intensidad de las lluvias [13–15]. Las revisiones [16], y [17], son coincidentes en establecer que el grado de cierre del dosel forestal genera variaciones en la distribución espacial de la precipitación directa, reportando mayores valores en los doseles abiertos y los eventos de lluvia de alta intensidad. Para la precipitación fustal la incidencia de los atributos morfoestructurales no presenta vínculos claros, sino que se ha encontrado que depende de la interacción entre la intensidad de la precipitación y el tamaño del árbol [18].

En plantaciones comerciales como las que son objeto de estudio de este trabajo, la edad, la densidad de plantación y las prácticas de manejo (poda o raleo) son factores que también afectan la interceptación del dosel [19]. En el caso de Uruguay tanto las variables

del sitio: clima, suelo y topografía como los cambios tecnológicos centrados en el aumento de las tasas de crecimiento (profundidad de laboreo, fertilización y selección de clones), inciden en que las plantaciones de *Eucalyptus* sp. presenten tasas de crecimiento comparables a los países de mejores indicadores [20,21]. Por esto, se entiende que es de fundamental importancia implementar y mantener programas locales de monitoreo continuo a largo plazo, que permitan la cuantificación de la interceptación y además generen insumos para la caracterización de su vínculo con los factores productivos y climáticos particulares de la región.

En base a estos antecedentes, este trabajo busca: i) describir el diseño de las parcelas experimentales de monitoreo de redistribución de la precipitación y su optimización orientada a reducir las fuentes de error y minimizar el mantenimiento operativo y ii) avanzar en la cuantificación de la interceptación para las especies forestales comerciales más comunes en Uruguay.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Las siete parcelas experimentales de monitoreo se encuentran dentro de plantaciones forestales de las principales especies de *Eucalyptus* que se plantan en el país: *E. globulus*, *E. dunnii* y *E. grandis* [1] y están localizadas en las zonas este y noroeste de Uruguay. El clima de la región se describe como templado, moderado, lluvioso y húmedo ('Caf' clasificación Köppen). De acuerdo a la climatología del período 1991–2020 [22] la precipitación media anual es de 1290 mm y se distribuye, sin temporalidad marcada, en una media de 83 días lluviosos, mientras que la temperatura media mensual varía entre 10,9°C en julio (invierno) y 24,8°C en enero (verano).

La Tabla 1 reúne la información disponible de las parcelas de estudio, resumiendo su localización, especie, año y densidad de plantación, así como el período de monitoreo en cada caso. El manejo de las plantaciones (exceptuando SAg) es el usual actualmente en la región, para el objetivo de producción de madera pulperable en rotaciones cortas (8 a 10 años), que incluye las siguientes operaciones: laboreo, plantación con aplicación previa de pesticida y fertilización posterior y cosecha. La parcela SAg, es particular en cuanto a que se encuentra en una plantación que fue cortada a su madurez y no se realizó ningún manejo del rebrote posterior, con lo cual cada tocón mantuvo en promedio 5 fustes por cepa.

Tabla 1. Identificación y localización de las parcelas experimentales de monitoreo de la redistribución.

Nombre	Especie	Año plantación	Densidad de plantación (á/ha)	Período de monitoreo	Localización (lat, long)
Zona este					
1 SJg	<i>E. globulus</i>	1997	1330	Set/2005 Jun/2006	-34.42, -55.38
2 LTg	<i>E. globulus</i>	1997	1150	Set/2007 Ago/2008	-34.13, -55.15
3 AGd	<i>E. dunnii</i>	2014	1200	Abr/2019 May/2022	-34.16, -54.30
4 SAg	<i>E. grandisR*</i>	2000	1055	Feb/2014 Nov/2018	-34.41, -55.32
Zona noroeste					
5 DTg	<i>E. globulus</i>	1998	895	Jul/2006 Abr/2014	-32.25, -57.65
6 DTd	<i>E. dunnii</i>	2015	1300	May/2019 Abr/2021	-32.25, -57.65
7 NEg	<i>E. grandis</i>	2011	1080	Jun/2015 Jul/2022	-32.50, -57.15

*Se trata de un monte sin manejo de rebrote de edad aproximada y densidad de plantación estimada por el marco de plantación (distancia entre tocones)

2.2. Medición de las componentes de redistribución

Las pérdidas por interceptación de la precipitación debida a la cobertura forestal, se determinan por balance hídrico en el dosel, en base a la medición directa de las componentes de la redistribución:

$$I = P - (Pd + Pf) \quad (1)$$

siendo I la interceptación; P la precipitación total incidente medida fuera del dosel; Pd la precipitación directa (o trascolación) y Pf el escurrimiento fustal (o cortical).

En todas las parcelas se midieron simultáneamente las dos componentes de la redistribución: precipitación directa y escurrimiento fustal. Para ambas variables los datos se registraron en intervalos de 5 minutos. La precipitación total incidente fue medida fuera de la plantación, en sitios alejados entre 200 y 1000 m de las parcelas, ubicados en zonas libres de plantación (Figura 1). En la mayoría de los casos (a menos de SJg y LTg) se contó también con registros de variables meteorológicas, incluyendo velocidad del viento. Estos datos registrados en estaciones automáticas se almacenaron a intervalos de 20 minutos. El período de monitoreo fue el máximo posible en cada parcela, en el caso de las dos más antiguas (SJg y LTg) fue interrumpido por la cosecha temprana e imprevista de las plantaciones, sin embargo se consideró valioso incluir sus resultados como representativos de la zona geográfica.

La principal dificultad para la correcta estimación de la interceptación radica particularmente en la medición confiable de la precipitación directa y fustal, ya que puede suceder en algunos eventos que la suma de ambos registros, o incluso únicamente la precipitación directa iguale o supere a la precipitación total registrada fuera del dosel [13,23,24], generando valores negativos de interceptación. Esto puede deberse tanto al error de la medición, como a las diferencias entre la precipitación total incidente entre los sitios de medición producto de la variabilidad espacial en los eventos o incluso a una sobrerrepresentación de los

llamados ‘puntos de goteo’ [‘drippoints,’ 25], que suele darse en diseños de muestreo de pluviómetro móvil en relación a los de pluviómetro fijo [26]. En este sentido las canaletas de recolección resultan un método eficiente por su capacidad de representar tanto la variabilidad espacial de la precipitación directa a medida que aumenta la distancia desde los fustes hacia los extremos de las copas como también los ‘puntos de goteo’ [27].

La medición de la velocidad del viento en estaciones meteorológicas asociadas a cada parcela permite corregir los registros pluviográficos de precipitación total incidente y estimar los errores, en algunos casos significativos, debidos a esta causa según la metodología recomendada por la Organización Meteorológica Mundial [28].

Las instalaciones de las parcelas experimentales se diseñaron siguiendo el modelo de 11. Para la recolección de la precipitación directa se construyeron canaletas de acero galvanizado en forma de ‘V,’ de 15 cm de ancho y 30 m de largo, elevadas del suelo entre 0,6 y 1 m y dispuestas en diagonal en el espacio entre filas de la plantación para una adecuada representación de la heterogeneidad del dosel (Figura 2a). La disposición longitudinal de las canaletas se hizo siguiendo la pendiente natural del terreno y regulando la altura de los soportes de madera cuando fue necesario aumentarla, de forma de mantener una pendiente mínima de 1% que asegure el escurrimiento y un mínimo de autolimpieza.

Para recolectar el escurrimiento fustal y adaptando la metodología propuesta originalmente por 29, se utilizaron collarines de goma ajustados en espiral alrededor de los troncos y sellados con silicona (Figura 2b), conectados a tuberías de PVC de 50 mm de diámetro que descargan a una tubería principal de igual dimensión. En todos los casos se seleccionan 10 árboles ubicados próximos a la canaleta. Los árboles utilizados se rotan cada 2 o 3 años para evitar daños permanentes en el fuste y los collarines de goma se ajustan a medida que el crecimiento del árbol lo requiere, normalmente cada 6 meses. En el caso particular de la parcela SAg, que se trata de una plantación de rebrote cuya conformación



Figura 1. (a) Pluviógrafo para registro de la precipitación total incidente próximo a la parcela SJg (año 2005); (b) Estación meteorológica próxima a la parcela NEg (año 2015).

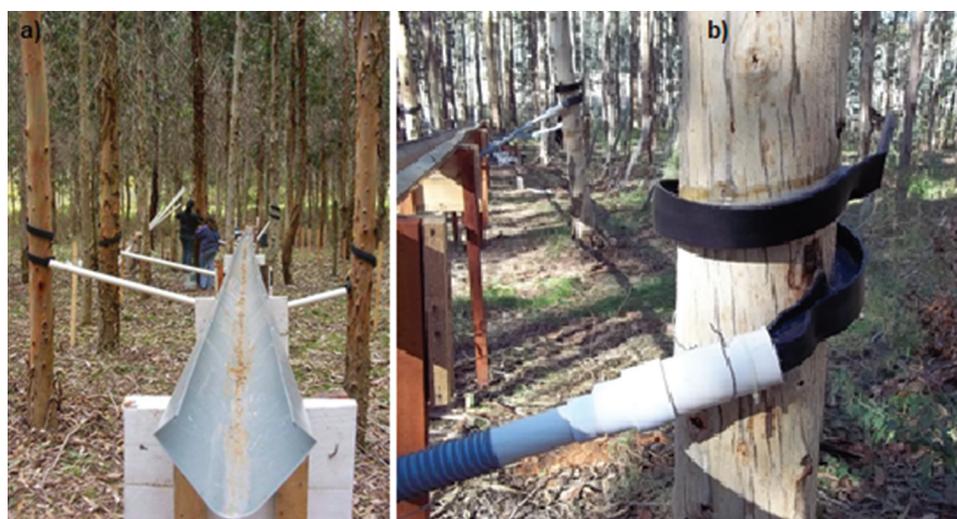


Figura 2. (a) Canaletas para recolección de Pd en la parcela LTg (año 2007); (b) Collarines de goma para recolección de Pf en la parcela DTg (año 2011).

general es de 5 tallos de rebrote vertical por cada tocón, se aseguraron collarines a los 5 tallos de 2 tocones.

En el diseño original cada tubería conduce el flujo hacia un tanque de polietileno de 600 litros equipado con sensor automático para registro de nivel de agua en intervalos de 5 minutos y una pequeña bomba operada con sensor de nivel para desagote automático y alimentada por baterías reemplazables de 12 V. El volumen de cada componente se calcula a partir de las variaciones en el nivel del agua registrado en los tanques y considerando además el volumen desagotado por las bombas. Este diseño presentó algunos inconvenientes, siendo los principales: i) el consumo de energía de las bombas de desagote, lo cual limitaba en forma importante la autonomía del equipo a un máximo de 45 días; ii) el desfase temporal de los registros de precipitación

directa y fustal en relación a la precipitación incidente, debido al tiempo de retención del sistema de tuberías y tanque; iii) la incertidumbre en la estimación del caudal de desagote de la bomba.

2.2.1. Optimización del sistema de medición

El rediseño del sistema de registro y almacenamiento consistió en primer lugar de la división de la canaleta de recolección de precipitación directa en cuatro tramos de 7 m de longitud (Figura 3a), manteniendo su sección original. También la recolección del escurrimiento fustal pasó a ser acumulada en 2 grupos de 5 árboles cada uno (Figura 3b). Con esto se pretendió disminuir los tiempos de acumulación y tránsito del flujo por el sistema de canaleta y tuberías, permitiendo así una mejor sincronización temporal de los registros durante los



Figura 3. (a) Canaletas dispuestas en grupos de 2 tramos y registradores de cangilón, parcela AGd (año 2019); (b) Collarines de goma y tuberías de PVC que conducen el flujo de 5 árboles hacia el registrador de cangilón, parcela NEg (año 2018).

eventos de precipitación. Esta separación del sistema original en 2 subsistemas iguales de 5 árboles y 2 tramos de canaleta cada uno, implica además contar con una repetición del registro en cada parcela, disminuyendo así las pérdidas de información.

La segunda modificación consistió en la eliminación de los tanques de almacenamiento para el registro de la variación de volumen acumulado en el tiempo. Para eso se incorporaron mecanismos independientes de cangilón para la medición de cada flujo (directa y fustal) a la salida de los tramos de canaleta y en la confluencia de las descargas de los collarines. Se diseñó y construyó también un sistema de registro único [data-logger] que concentra en un microprocesador todos los datos y los almacena en una tarjeta SD, como se describe con mayor detalle en [30]. El volumen de cada cangilón (Figura 3b) fue diseñado para volcar en intervalos mínimos de 1 segundo el caudal conducido por la canaleta correspondiente a una intensidad de precipitación de 5 años de período de retorno y una duración de 10 minutos. El sistema cuenta con alimentación a baterías reemplazables [sin sistema de autocarga] de 6 V, con una autonomía verificada en funcionamiento de hasta 4 meses.

La calibración del sensor consistió en alimentar el sistema con agua a caudal constante, empleando un recipiente graduado y una bomba para generar los pulsos necesarios. A través de mediciones precisas del nivel del recipiente, los tiempos de medición y los pulsos registrados, se determinó el volumen de agua vertido en cada pulso para cada caudal utilizado. Este proceso se repitió variando el caudal mediante el ajuste de la velocidad de giro de la bomba. Para la estimación de la incertidumbre de la medición se siguió el método propuesto por la guía de la [31], con el que luego de aplicar las correcciones propuestas al volumen obtenido, el resultado tiene una

incertidumbre expandida de 4% (con un nivel de confianza del 95%).

Estas modificaciones fueron implementadas a partir del año 2014 en las parcelas que se encontraban operativas, instaladas en SAg, NEg, AGd y DTd.

2.3. Análisis de la información

Para el estudio de la interceptación, la información fue analizada acumulando los registros sub-horarios en base diaria y asumiendo la ocurrencia de un único evento de precipitación al día teniendo como objetivo generar una base de datos útil para la modelación hidrológica de uso simple en el manejo forestal. Debe considerarse además que tanto las características propias de cada evento como la metodología de medición de la precipitación directa y fustal previa al 2014, generan un retraso en el registro temporal de ambas componentes que varía entre unos pocos minutos y varias horas, lo cual dificulta un análisis con base temporal horaria. Esto podrá ser objeto de estudio posterior.

Los eventos se consideran independientes si el intervalo de tiempo sin lluvia que los separa es de al menos 8 horas, período considerado adecuado para el secado completo del dosel de acuerdo a las tasas medias de evaporación horaria registradas localmente. En el tratamiento de los datos se procedió a eliminar para el análisis los eventos sin registro o con incoherencias en el registro de precipitación directa ya sea porque excede el registro de precipitación total incidente o por falla en el sistema de vaciado de los tanques (en registros previos al 2014). Los casos en que se obtuvo interceptación negativa (precipitación directa mayor a la precipitación incidente) fueron eliminados del análisis pero evidencian lo mencionado anteriormente respecto a la variabilidad del proceso de trascolación así como la existencia de errores e incertidumbre asociada a la medición de las

variables. Los eventos no fueron eliminados por datos faltantes en la precipitación fustal, ya que esta componente de la redistribución representa en general menos del 6% del total incidente [24,32–34]. La precipitación directa en cada parcela se determina por la suma del volumen acumulado en cada paso temporal, dividido el área de captación de la correspondiente canaleta. Para el escurrimiento fustal se divide el volumen acumulado entre el área correspondiente a los 10 árboles monitoreados y considerando el marco de plantación relevado en cada sitio.

El análisis de regresión implica el uso de funciones matemáticas para modelar e investigar la dependencia de una variable (variable de respuesta) con una o más variables observables (o variables explicativas). Sus hipótesis principales son: i) varianza constante y normalidad en la distribución de los residuos; ii) independencia entre los residuos, y iii) independencia entre los residuos y los valores de la variable explicativa [35]. Los residuos se calculan como la diferencia entre los valores medidos de la variable de respuesta y los valores ajustados mediante la regresión.

Para caracterizar la relación de cada componente de la redistribución con la precipitación total incidente (principal forzante) se utiliza el análisis de regresión lineal simple, aplicado al conjunto de eventos de cada parcela monitoreada, por separado. Luego se comparan las pendientes de las líneas de regresión para evaluar posibles diferencias entre dichas relaciones, las cuales se consideran significativas en el caso que superen dos veces la mayor desviación estándar de las series que se comparan.

Posteriormente y con el objetivo de identificar otras variables (además de la precipitación total) que puedan explicar diferencias en la interceptación del dosel, se aplica un modelo de regresión lineal múltiple incluyendo como variables predictoras la especie, la edad y la densidad de plantación y evaluándolos según la prueba de análisis de varianza (ANOVA).

Para evaluar que el conjunto de datos cumple con las hipótesis de distribución normal y dispersión desigual de residuos, o errores, se utilizaron los gráficos de análisis residual: i) histograma; ii) residuos vs variable ajustada; iii) diagramas cuantil-cuantil [36]. Los análisis y las representaciones gráficas fueron realizados utilizando los paquetes ‘tidyverse’ [37], ‘ggpubr’ [38], ‘ggpmisc’ [39] y ‘stats’ del lenguaje R [40]

3. Resultados y discusión

La cantidad de eventos registrados es variable entre sitios, siendo el mayor registro de 494 eventos en la parcela DTg durante la 1er rotación y el menor de 64 eventos en SJg. La distribución de los eventos según su magnitud muestra una marcada asimetría con sesgo positivo para todos los sitios y períodos de registro, concentrando la mayor cantidad en el rango 0–20 mm/día (Figura 4). Los eventos por debajo de 5.0 mm representan entre 45 y 58% de todos los eventos de precipitación, siendo los que probablemente presenten las tasas más altas de interceptación, dependiendo también de la precipitación y la tasa de evaporación de los días antecedentes.

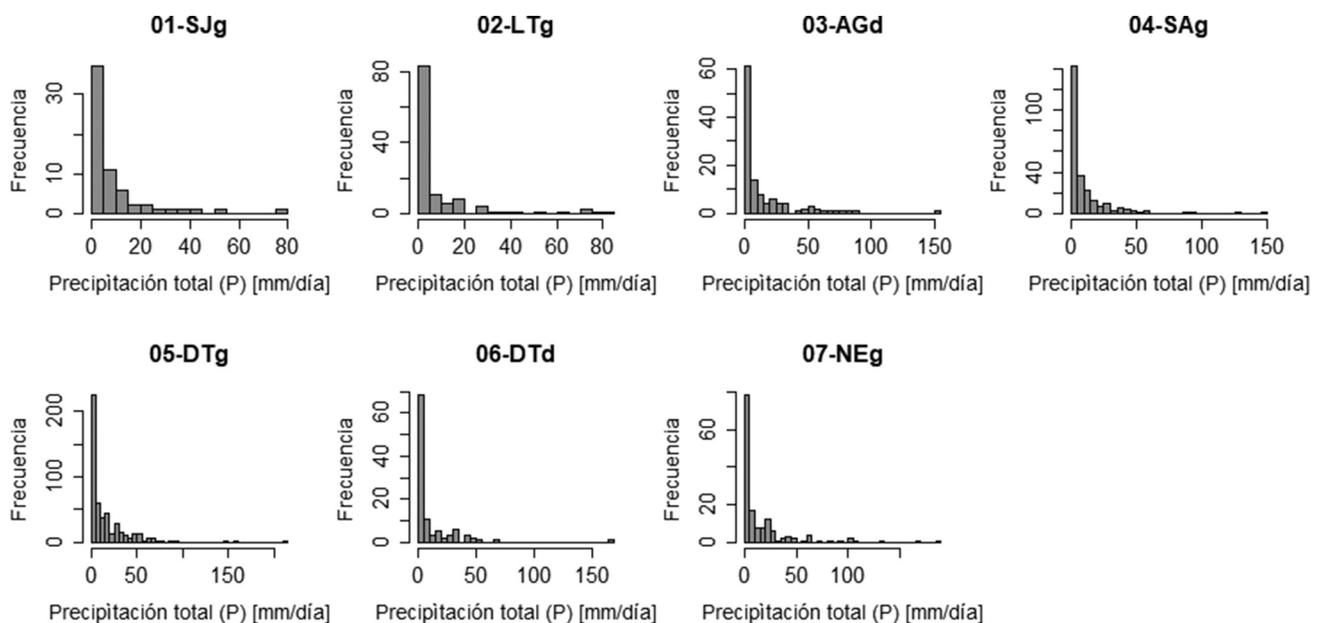


Figura 4. Histogramas de precipitación total (P) en [mm/día], para los eventos medidos en cada parcela experimental

La proporción de eventos registrados en los que se obtuvieron valores de interceptación negativos, no superó el 10% de los registros en ninguna parcela, una fracción considerablemente menor a la reportada en varios estudios citados en [13]. Aun así existe una parte de los eventos que no logra medirse apropiadamente, por lo cual el análisis siguiente de la magnitud relativa de las distintas componentes de la redistribución se hace en base a los coeficientes de la regresión entre cada componente y la precipitación total incidente (Tabla 2), que representan los mm de cada

uno en relación a los mm de precipitación total. Complementando esto se presenta también la desviación estándar como indicador del grado de dispersión de los valores observados en relación a la línea de regresión y el R^2 de cada regresión, que corresponde a la proporción de varianza explicada por el modelo.

En términos generales la precipitación directa (Pd) se relaciona fuertemente con la precipitación total incidente (P) en todos los sitios de monitoreo ($0.93 < R^2 < 0.98$, Figura 5) y representa entre el 65 y el 80% de ésta, para

Tabla 2. Precipitación directa (Pd), escurrimiento fustal (Pf) e interceptación del dosel (I), como porcentaje de precipitación total incidente, para el período completo monitoreado en cada parcela.

Nombre	Especie	Edad (años)	Pd (%)	Pf (%)	I (%)
1 SJg	<i>E. globulus</i>	9	74.5 ± 2.6	3.7 ± 0.2	22.8 ± 2.4
2 LTg	<i>E. globulus</i>	10–11	73.9 ± 1.5	4.3 ± 0.1	23.1 ± 1.6
3 AGd	<i>E. dunnii</i>	4–7	79.9 ± 1.4	1.7 ± 0.1	18.6 ± 1.4
4 SAg	<i>E. grandisR</i>	14–18	41.6 ± 0.6	8.0 ± 0.2	50.4 ± 0.6
5 DTm	<i>E. globulus</i>	8–16	80.2 ± 0.9	5.4 ± 0.2	14.5 ± 0.8
6 DTd	<i>E. dunnii</i>	4–6	72.1 ± 1.1	4.3 ± 0.1	23.6 ± 1.2
7 NEg	<i>E. grandis</i>	4–10	64.7 ± 1.1	4.8 ± 0.2	30.3 ± 1.0

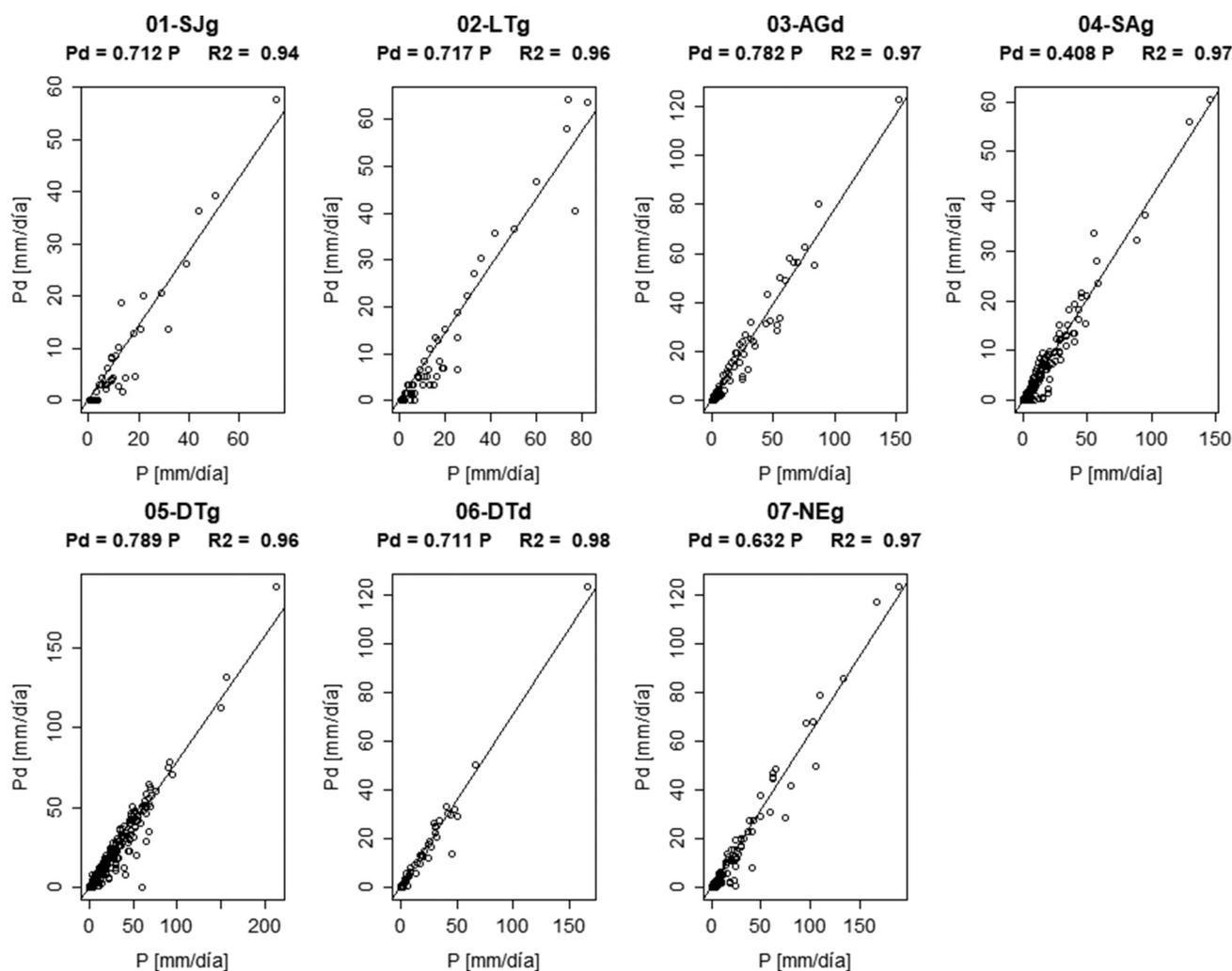


Figura 5. Regresión entre precipitación directa (Pd) y precipitación total (P) en [mm/día], para la serie de eventos disponible en cada parcela experimental.

plantaciones de primera y segunda rotación y 42% en la plantación sin manejo de rebrote. El escurrimiento fustal (Pf) es la componente menor en el proceso de redistribución variando entre 2 y 5% de P y alcanzando el 8% en la parcela de rebrote. También existe alta correlación entre Pf y P ($0.8 < R^2 < 0.93$, [Figura 6](#)) con excepción del sitio DTm ($R^2 = 0.63$) donde se evidencia la dependencia de otras variables posiblemente debido a la mayor extensión del período de medición en esta parcela (8 a 16 años de edad) con las consiguientes variaciones en características tales como diámetro del fuste y área del dosel, cuya evolución no fue caracterizada en este trabajo. Por su parte la interceptación del dosel (I) presenta variaciones en el rango 14 a 30% de P para plantaciones de primera y segunda rotación con replantación y de 50% en la plantación sin manejo de rebrote, siendo la correlación entre ambas menor que para las otras dos componentes ($0.38 < R^2 < 0.79$, [Figura 7](#)), lo que manifiesta también la dependencia de otras variables, incluyendo posiblemente

a la precipitación antecedente, intensidad del evento y tasa de evaporación asociada a la estacionalidad. Se destaca que la plantación sin manejo de rebrote de la parcela SAg, presenta valores de interceptación mayores al doble del promedio registrado en las demás parcelas. A pesar de lo acotado de la comparación, se evidencia que la cantidad de agua que alcanza al suelo bajo la plantación sin manejo de rebrote es significativamente menor debido a la reducción de Pd y aún a pesar del incremento de Pf. El análisis de residuos muestra que su distribución es aproximadamente normal para Pd ([Apéndice A, Figura A1 and Figura A3](#)), aunque la varianza de los residuos no es constante en todo el rango de valores estimados para todas las parcelas ([Apéndice A- Figura A2](#)). Para el escurrimiento fustal el análisis muestra menor ajuste a las hipótesis de la regresión ([Apéndice A, Figura A4-A6](#)), en particular para las parcelas SJg y LTg, al igual que para la interceptación ([Apéndice A, Figura A7-A9](#)). Si bien no se logra un modelo robusto que

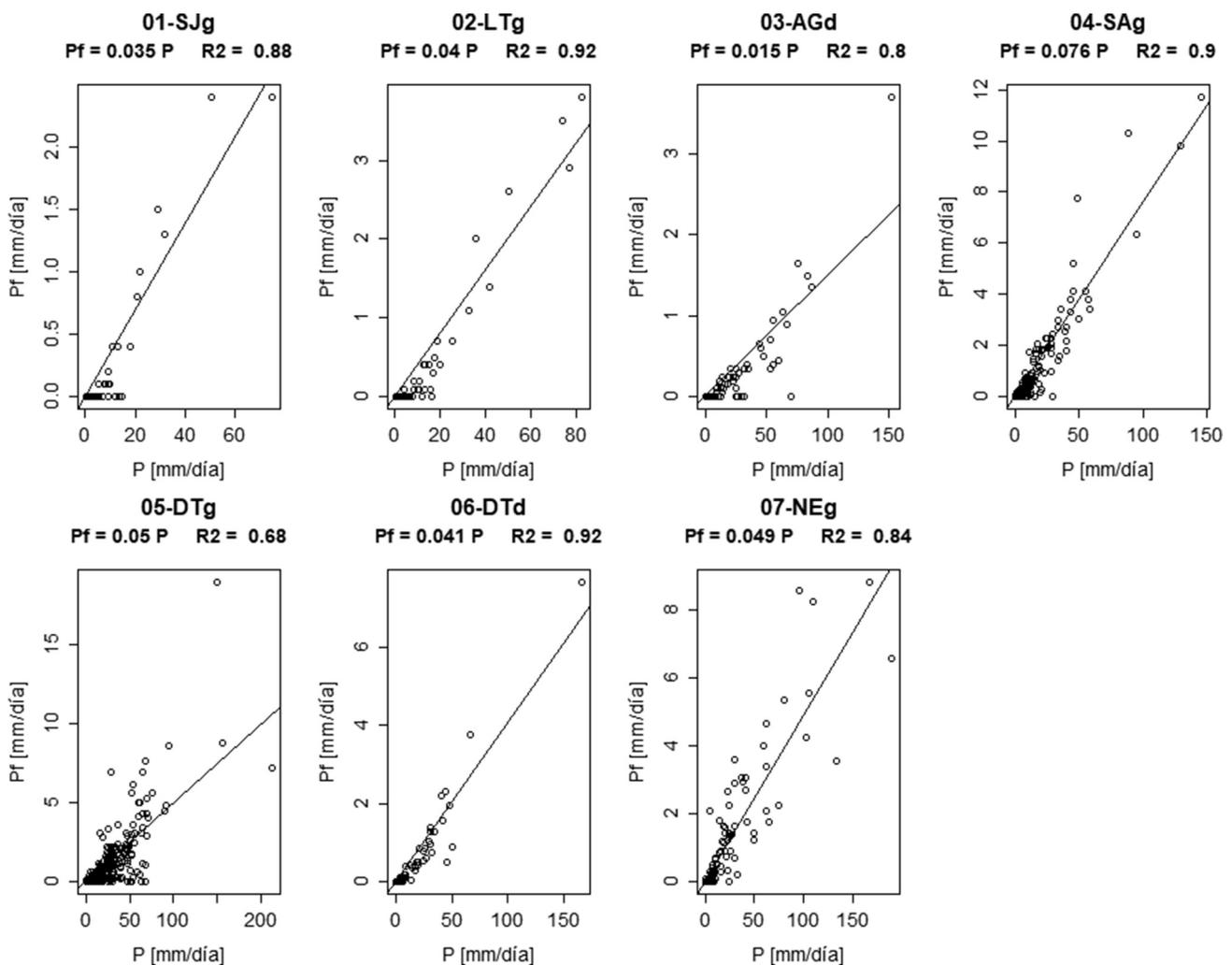


Figura 6. Regresión entre escurrimiento fustal (Pf) y precipitación total (P) en [mm/día], para la serie de eventos disponible en cada parcela experimental.

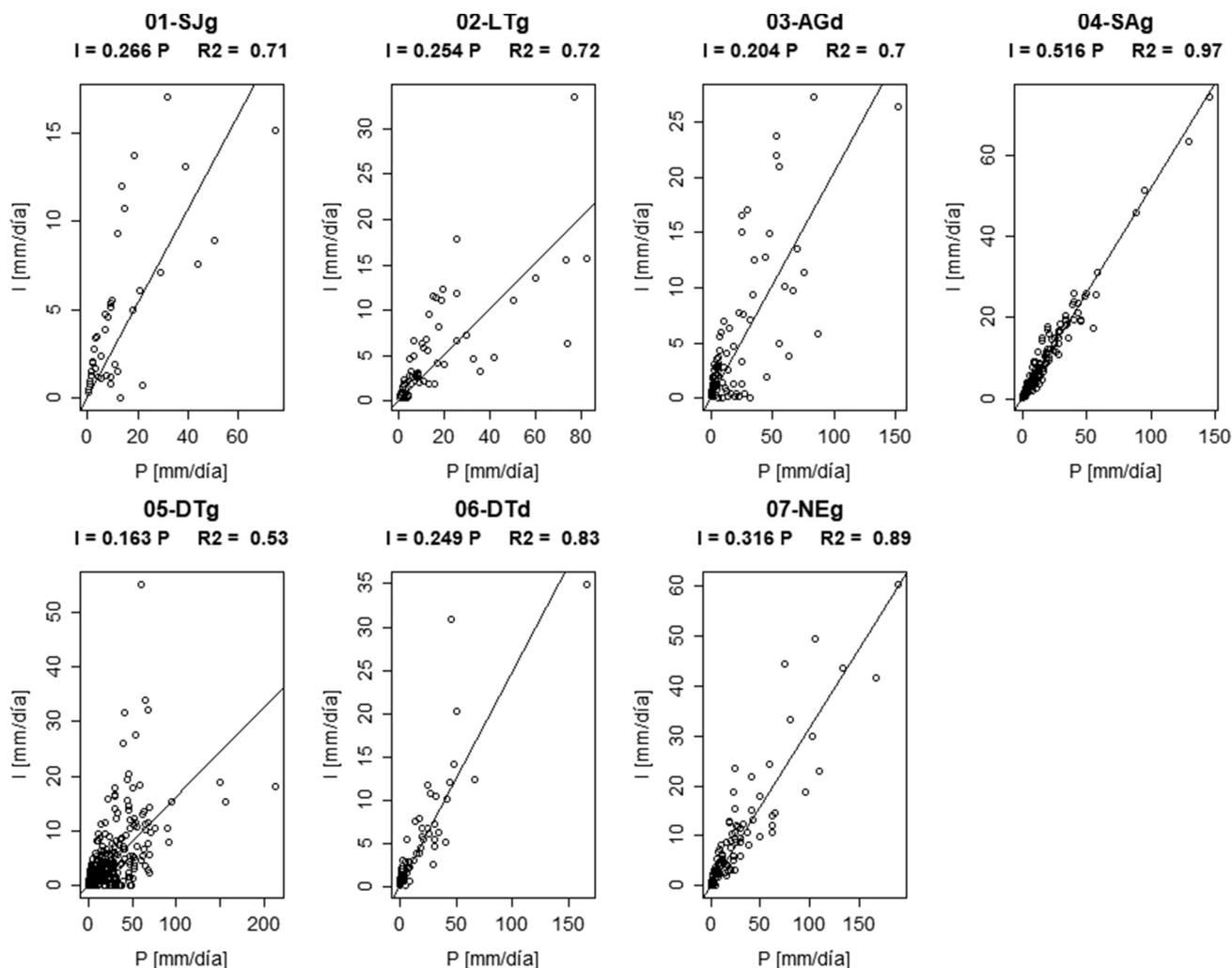


Figura 7. Regresión entre interceptación (I) y precipitación total (P) en [mm/día], para la serie de eventos disponible en cada parcela experimental.

describa la interceptación y el escurrimiento fustal en base únicamente al volumen de precipitación incidente, dada la evidencia mencionada sobre la interdependencia de los factores bióticos y climáticos (en particular la intensidad de precipitación) para explicar su variación, los resultados se consideran válidos para la cuantificación de las fracciones que componen la redistribución.

Estos resultados obtenidos son consistentes con el rango de variación de interceptación en *Eucalyptus* sp. reportado para el sur de Brasil por 41, en base a varios autores, que se sitúa entre 7 y 26% de P. En particular su estudio en una parcela de *E. dunnii* con densidad aproximada de 1500 á/ha y edad entre 2 y 4 años, presenta resultados de precipitación directa y escurrimiento fustal de 71% y 1.4% de P respectivamente, valores muy similares a los obtenidos para esa especie en las parcelas AGd y DTd. Resulta coherente que no se logre un modelo robusto que describa el escurrimiento fustal en base únicamente al

volumen de precipitación incidente dada la evidencia mencionada sobre la interdependencia de los factores bióticos y climáticos (en particular la intensidad de precipitación) para explicar su variación.

Clasificando la información por especie, la regresión lineal de la muestra que el mayor porcentaje de P interceptado, como era esperable, ocurre en el sitio de la plantación sin manejo de rebrote SAg (*E. grandis*R), pero además se observa (Figura 8) que esta especie también es la que presenta mayor interceptación para la plantación de primer ciclo, siendo la interceptación en *E. grandis* > *E. dunnii* > *E. globulus*. Vale aclarar que los valores de R^2 en estas relaciones explican menores porcentaje de la variación de la interceptación, en particular para *E. globulus* ($R^2 = 0.41$), por lo cual debe tomarse como una primer aproximación a la cuantificación por especie que posiblemente presenta además influencia de las características de volumen e intensidad de los eventos de cada grupo.

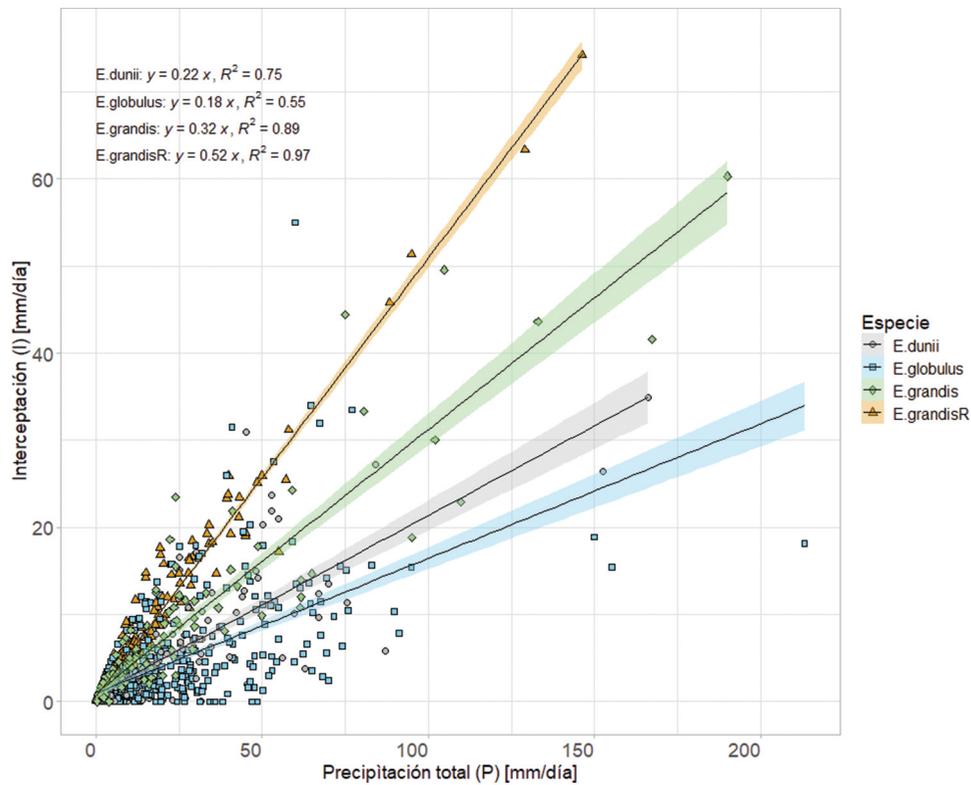


Figura 8. Regresión entre interceptación (I) y precipitación total (P) en [mm/día], para la serie de eventos disponible según especies.

Finalmente el análisis de regresión lineal múltiple, identificó como significativas (p -valor < 0.01), además de P, a las tres variables predictoras adicionales utilizadas: especie, edad y densidad de plantación. Sin embargo al incluirlas en ese orden que resulta el óptimo al agregar los predictores paso a paso, solo se logra una leve mejora en el R^2 de 0.58 a 0.60, en relación a usar P como predictor único. El análisis de residuos para este modelo (Apéndice A, Figura A7-A9), muestra un histograma de residuos cercano al normal, el gráfico Q-Q muestra una buena alineación en el tramo central con desviaciones en ambos extremos. Sin embargo la gráfica de residuos vs valores ajustados no muestra una varianza constante, sino que se reduce hacia los extremos. Se considera que el modelo tiene un ajuste aceptable con un error estándar residual de 4.4 mm, aunque no resulta un modelo completamente adecuado para la cuantificación confiable de la interceptación. Se debe entonces continuar trabajando en el futuro para incorporar otras variables explicativas, transformaciones de las mismas y posiblemente incorporar el uso de modelos mixtos lineales, que permitan representar tanto dependencias fijas (analizadas aquí) como aleatorias.

4. Conclusiones

La optimización del diseño de parcelas de medición de redistribución de precipitación bajo dosel forestal permitido sistematizar el monitoreo continuo de las variables, empleando instalaciones y protocolos de monitoreo que permiten que los resultados entre parcelas sean comparables. La base de datos generada a partir de las siete parcelas experimentales permite avanzar en la comprensión y cuantificación del proceso de redistribución de la precipitación que ocurre en las plantaciones de las especies de *Eucalyptus* más expandidas en la región. Dicha base de datos es también un insumo clave para contribuir a un mayor desarrollo, prueba y simplificación de modelos que simulen adecuadamente la interceptación y sus componentes: el almacenamiento en el dosel y la tasa de evaporación durante la tormenta [42], generando herramientas robustas y aplicables a otras regiones y especies.

Los resultados indican que en las plantaciones de *Eucalyptus* de primer ciclo o segundo ciclo con replantación interceptan entre 14 y 30% de la precipitación total incidente y que esta magnitud depende además de la especie, edad y densidad de plantación, en ese orden. Sin embargo aún debe continuarse el trabajo, ampliando la base de datos y el

análisis para poder establecer modelos y relaciones confiables entre éstas variables.

Respecto a la fracción de la precipitación que alcanza el suelo, los resultados indican que la precipitación directa (Pd) es la componente mayor situándose entre 65 y 80% de la precipitación total, mientras que el escurrimiento fustal (Pf) es la fracción menor con valores entre 2 y 5% de P.

Se observaron diferencias importantes en la interceptación registrada en una plantación sin manejo de rebrote, la cual alcanza el 50% de la precipitación, duplicando el valor medio registrado en plantaciones de primer o segundo ciclo con replantación.

Esta línea de trabajo aún tiene pendiente avanzar en la identificación del rol que juegan las características de la plantación y las diferencias estructurales entre especies en la magnitud de la interceptación, para lo cual es indispensable incorporar mediciones continuas de características como: índice de área foliar, altura, volumen y biomasa. Si bien el monitoreo in-situ a largo plazo de estas características es costoso y obtener valores representativos puede ser una tarea compleja, su utilización en forma conjunta con observaciones de sensoramiento remoto, como LIDAR que cuantifica la arquitectura del dosel en 3 dimensiones [43], permitirá avanzar en esa dirección.

Agradecimientos

La línea de investigación vinculada a los resultados de esta publicación se ha mantenido desde el año 2005 gracias al apoyo y financiación de: Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA); Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y el aporte de empresas privadas del rubro forestal (UPM, Montes del Plata y Forestal Atlántico Sur) y del rubro agua mineral.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

This work was partially supported by the Agencia Nacional de Investigación e Innovación [ANII-FSI I 2016 1-128679].

ORCID

Jimena Alonso  <http://orcid.org/0000-0002-7384-5894>

Disponibilidad de la información

Los datos que respaldan los resultados de este estudio se encuentran disponibles en <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.954618>.

References

- [1] MGAP. Anuario estadístico agropecuario 2021a. Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (Uruguay). 2021a [accedido 2022 July 25]. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2021>
- [2] Vasallo M. Dinámica y competencia intrasectorial en la agricultura uruguaya, los cambios en la última década. *Agrociencia Uruguay*. 2013 julio/diciembre; 17(2):170–179.
- [3] MGAP. Cartografía Nacional Forestal 2021. Dirección General Forestal, División Evaluación e Información. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (Uruguay). 2021b [accedido 2022 Aug 3]. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/cartografia-nacional-forestal-2021>
- [4] Silveira L, y Alonso J. Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrol Process*. 2009;23(2):320–329.
- [5] Birkinshaw SJ, Bathurst JC, Robinson M. 45 years of non-stationary hydrology over a forest plantation growth cycle, Coalburn catchment, Northern England. *JouR of Hydro*. 2014;519 559–573. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.07.050
- [6] Carlyle-Moses DE, y Gash JHC. Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. In: Levia D, Carlyle-Moses DE, Tanaka T, editors. *Forest hydrology and biogeochemistry: synthesis of past research and future directions*. Vol. 216. Dordrecht: Springer; 2011. p. 407–423.
- [7] Calder IR. Maiment, DR Hydrologic effects of land-use change. New York: McGraw-Hill Inc; 1992. p. 13–50.
- [8] Zhang L, Dawes WR, Walker GR. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Wat Reso Resea*. 2001;37(3):701–708. doi: 10.1029/2000WR900325
- [9] de Paula Lima W. Hidrología florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba: USP-ESALQ. 2008;245.
- [10] Rutter A, Kershaw K, Robins P, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agri Mete*. 1971;9:367–384. doi: 10.1016/0002-1571(71)90034-3
- [11] Huber A, Y Iroumé A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *J Hydrol*. 2001;248(1–4):78–92.
- [12] Yáñez-Díaz MI, Cantú-Silva I, González-Rodríguez H, et al. Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y ciencias del agua*. 2014;5(2):71–84.
- [13] Crockford RH, y Richardson DP. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol Process*. 2000;14(16–17):2903–2920.
- [14] Huber A. Cambios en el balance hídrico provocado por la forestación con *Pinus radiata* D. Don en el secado interior del centro de Chile. *Gestión Ambiental*. 2003;9:57–66.

- [15] Keim RF, Skaugset AE, y Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity. *Adv Water Res.* 2006;29(7):974–986.
- [16] Momolli DR, Schumacher MV, Viera M, et al. Incident precipitation partitioning: throughfall, stemflow and canopy interception in *Eucalyptus dunnii* stand. *J Agric Sci.* 2019;11(5):372.
- [17] Magliano PN, Whitworth-Hulse JI, y Baldi G. Interception, throughfall and stemflow partition in drylands: global synthesis and meta-analysis. *J Hydrol.* 2019;568:638–645.
- [18] Cayuela C, Llorens P, Sánchez-Costa E, et al. Effect of biotic and abiotic factors on inter-and intra-event variability in stemflow rates in oak and pine stands in a Mediterranean mountain area. *J Hydrol.* 2018;560:396–406.
- [19] Bulcock H, y Jewitt G. Field data collection and analysis of canopy and litter interception in commercial forest plantations in the KwaZulu-Natal Midlands, South Africa. *Hydrol Earth Syst Sci.* 2012;16(10):3717–3728.
- [20] Tamosiunas M. Complejo Forestal. In: Vassallo M, editor. *Dinámica y competencia intrasectorial en el agro: Uruguay 2000-2010*. Montevideo: Facultad de Agronomía; 2012. p. 105–122.
- [21] Resquin F, Duque-Lazo J, Acosta-Muñoz C, et al. Modelling Current and Future Potential Habitats for Plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. *Forests.* 2020;11(9):948. doi: 10.3390/f11090948
- [22] INUMET. Estadísticas climáticas del período 1991-2020. Instituto Uruguayo de Meteorología. 2022. [accedido 2022 Aug 4]. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- [23] Dunkerley D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrol Process.* 2000;14(4):669–678.
- [24] Silveira L, Alonso J, y Martínez L. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay.* 2006;10(2):75–93.
- [25] Vernimmen RRE, Bruijnzeel LA, Romdoni A, et al. Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *J Hydrol.* 2007;340(3–4):217–232.
- [26] Besteiro S. Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura pampeana [Tesis Doctoral] Universidad Nacional de La Plata; 2014. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/33806/Documento_completo_.pdf?sequence=1
- [27] Mateos Rodríguez AB, y Leco F. Distribución espacial de la lluvia sobre el suelo en la dehesa: influencia de la poda del arbolado. Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario. 2010;24(3–4):41–51.
- [28] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8) Volume I - Measurement of Meteorological Variables. Geneva Switzerland: World Meteorological Organization; 2021.
- [29] Ford E, y Deans J. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka Spruce plantation. *J Appl Ecol.* 1978;15(3):905–917.
- [30] Perazza G, Alonso J, Pais P. Development of new equipment for measurement of rainfall interception in eucalyptus planted forests. *HydroSenSoft Symposium*; Madrid. 2017. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=19564>
- [31] JCGM. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1). 2008.
- [32] Herbst M, Rosier PT, McNeil DD, et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agric Forest Meteorol.* 2008;148(11):1655–1667.
- [33] Peláez JJZ. Hidrologia comparativa em bacias hidrográficas com eucalipto e campo. [Tesis doctoral]. Universidad Federal de Santa Maria, Brasil; 2014 [accedido 2023 Jun 6]. Disponible en: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/21387>
- [34] Benyon RG, Doody TM. Comparison of interception, forest floor evaporation and transpiration in *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydro Proc.* 2015;29(6):1173–1187. doi: 10.1002/hyp.10237
- [35] Kottogoda NT, y Rosso R. Random variables and their properties. Applied statistics for civil and environmental engineers. United Kingdom: Blackwell Publishing, Chichester; 2008. p. 83–164.
- [36] Caffo B. Residuals, variation, diagnostics. A companion book for the Coursera Regression Models class. Victoria BC Canada: Lean Publishing; 2015. p. 137.
- [37] Wickham, Wickham H, Averick M, et al. Welcome to the tidyverse. *J Open Source Software.* 2019;4(43):1686.
- [38] Kassambara A. ggpubr: ‘ggplot2’ based publication ready plots. Rpackage version 0.4.0. 2020. [cited 2022 July 2]. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>.
- [39] Aphalo PJ. ggpmisc: miscellaneous Extensions to ‘ggplot2.’ R package version 0.5.0. 2022. [cited 2022 June 9]. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=ggpmisc>.
- [40] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. Vienna Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2022. [cited 2022 June 20]. Available from: <https://www.R-project.org/>
- [41] Ferreto DOC, Reichert JM, Cavalcante RBL, et al. Rainfall partitioning in young clonal plantations *Eucalyptus* species in a subtropical environment, and implications for water and forest management. *Int Soil Water Conserv Res.* 2021;9(3):474–484.
- [42] Nívar J. Modeling rainfall interception loss components of forests. *J Hydrol.* 2019. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.124449
- [43] Coops NC, Tompalski P, Goodbody TR, et al. Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: a review of approaches and future trends. *Remote Sens Environ.* 2021;260:112477.

Apéndice A

Los residuos de los modelos de regresión, calculados como la diferencia entre los valores medidos de la variable de respuesta y los valores ajustados mediante la regresión se analizan según: i) histograma; ii) residuos vs variable ajustada; iii) diagramas cuantil-cuantil. Se reportan aquí los gráficos de ese análisis residual para la precipitación directa (Figura A1–A3), el escurrimiento fustal (Figura A4–A6) y la interceptación (Figura A7–A9).

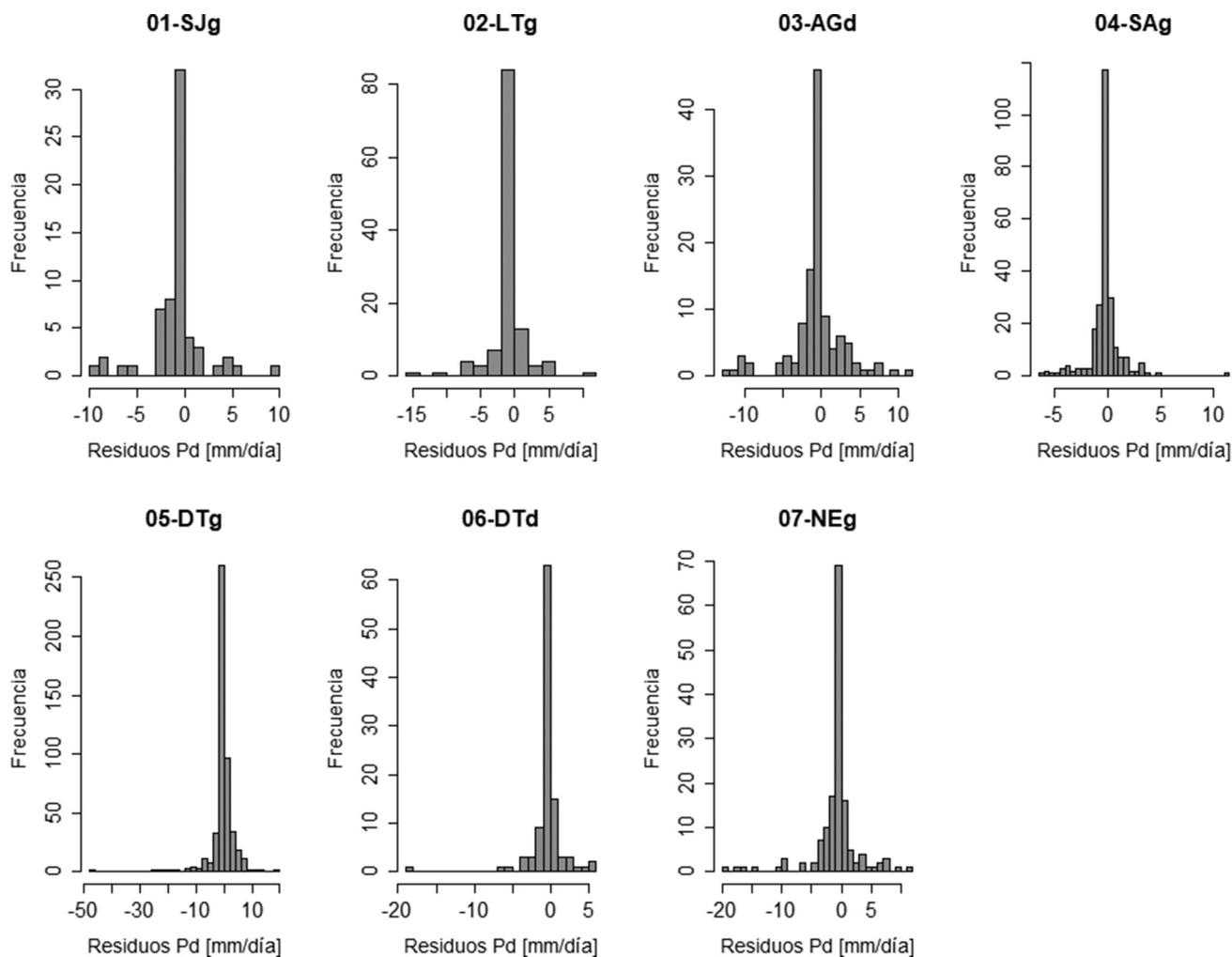


Figura A1. Histogramas de los residuos de la regresión entre precipitación directa y precipitación total (Pd–P) en cada parcela experimental.

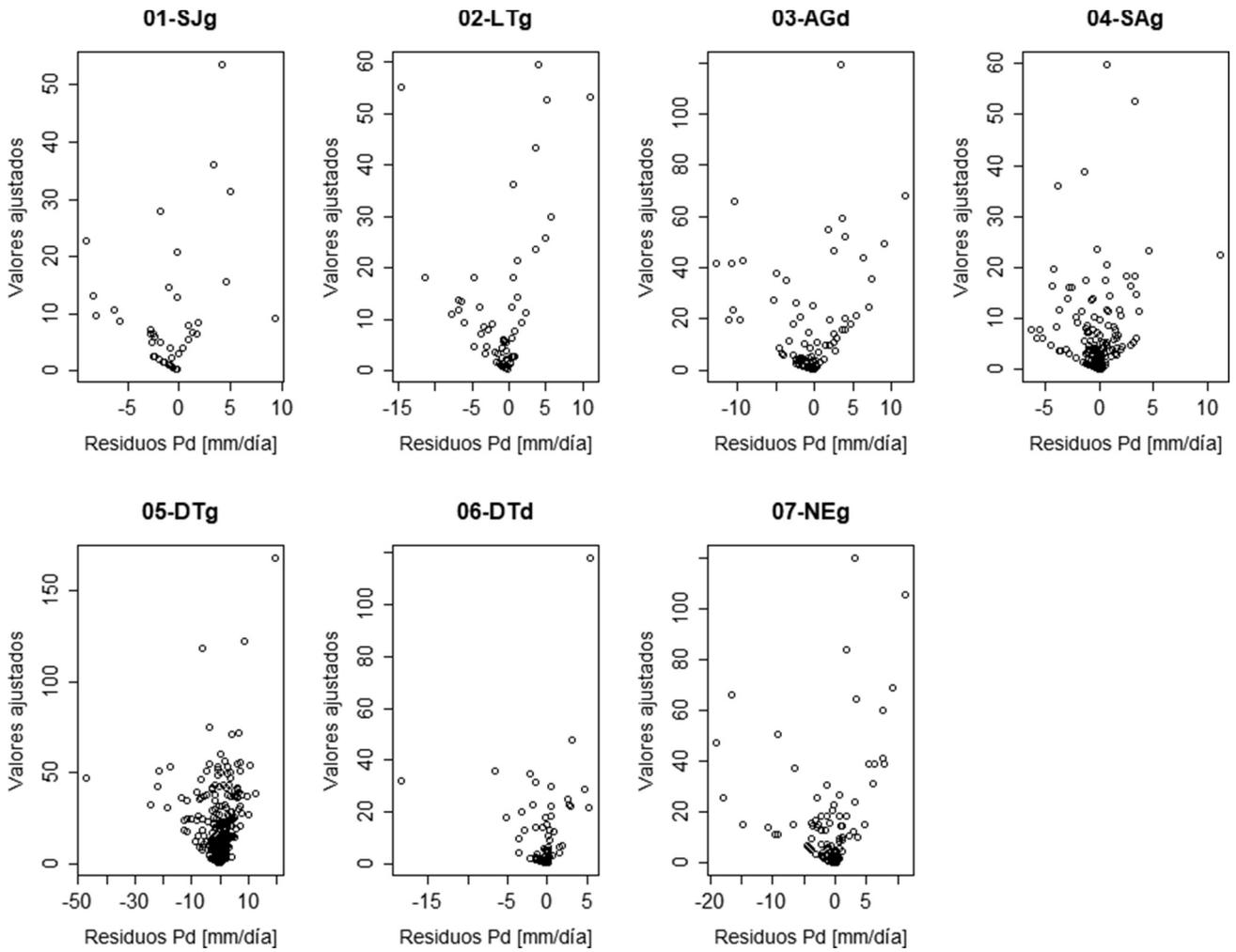


Figura A2. Residuos vs valores ajustados en la regresión entre precipitación directa y precipitación total (Pd-P), en cada parcela experimental.

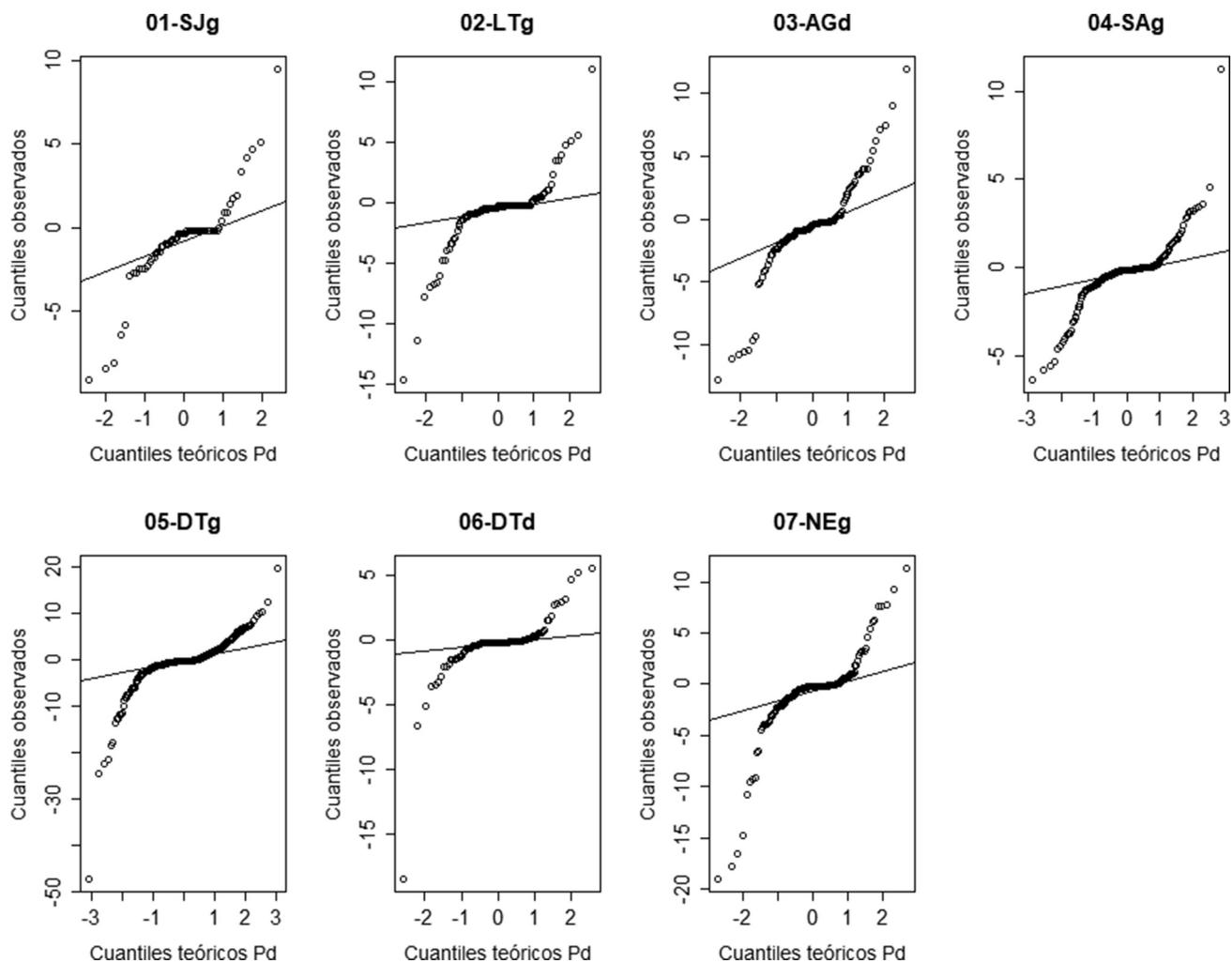


Figura A3. Cuantiles de residuos en la regresión entre precipitación directa y precipitación total (Pd-P), en cada parcela experimental.

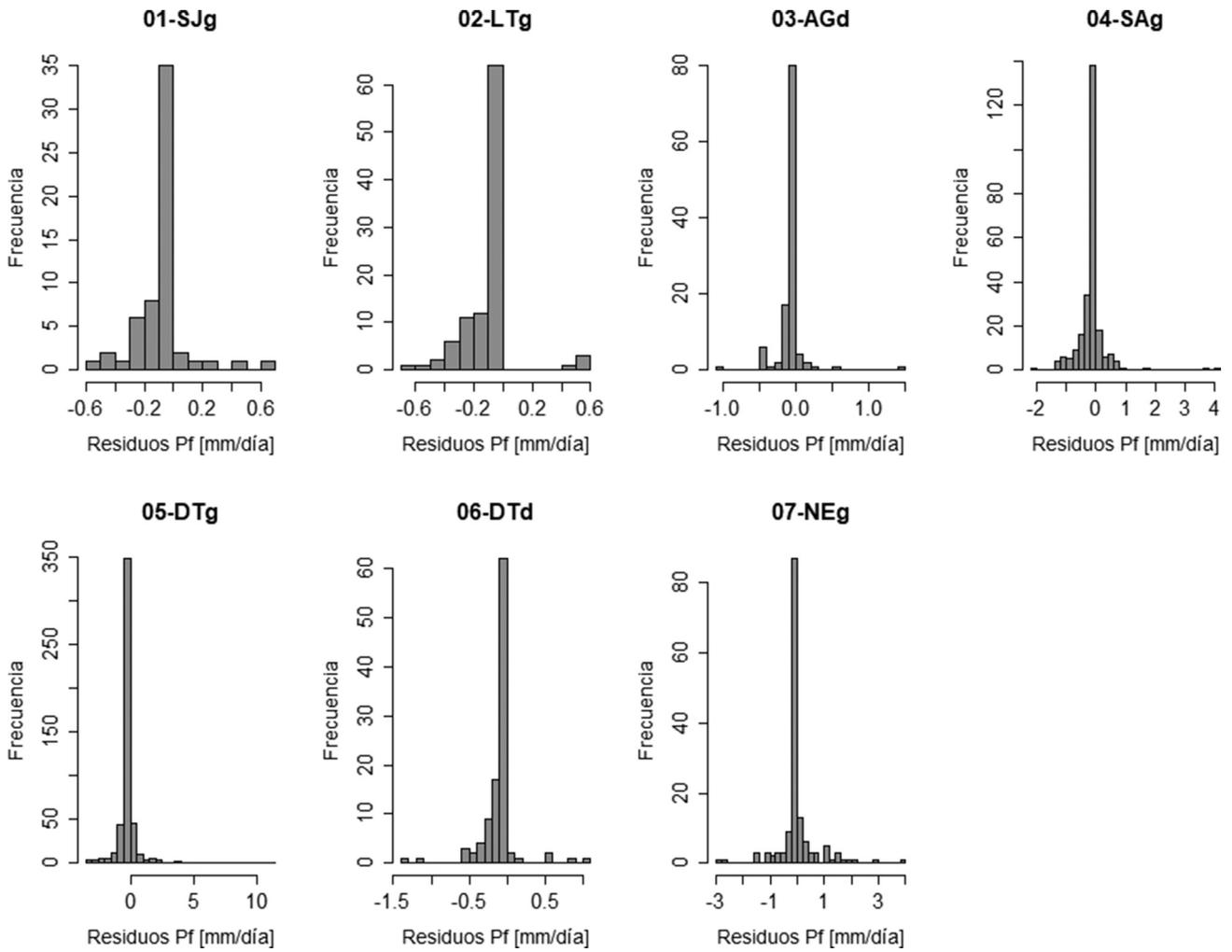


Figura A4. Histogramas de los residuos de la regresión entre escurrimiento fustal y precipitación total (Pf-P) en cada parcela experimental.

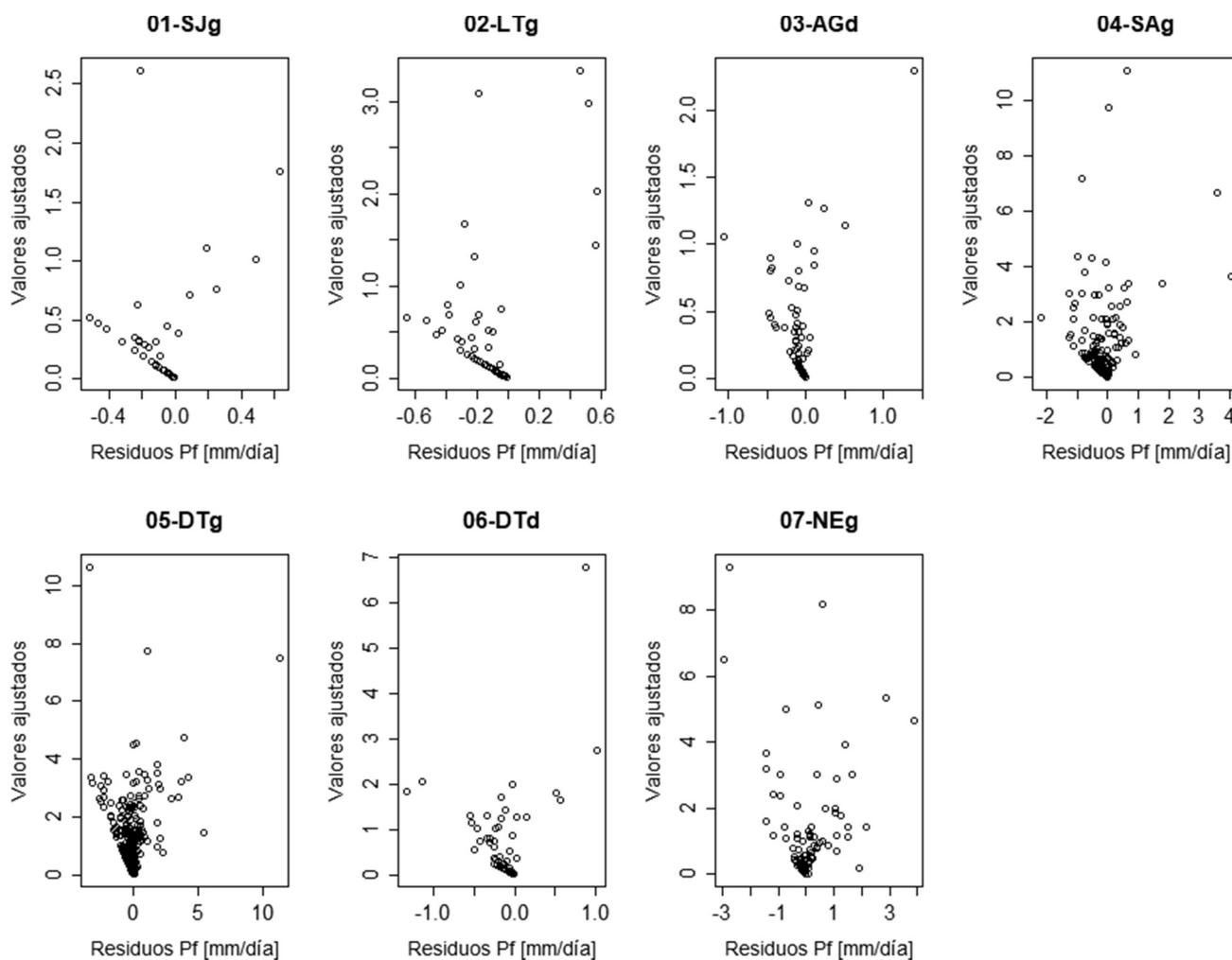


Figura A5. Residuos vs valores ajustados en la regresión entre escurrimiento fustal y precipitación total (Pf-P) en cada parcela experimental.

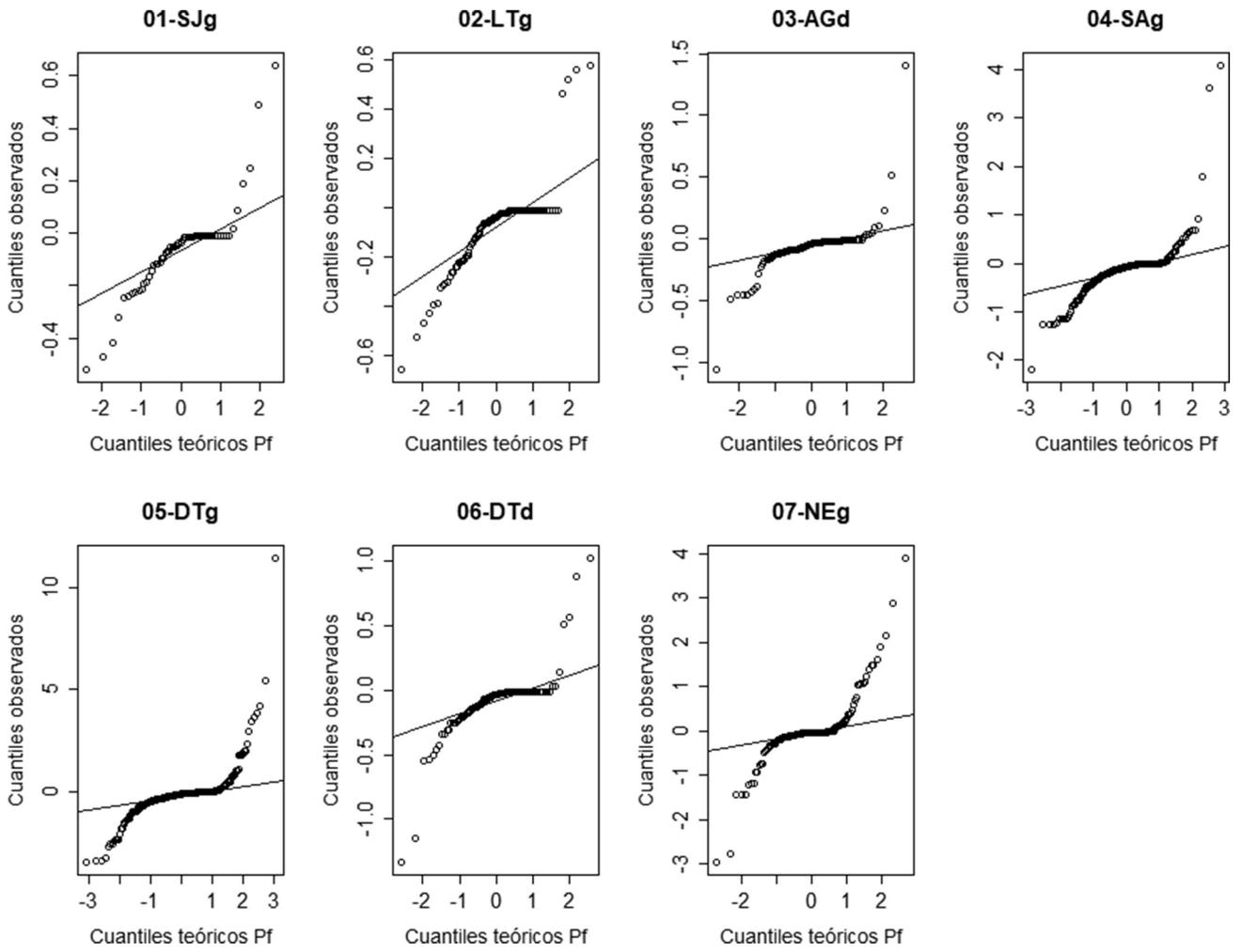


Figura A6. Cuantiles de residuos en la regresión entre escurrimiento fustal y precipitación total (Pf-P) en cada parcela experimental.

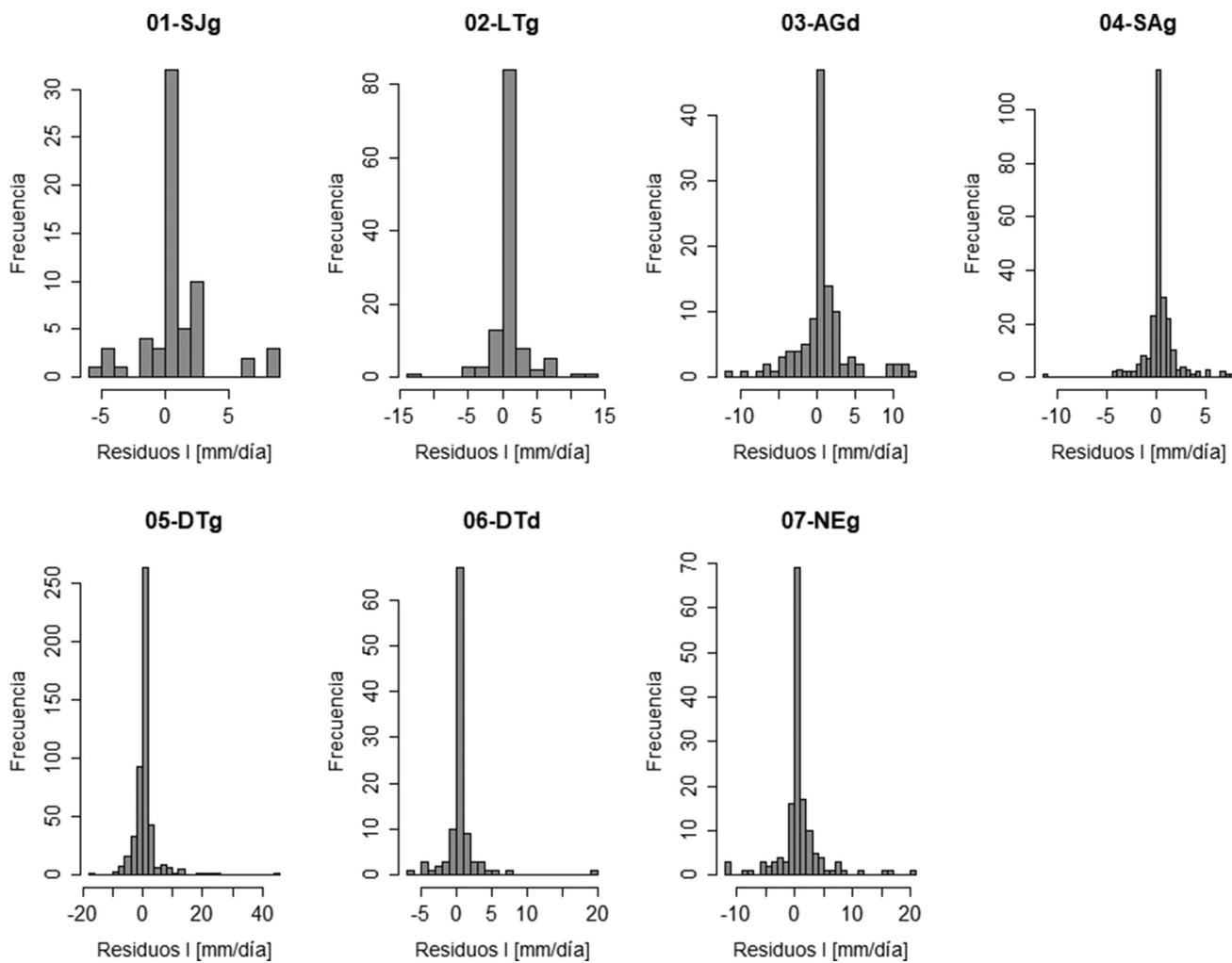


Figura A7. Histogramas de los residuos de la regresión entre interceptación y precipitación total (I-P) en cada parcela experimental.

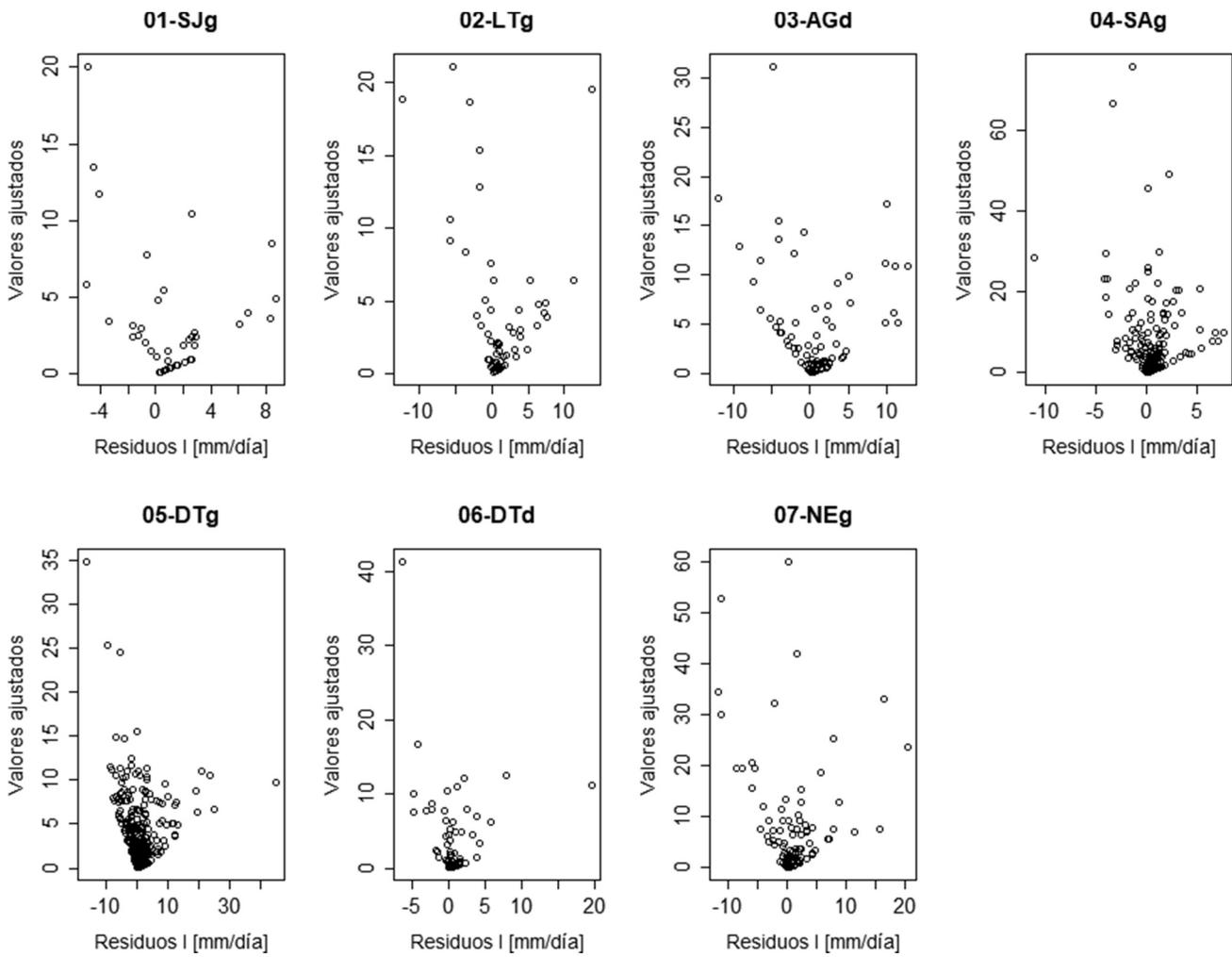


Figura A8. Residuos vs valores ajustados en la regresión entre interceptación y precipitación total (I-P) en cada parcela experimental.

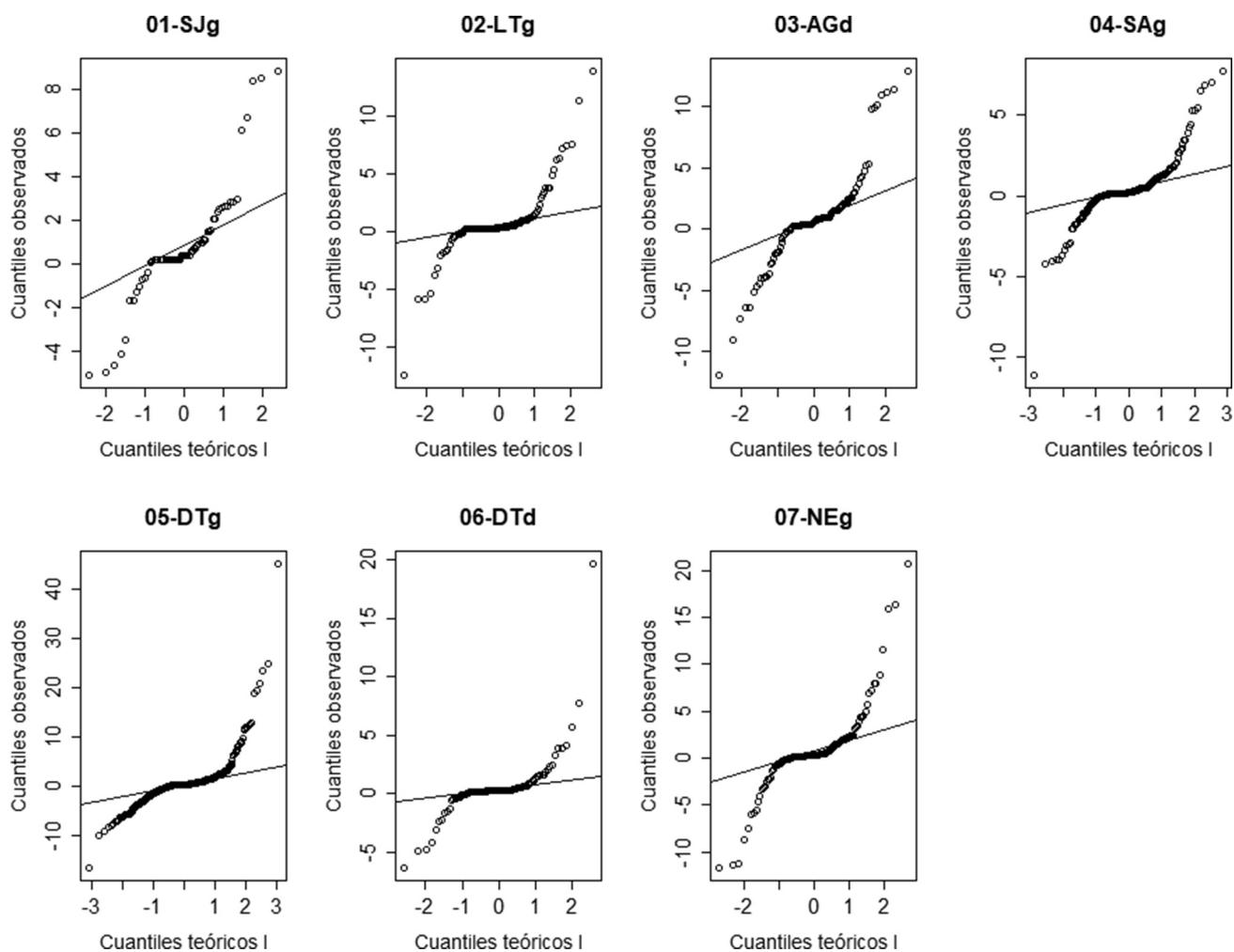


Figura A9. Cuantiles de residuos en la regresión entre interceptación y precipitación total (I-P) en cada parcela experimental.