

# “Consecuencias del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica del agua en dos sistemas semiáridos”

**Mayra Milkovic**

Lic. En Ciencias Biológicas, 2005.  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,  
Universidad de Buenos Aires.

*Tesis presentada para optar al título de  
Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área: Recursos Naturales  
Escuela para Graduados: Alberto Soriano*



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## COMITÉ CONSEJERO

Consejero principal

**José M. Paruelo**

Ingeniero Agrónomo, Facultad Agronomía,  
Universidad de Buenos Aires.  
Ph D. Colorado State University, USA.

Consejero

**Marcelo D. Nosetto**

Ingeniero Agrónomo, Facultad de Ciencias Agropecuarias,  
Universidad Nacional de Entre Ríos.

Doctor en Ciencias Agropecuarias, Facultad Agronomía,  
Universidad de Buenos Aires.

**JURADO DE TESIS**

**Dr. Javier Gyenge**

**Dr. César Mario Rostagno**

**Dr. José María Paruelo**

**16 de noviembre de 2011**

## DEDICATORIA

*“Las tesis son espejos vivos y casi me atrevería a decir delatadores, del grado de robustez del post-grado. La elección del tema y la adecuada identificación del problema, la confección del proyecto, el potencial heurístico de las hipótesis, el desarrollo prolijo de las indagaciones, la calidad intrínseca de los resultados y la medulosidad de la discusión son todos elementos en los que se transparenta el relieve de la formación alcanzada. Como con mirada estereoscópica pueden descubrirse en ellos las elevaciones, las planicies y las hondonadas. En las tesis es posible apreciar el modo y el grado en que la relación estudiante-profesores-ambiente (ambiente humano, académico, científico) ha logrado que eclosione y se pula la capacidad de cada candidato para la observación, la reflexión crítica, la labor creativa y la comunicación oral y escrita”.*

Alberto Soriano

A mis padres.

## AGRADECIMIENTOS

A pesar de considerarme una persona con alto grado de curiosidad, rara vez me he detenido a leer los agradecimientos de las tesis que pasaron por mis manos. No por considerarla una sección poco interesante sino más bien por lo personal.

Quisiera agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica porque financió durante tres años este trabajo. A la Facultad de Agronomía que permitió el desarrollo de este posgrado. Al personal de la Escuela para Graduados y del IFEVA en general, por resolver desde cuestiones administrativas hasta brindar consejo u aclarar dudas en distintas instancias de esta tesis.

A mis directores, José y Marcelo. Estas líneas me permiten plasmar por escrito lo agradecida que estoy por haberme dirigido cada uno a su forma y a su tiempo. Gracias por ubicarse cada uno en su rol y cumplirlo, por complementarse en sus comentarios, responder y resolver. No sólo pude cursar y defender un trabajo de posgrado sino que pude adquirir criterio y sentirme independiente aún sabiéndome observada en el proceso y por sobre todas las cosas, pude disfrutarlo. Son para mí una referencia de dedicación y buena voluntad en el ámbito académico y profesional.

A mis compañeritas de oficina, Paola gracias por tus historias que tanto atraparon mi atención y Vicky, que te puedo decir en un par de líneas, compartir contigo todos los días fue tranquilo, divertido y con buen humor. Me dieron siempre ganas de abrir la puerta para trabajar!! Les agradezco haber generado un ambiente de trabajo calmo, libre de roces, que invitara a la concentración y que hicieran de lo cotidiano una experiencia realmente agradable. A Ceci y Coni con quienes compartí mis primeros pasos en la docencia universitaria, gracias por las charlas, las risas y los momentos de catarsis. Disfruté mucho compartir con ustedes.

A mis amigos extranjeros, Elisa y Ernesto. Por un lado les escribo las gracias por ayudarme en las primeras instancias de la tesis. Pioneros en su género, fue raro que en pocos meses haya generado un vínculo tan cercano con dos personas que sabía se iban al poco tiempo. Sin embargo, he compartido con cada uno, mis decisiones profesionales y personales. Elisa, guapa, cuánto más básicos hubieran sido mis veranos sin ti. Fuiste la disparadora de más de una reflexión y siempre estaré agradecida por ello. Ernest, sin tus horas y horas de ayuda, sin nuestros encuentros ideológicos ni la creación de los scripts, en especial el tragaroi, temperator y etclimax este trabajo lo hubiera terminado por lo menos medio año después.

A Marcos, primero por ser así, como sos, mi persona preferida para pelear y molestar. Gracias por tu ayuda con los programas en R, tu “paciencia” y por sobre todo, por tu humildad. Marquitos, vos mereces más que este cumplido pero como ambos sabemos, lo que importa no se escribe en pocos renglones. A Lola y Flor que por ayudarme a resolver tantas cuestiones logísticas y burocráticas. Por ser personas resolutas y concretas, dispuestas a ofrecer consejos. A Mariano, gracias por tus observaciones y comentarios y buena disposición en todo este tiempo. A todos los

técnicos y pasantes del LART, en especial a Agustín R y a Pablo que le han puesto una buena dosis de humor. A Domingo Alcaraz comentarios y su gran ayuda, decisiva, con el tragaroi!

A mis seres personales, ese conjunto de seres que valga la redundancia hace de mí una persona más “equilibrada”, que forman parte del otro lado, de mi vida no profesional, que son mi cable a tierra y que si bien no contribuyeron de manera directa en este posgrado, hicieron mi vida más balanceada. Y que son tan necesarios día a día donde estén para que haya podido desenvolverme. Aunque se que la gran mayoría de ustedes no va a leer estas líneas, quiero tenerlos aquí.

A mis amigos que están lejos: Ceci, Luli, Tami, Dieguín, Dolo y Dani. Mi vida hubiera sido mucho más triste sin ustedes formando parte de ella, son mis amigos que no están todos los días pero que a través de ustedes pude en todo momento estar conforme con mis elecciones profesionales. Los extraño tremendamente y así como cada despedida fue un poco de mí que se fue con ustedes, también me hizo más fuerte y saber que es importante en un amigo, donde fuera que esté.

A mis amigos que están cerca: Nuky, Fa, Juanillo, Ursu, Miri, María, Ana, Pachu, Analía, Lili y Cata por ser, estar, compartir y escuchar. Por hablar de temas “comunes” y hacerme sentir una persona más. Gracias a cada uno por ser mi amigo y dejarme ser parte de sus vidas.

A Maxi, Nacho y en especial a Cris, mi docentes artísticos. Gracias por enseñarme y no ser egoístas con sus conocimientos, sus oficios y sus trayectorias. Por inspirarme, estimularme, enseñarme, seguirme el ritmo y darme espacio para fusionar mi profesión en el arte. Cris, definitivamente fuiste una de las personas que en el último tiempo ha influido de manera significativa en mis elecciones profesionales y personales.

Por último y no por ello menos importante, a mi núcleo familiar. Mis hermanos, mi sobrina, mis tíos, mis padres y mis gatos. Por ser mi familia, porque no podría haber tenido mejor familia que ustedes. Gracias por su cariño y su constante atención, por traerme, buscarme, esperarme, llevarme, preocuparse y ocuparse. Papis, gracias por respetar mis tiempos y mis espacios, por mimarme, consentirme, malcriarme y darme todos los gustos. Pero sobre todo, gracias por haberme dado la libertad de elegir, a ustedes les dedico una parte de este trabajo que fue en gran parte posible a su ayuda y su apoyo incondicional. Este trabajo refleja de buena manera, el resultado de sus esfuerzos, su amor, sus valores y su crianza. La otra parte de este trabajo, se la dedico a mis dos gatos, compañeros incondicionales. Luther, que ya se fue, y Gandhi, cuyo afecto es indescriptible. Dichosa fui y soy por tener, durante tanto tiempo, semejante compañía y tremenda magnitud de cariño. Por último, una dedicación especial para mí, qué bueno! Leí, estudié, escribí, analicé, escribí más, leí más, discutí, defendí, entregué, expuse y terminé. Final de esta etapa.

## **DECLARACION**

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Mayra Milkovic

**20 de abril de 2011**

## ÍNDICE GENERAL

### Capítulo 1 – Introducción general

|                                                         |   |
|---------------------------------------------------------|---|
| 1.1 Introducción                                        | 2 |
| 1.2. Objetivos generales y específicos de cada capítulo | 6 |
| 1.3. Organización de la tesis                           | 6 |
| 1.4. Áreas de estudio                                   | 7 |
| 1.5. Aproximación metodológica                          | 8 |

### Capítulo 2 – “Efecto de las plantaciones de *Pinus ponderosa* sobre las pérdidas de agua por evapotranspiración en el noroeste de la estepa patagónica”.

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2.1. Introducción</b>                                                         | 11 |
| Objetivos específicos                                                            | 14 |
| <b>2.2. Aproximación metodológica</b>                                            | 15 |
| 2.2.1. <u>Descripción del área de estudio</u>                                    | 15 |
| 2.2.2. <u>Ubicación de sitios y selección de imágenes satelitales</u>            | 16 |
| 2.2.3. <u>Estimación de evapotranspiración</u>                                   | 19 |
| 2.2.4. <u>Datos climáticos</u>                                                   | 22 |
| 2.2.5. <u>Análisis de datos</u>                                                  | 22 |
| <b>2.3. Resultados</b>                                                           | 24 |
| 2.3.1. <u>Diferencias entre comunidades de estepas, mallines y forestaciones</u> | 24 |
| 2.3.2. <u>Dinámica temporal</u>                                                  | 25 |
| 2.3.3. <u>Diferencias entre forestaciones de distintas edades</u>                | 38 |
| <b>2.4. Discusión</b>                                                            | 42 |



## **Capítulo 3 – “Dinámica hidrológica de largo plazo en comunidades de estepa y plantaciones de *Pinus ponderosa* en el noroeste de la estepa patagónica”.**

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3.1. Introducción</b>                                                                                                                    | 47 |
| Objetivos específicos                                                                                                                       | 50 |
| <b>3.2. Aproximación metodológica</b>                                                                                                       | 51 |
| 3.2.1. <u>Descripción del modelo</u>                                                                                                        | 51 |
| 3.2.2. <u>Datos de entrada del modelo</u>                                                                                                   | 54 |
| 3.2.3. <u>Experimentos de simulación y análisis de los datos</u>                                                                            | 60 |
| <b>3.3. Resultados</b>                                                                                                                      | 61 |
| 3.3.1. <u>Variación en el largo plazo de las pérdidas por evaporación, transpiración y drenaje de la estepa y pinos de distintas edades</u> | 61 |
| 3.3.2. <u>Variación estacional de las pérdidas por evaporación, transpiración y drenaje de la estepa y pinos de distintas edades</u>        | 65 |
| 3.3.3. <u>Dinámica anual de la transpiración de la estepa y pinos de distintas edades en dos condiciones de precipitación contrastantes</u> | 68 |
| <b>3.4. Discusión</b>                                                                                                                       | 70 |

## **Capítulo 4- “Diferencias de funcionamiento de distintas unidades de vegetación del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar”.**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>4.1. Introducción</b>                                              | 75 |
| Objetivos específicos                                                 | 77 |
| <b>4.2. Aproximación metodológica</b>                                 | 78 |
| 4.2.1. <u>Descripción del área de estudio</u>                         | 78 |
| 4.2.2. <u>Ubicación de sitios y selección de imágenes satelitales</u> | 80 |
| 4.2.3. <u>Estimación de evapotranspiración</u>                        | 83 |
| 4.2.4. <u>Datos climáticos</u>                                        | 83 |
| 4.2.5. <u>Análisis de datos</u>                                       | 87 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>4.3. Resultados</b>                                                                     | 88  |
| <u>Diferencias entre espartales, pastizales y secanos con distinto grado de protección</u> | 88  |
| <i>Diferencias dentro y fuera del parque</i>                                               | 89  |
| <i>Tendencias en el tiempo</i>                                                             | 91  |
| <b>4.4. Discusión</b>                                                                      | 93  |
| <br>                                                                                       |     |
| <b>Capítulo 5 – Discusión general</b>                                                      |     |
| 5.1. Principales resultados y consideraciones finales                                      | 95  |
| 5.2. Perspectivas futuras                                                                  | 97  |
| <br>                                                                                       |     |
| <b>Bibliografía</b>                                                                        | 98  |
| <br>                                                                                       |     |
| <b>Apéndice I</b>                                                                          | 113 |
| <b>Apéndice II</b>                                                                         | 116 |
| <b>Apéndice III</b>                                                                        | 119 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 2.1.</b> Número de sitios por fecha y cobertura ubicados en la planicie El Maitén en las 11 imágenes Landsat 7 ETM+ analizadas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 19 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Características radiométricas, térmicas y evaporativas de estepas, forestaciones de <i>Pinus ponderosa</i> y mallines. Se presentan los valores medios diarios y errores estándares (E.E.) de las variables: albedo, diferencia térmica (Ts-Ta), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) y Absorbida por la vegetación (RFAA) y la evapotranspiración actual (ET) estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+ en forestaciones, estepas y mallines. | 25 |
| <b>Tabla 3.1.</b> Parámetros utilizados para caracterizar la vegetación considerada en las simulaciones del modelo. Los tipos de planta considerados fueron caracterizados por las siguientes especies: <i>Adesmia campestris</i> (ADL), <i>Mulinum spinosum</i> (ADNL), <i>Senecio filaginoides</i> (ASV), <i>Pappostipa speciosa</i> (GRAX), <i>Bromus pictus</i> (GRAM), <i>Adesmia lotoides</i> (HERB) y <i>Pinus ponderosa</i> (PINO).                                                            | 53 |
| <b>Tabla 3.2.</b> Simulaciones del modelo según la condición inicial de las comunidades de estepa y la edad de las plantaciones de pino.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 59 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Características de los sitios dentro y fuera del PNCGN analizados en las 7 fechas Landsat 5 TM para tres tipos de vegetación: espartal, pastizal y seco.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 84 |
| <b>Tabla 4.2.</b> Características radiométricas, térmicas y evaporativas de espartales, secanos y pastizales ubicados dentro del PNCGN y en un área lindante al mismo. Se presentan los valores medios diarios y errores estándares (E.E.) de las variables: albedo, diferencia térmica (Ts-Ta), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA) y                                                                                                            |    |

Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) y tasa actual de evapotranspiración (ET) estimados a partir de imágenes Landsat 5 TM. 88

**Tabla 4.3.** Diferencias de la tasa actual de evapotranspiración (ET), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA), la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) y el cociente (RFAA/ET) entre espartales, secanos y pastizales ubicados dentro del PNCGN (D) y en un área lindante al mismo (F). Se indica el número de fechas de cada diferencia y cuántas de ellas fueron significativas ( $p < 0.05$ ). 90

**Tabla 4.4.** Valores de bondad de ajuste ( $R^2$ ) y pendientes (m) de las regresiones lineales para espartales (Esp), secanos (Sec) y pastizales (Pas) ubicados dentro del PNCGN (D) y en un área lindante al mismo (F). Se indica con (\*) los valores  $p < 0.01$  y en cursiva se resaltan los valores  $p < 0.05$ . 91

**Tabla 4.5.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) en espartal, pastizal y seco de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ). 116

**Tabla 4.6.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) en espartal, pastizal y seco de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ). 120

**Tabla 4.7.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) en espartal, pastizal y seco de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del

PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ). 120

**Tabla 4.8.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) en espantal, pastizal y seco de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ). 121

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Zona de estudio, planicie El Maitén y sus alrededores ubicados en el noroeste de la estepa patagónica. 17
- Figura 2.2.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) en comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). 28
- Figura 2.3.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). 31
- Figura 2.4.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). 34
- Figura 2.5.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) en comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). 37
- Figura 2.6.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) de forestaciones de *Pinus ponderosa* de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). 38
- Figura 2.7.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). 39
- Figura 2.8.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). 40

**Figura 2.9.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). 41

**Figura 2.10.** Simulación sobre la disponibilidad hídrica de una cuenca según la superficie de estepa forestada. 43

**Figura 3.1.** Dinámica anual del EVI para estepas y forestaciones de 13 y 25 años estimado a partir de la serie de imágenes MODIS del año 2004. Cada punto indica el valor promedio de EVI por fecha para cada cobertura. 56

**Figura 3.2.** Distribución de las precipitaciones entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: -42°04' S, longitud: 71°09' O). Cada barra indica la lámina total anual. 59

**Figura 3.3.** Variación de la temperatura media entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: -42°04' S, longitud: 71°09' O). Cada punto indica el valor promedio anual de la temperatura media. 59

**Figura 3.4.** Flujos totales de pérdida de agua por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de la estepa no degradada (est noD), condición inicial de estepa degradada (est D) en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años y condición de *Pinus ponderosa* de 25 años en ausencia de estepa. 63

**Figura 3.5.** Dinámica en el largo plazo (interanual) de los flujos de pérdida por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de estepa degradada en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años (paneles A y C), condición inicial de la estepa no degradada (panel B) y condición de *Pinus ponderosa* de 25

años en ausencia de estepa (paneles **D**). Cada punto indica el valor total anual de cada flujo en el período 1984-2004. 64

**Figura 3.6.** Dinámica anual de los flujos de pérdida por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de estepa degradada en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años (paneles **A** y **C**), condición inicial de la estepa no degradada (panel **B**) y condición de *Pinus ponderosa* de 25 años en ausencia de estepa (paneles **D**). Cada punto indica el valor mensual promedio de cada flujo en el período 1984-2004. 67

**Figura 3.7.** Dinámica anual de la transpiración de la estepa (T) en tres escenarios: estepa degradada (D) en ausencia y presencia de pinos de 13 años (D c/pino) y estepa no degradada (noD) en dos años de condiciones climáticas distintas 1998 (**A**) y 2002 (**B**), cuyas precipitaciones fueron 189 mm y 509.5 mm respectivamente. Cada punto indica el valor de transpiración semanal. Dentro de cada panel se muestra la distribución mensual de las precipitaciones. 69

**Figura 3.8.** Dinámica anual de la transpiración (T) de pinos de 13 y 25 años simulada en dos condiciones de la estepa: degradada (**A** y **C**) y no degradada en (**B** y **D**) dos años de condiciones climáticas distintas 1998 (**A**) y 2002 (**B**), cuyas precipitaciones fueron 189 mm y 509.5 mm respectivamente. Cada punto indica el valor de transpiración semanal. Dentro de cada panel se muestra la distribución mensual de las precipitaciones. 69

**Figura 3.9.** Distribución del valor promedio mensual de las precipitaciones entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén. 118

**Figura 3.10.** Variación de la temperatura media mensual entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén. 118



**Figura 4.1.** Zona de estudio, Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (PNCGN) y área lindante, ubicados al sur de Almería. 83

**Figura 4.2.** Distribución de las precipitaciones entre los años 1984 y 2005 de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería. 86

**Figura 4.3.** Variación de la temperatura media entre los años 1984 y 2005 de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería. 86

## LISTA DE ABREVIATURAS

LANDSAT TM: Thematic Mapper

LANDSAT ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus

ET: Evapotranspiración

RFAA: Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida

fRFAA: fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa Interceptada por la vegetación

RFA: Radiación Fotosintéticamente Activa incidente

EVI : Enhanced Vegetation Index

D: Drenaje profundo

Te: Transpiración de las comunidades de estepa

Tp: Transpiración de *Pinus ponderosa*

E: Evaporación

PNCGN: Parque Natural Cabo de Gata-Níjar

## **“Consecuencias del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica del agua en dos sistemas semiáridos”**

### **RESUMEN**

En los sistemas áridos, la disponibilidad de agua es el principal control de los procesos ecosistémicos. La vegetación ejerce un rol importante sobre los flujos de entrada y salida de agua del sistema, que se verían afectados por cambios en el uso del suelo. En esta tesis se exploraron dos cambios de uso del suelo en distinto sentido, la forestación de pastizales en el noroeste de la estepa patagónica y la delimitación de un área protegida del sureste de la península Ibérica. Para el análisis de los flujos hídricos, se combinaron dos aproximaciones, la percepción remota y un modelo de simulación. En Patagonia, las forestaciones evapotranspiraron un 20% más que la estepa y un 28% menos que las praderas húmedas (mallines), siendo la transpiración el flujo más afectado. La ausencia de drenaje profundo (aporte indispensable en el balance hídrico de los mallines aledaños) en escenarios forestados, sugeriría que las consecuencias de este tipo de cambio de uso del suelo sobre el rendimiento hídrico de la región se verificarían a escala de paisaje. En el sureste de España la tendencia de la radiación absorbida por la vegetación dentro del parque fue mayor que fuera del mismo. Esto sugeriría que están ocurriendo cambios de distinta magnitud en las situaciones con distinto grado de protección y que la detección de esos cambios requiere de décadas. Cabe destacar entonces, la importancia de evaluar en el corto y largo plazo, no solo la magnitud sino también el sentido de cambio de funcionamiento de los ecosistemas asociados a distintos cambios de uso del territorio, en particular aquellos asociados a la dinámica del agua y el flujo de energía.

*Palabras claves: evapotranspiración, cambio de vegetación, balance hídrico.*

## **“Consequences of land-use changes on water dynamics in two semiarid systems”**

### **ABSTRACT**

In arid systems, water availability is the main control of ecosystem processes. Vegetation plays a major role in determining the input and outputs of water the system. Such flows, in turn, would be affected by land use changes. In this thesis I explored the effect of opposite land use changes on water dynamics, the afforestation of grasslands in the northwest of the patagonian steppe and the delimitation of a protected area in the southeast of the Iberian Peninsula. The analysis was based on two approaches, remote sensing and model simulation. In Patagonia, afforestation evapotranspired 20% more than the steppe and 28% less than wetlands, being transpiration the most affected flow. The absence of deep drainage (a contribution to the water balance of the surrounding wetlands) in forested scenarios, suggests that the consequences of this kind of land use change on water yield would occur at the landscape level. In southeastern Spain, the trend of the radiation absorbed by vegetation inside the park was higher than outside. This would suggest that ecosystem functioning changes are occurring with different magnitude in areas with different level of protection and that the detection of these changes would require decades. It should be noted the importance of assessing, in both the short and long term, not only the magnitude but also the trend of changes in the ecosystem functioning associated with different land use changes, particularly those related to water dynamics and energy flow.

*Keywords: evapotranspiration, vegetation change, water balance.*

# **Capítulo 1 – Introducción general**

## 1.1 Introducción

El cambio en el uso del suelo es uno de los principales componentes de cambio global (Vitousek, 1994; Foley, 2009). Las transformaciones asociadas al reemplazo de bosques por cultivos o pasturas (deforestación) han recibido una gran atención, tanto en ámbitos académicos como periodísticos (Fearnside, 1996; Sud et al., 1996; Zhang et al., 1996; Danuse et al., 2002; Morton et al., 2002; Skole, 2008; Shukla, et al., 2008). El cambio en sentido opuesto, es decir el reemplazo de pastizales o arbustales por forestaciones, es una transición que adquiere relevancia en las últimas décadas y cuyas consecuencias a nivel ecosistémico son menos conocidas (Jobbágy et al., 2004; Noretto et al., 2005; Jobbágy et al., 2006). Los cambios estructurales y funcionales asociados a la sustitución de pastizales por bosques afectan una cantidad importante de procesos ecológicos y por ende, pueden afectar la provisión de servicios ecosistémicos (Jackson, 2001; Jobbágy et al., 2006). Los servicios ecosistémicos asociados a la dinámica del agua o del carbono, como por ejemplo la provisión de agua, la regulación de inundaciones, el secuestro de carbono, la protección de suelos, etc. (Sala y Paruelo, 1997), resultan particularmente sensibles a estos cambios en el uso del suelo (Noretto et al., 2005; Jobbágy et al., 2006).

Durante los últimos 30 años se han desarrollado distintos regímenes de promoción para la implantación de bosques cultivados en distintas áreas del país, ya sea a través de subsidios directos, beneficios fiscales o una combinación de ambos (Trevín, 2005). La superficie total de bosques implantados en Argentina al año 2002 cubría 1,2 millones de hectáreas (FAO, 2004). En el período 1990-2000 la tasa de cambio anual de plantaciones forestales fue de 31.000 has/año (FAO, 2005). El 90% de la producción forestal que incluye madera aserrada, pulpa celulósica, tableros y papeles proviene de

estas plantaciones. El perfil productivo ha pasado a generar bienes de mayor valor agregado, esto permitió aumentar las exportaciones y generó un alto impacto económico y una complejización de la cadena productiva (SAGPyA, 2004). En la región patagónica (Neuquén, Río Negro y Chubut) se estimaron 2 millones de hectáreas aptas para la forestación con especies exóticas (SAGPyA, 1999) de las cuales al año 2002 se encontraban implantadas 70.000 has (FAO, 2004). Se prevé un aumento de esta superficie en las próximas décadas (Gyenge et al., 2009).

Los cambios en el uso del suelo no sólo implican algún tipo de “agriculturización”, ya sea con cultivos anuales o perennes (forestaciones); la protección de áreas que estuvieron sometidas al uso antrópico por décadas representa también una modificación del uso pero en un sentido distinto. Este tipo de cambio es particularmente importante en Europa con una impronta agrícola muy antigua y con una política activa de promoción de espacios protegidos (Guo, 2002; Paul, 2002). Entender como los distintos tipos de cambios en el uso del suelo impactan sobre el funcionamiento ecosistémico tiene una relevancia central para estimar cómo se modificará la provisión de servicios ecosistémicos (Millennium Ecosystem Assessment, 2003; Stephen et al., 2006).

El flujo de energía y el ciclo hidrológico reflejan aspectos claves del funcionamiento ecosistémico. La evapotranspiración, es un proceso ecosistémico que relaciona el balance de energía con el ciclo hidrológico (Chapin, 2002; Foley, 2003). Por un lado, el balance de energía de un sistema puede describirse como:

$$R_n = \lambda E + H + G + S + P$$

donde la radiación neta absorbida ( $R_n$ ) se disipa como flujo de calor latente ( $\lambda E$ ), flujo de calor sensible ( $H$ ) y flujo de calor al suelo ( $G$ ). La energía acumulada en la cubierta vegetal ( $S$ ) y la utilizada en el proceso de fotosíntesis ( $P$ ) son en general,

cuantitativamente menos importantes. Este balance puede estimarse mediante el uso de sensores remotos a partir de la radiación incidente y la diferencia instantánea entre la temperatura del aire y la temperatura superficial (Liang, 2000; Bastiaassen, 2000; Qin, 2001; Sobrino et al., 2004, Granger, 2000; Timmermans et al., 2007).

Por otro lado, el balance del hidrológico de un sistema puede describirse como:

$$P = ET + (\Theta_i - \Theta_{i-1}) + E + D$$

donde P es la precipitación en un período determinado que se pierde como evapotranspiración (ET), escorrentía (E) y drenaje profundo (D) o se almacena en el suelo ( $\Theta_i - \Theta_{i-1}$ ). La evapotranspiración es un flujo clave de este ciclo (Shukla, 1982; Brutsaert, 1986; Castillo y Sentis, 1996) sobre el que la vegetación, a través de su capacidad de acceso, transporte y evaporación del agua, ejerce un fuerte control (Chahine, 1992; Calder, 1998). En sistemas húmedos la evapotranspiración está principalmente limitada por la demanda atmosférica de vapor de agua, mientras que en condiciones áridas el principal control es la disponibilidad de agua en el suelo (Calder, 1998).

En las últimas décadas la disponibilidad de diversas técnicas (eddy covariance, isótopos estables, etc.) ha permitido mejorar la medición directa de diversos aspectos del funcionamiento ecosistémico como la productividad primaria, la descomposición de la materia orgánica edáfica, la dinámica del N en el suelo, la evapotranspiración o el balance de energía de la superficie (Sala et al., 2000). Pese a estos avances, cuestiones logísticas limitan el número y tipo de flujos a usar en la caracterización del funcionamiento ecosistémico. La creciente disponibilidad de sensores y plataformas que proveen los datos espectrales necesarios para el cálculo de atributos funcionales del ecosistema con distintas resolución espacial permite el estudio de un mismo proceso (por ej. la evapotranspiración o la productividad primaria) a distintas escalas espacio-



temporales usando el mismo protocolo de observación. Revisiones recientes del tema discuten distintos aspectos del uso de sensores remotos en la descripción del funcionamiento ecosistémico (Kerr y Ostrowski, 2003; Petorelli et al., 2005). Por otro lado, la estimación de flujos parciales de evaporación y transpiración mediante modelos de simulación permite, estimar flujos en el largo plazo (Feddes et al., 1988) en distintas condiciones del sistema e integrarlos a las estimaciones con sensores remotos.

En esta tesis se busca explorar las consecuencias del cambio de uso del suelo sobre la dinámica del agua. En el capítulo 2, se exploran los cambios en la evapotranspiración asociadas al establecimiento de árboles en sistemas originariamente dominados por estepas semiáridas. En el capítulo 3, se amplía este análisis mediante simulaciones de flujos hídricos en el largo plazo. En el capítulo 4, se exploran las diferencias de pérdidas evaporativas asociadas a cambios del uso del suelo en un sentido distinto, la instalación de un área protegida.

## **1.2. Objetivos generales y específicos de cada capítulo**

Los objetivos generales de esta tesis fueron: a) estimar variables biofísicas que permitieran analizar el funcionamiento de distintas coberturas en dos sistemas semiáridos en los cuales las direcciones de cambio fueran distintas, por un lado, la forestación de pastizales y por el otro la instalación de un área protegida en un área con una prolongada historia de uso antrópico y b) evaluar las diferencias de los efectos de dichos cambios sobre el funcionamiento de la vegetación y en particular, sobre la dinámica del agua. Para ello, se estimaron mediante sensores remotos, variables de funcionamiento ecosistémico tanto en las coberturas de referencia como en las de reemplazo. Las variables analizadas fueron, la fracción de la radiación interceptada, la radiación absorbida por los tejidos verdes y la evapotranspiración (Capítulos 2 y 4). Asimismo, en uno de los dos sistemas, se realizaron simulaciones de los flujos hídricos parciales con un modelo que permitiese analizar distintas condiciones iniciales de la vegetación (Capítulo 3).

## **1.3. Organización de la tesis**

En el Capítulo 1 se realiza la introducción general al tema de estudio, se presenta el problema, se ubica el contexto de las problemáticas abordadas, se describen los antecedentes y se plantean los objetivos generales de cada capítulo.

En el Capítulo 2 se presentan los resultados de las estimaciones de las pérdidas de agua por evapotranspiración (ET), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa Interceptada ( $fRFA$ ) y Absorbida (RFAA) por los tejidos verdes y el cociente  $ET/RFAA$  estimadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales en forestaciones

de distintas edades, estepas y praderas húmedas o mallines, ubicados en el noroeste de la estepa patagónica.

En el Capítulo 3 se presentan los resultados de las simulaciones anuales y en el largo plazo de la transpiración, la evaporación y el drenaje profundo estimados mediante un modelo de dinámica del agua (DINAQUA) para distintas condiciones del estado inicial de la estepa patagónica y considerando la presencia de pinos.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados de las estimaciones de las pérdidas de agua por evapotranspiración (ET), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa Interceptada (fRFA) y Absorbida (RFAA) por los tejidos verdes y el cociente ET/RFAA estimadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales en cultivos de secano, pastizales y espartales, comparando su funcionamiento dentro y fuera de un área protegida en el sureste de Almería.

En el Capítulo 5 se sintetizan, en el marco de lo ya conocido, los principales resultados de los objetivos planteados en la tesis. Se integran resultados de cada área de estudio, se jerarquizan las conclusiones y se plantean nuevos estudios.

#### **1.4. Áreas de estudio**

Se buscaron combinaciones de sitios que permitieran evaluar cambios de uso del suelo que representasen dos direcciones distintas de cambio y donde se pudieran analizar las consecuencias sobre la dinámica del agua. En particular, se trabajó en dos áreas ubicadas en zonas semiáridas con precipitaciones invernales, con alta proporción de suelo desnudo y cuyas formas de vida dominantes son gramíneas y arbustos, en su mayoría, con características xerofíticas. Estas áreas corresponden al NO de Patagonia y al SE de España. De este modo, algunos de los aspectos de funcionamiento de la

vegetación en ambas áreas de estudio pudieran ser comparables. Las estepas de los sitios de estudio en el noroeste de la Patagonia están dominadas por *Pappostipa speciosa* mientras que los espartales o matorrales de los sitios del sureste de la península Ibérica están dominadas por *Stipa tenacissima*. En los respectivos capítulos se profundiza en la descripción de las características específicas de los sitios experimentales.

Por otro lado, en el noroeste de la Patagonia, la plantación de especies siempreverdes para explotación forestal ha sido una actividad que se ha expandido notablemente en los últimos años. La especie más utilizada en la región es *Pinus ponderosa* por su rápido crecimiento en ambientes áridos. En el Capítulo 2 y 3 se buscó analizar la misma problemática mediante dos enfoques complementarios, la estimación de flujos parciales que consideren el balance de energía, como la ET y la simulación de flujos individuales, E, D y T en el largo plazo. En el Capítulo 4 en cambio, se buscó analizar las mismas variables de funcionamiento en un área donde el sentido de cambio es completamente distinto y poco frecuente. Un tipo de cambio que adquiere notable relevancia en los últimos años, la instalación de un área protegida.

## **1.5. Aproximación metodológica**

Para estimar evapotranspiración (ET) mediante sensores remotos se pueden separar las distintas metodologías en tres grandes grupos (Courault et al. 2003): los métodos indirectos, los métodos residuales del balance de energía y los métodos empíricos directos. Los métodos indirectos y los residuales consideran relaciones empíricas y modelos físicos para la parametrización de los componentes del balance de energía. Son más precisos pero de mayor complejidad en su aplicación que los métodos

directos. Estos últimos, consideran directamente la información satelital como entrada al modelo de balance de energía. El método desarrollado por Jackson et al. (1985) consiste en una aproximación sencilla y ampliamente utilizada denominada método simplificado de balance energético que se presenta en la sección 2.2.3. Se utilizó esta aproximación en los capítulos 2 y 4. Esta aproximación ha sido satisfactoriamente utilizada para estimar la evapotranspiración en distintos tipos de coberturas vegetales (pastizales, cultivos, bosques) (Caselles et al. 1998, Sanchez y Caselles 2004, Noretto et al. 2011).

Para estimar los flujos individuales de pérdida de agua en el largo plazo, se utilizó un modelo unidimensional que simula cada flujo a lo largo del perfil de suelo considerando distintos escenarios iniciales de la vegetación. Se usó esta aproximación en el capítulo 3.

## **Capítulo 2**

**Efecto de las plantaciones de *Pinus ponderosa* sobre las pérdidas de agua por evapotranspiración en el noroeste de la estepa patagónica.**

## 2.1. Introducción

Los cambios en el uso del suelo afectan distintos aspectos del funcionamiento y la estructura del ecosistema. Entre ellos se destacan los cambios en biodiversidad, modificaciones en el balance de C y en la dinámica del agua (Paruelo et al., 2001, Jobbágy et al., 2005; Jackson et al., 2005, Steffan-Dewenter et al., 2007). Entre las posibles dinámicas de los tipos de cobertura, el reemplazo de pastizales y arbustales por forestaciones ha sido particularmente poco estudiado, si bien en las últimas décadas se ha avanzado en este sentido (Jobbágy et al., 2006, Noretto et al., 2006, Silveira et al., 2006). Las forestaciones en general promoverían un aumento de las ganancias de carbono en biomasa pero, debido a la estrecha conexión a nivel de estoma entre los procesos de transpiración y fotosíntesis (Monteith, 1988), este aumento estaría acompañado de un mayor consumo de agua (Jackson et al., 2005, Gyenge et al., 2008).

En el noroeste de la estepa patagónica, los proyectos forestales se han presentado como una alternativa a la explotación ganadera debido al alto grado de deterioro que presentan las áreas destinadas a esta actividad (Laclau, 2003, Laclau, 2005). El área potencial de explotación forestal se ubica entre las isohietas de 1500 y 600 mm de precipitación anual, en una franja paralela a la Cordillera de los Andes (Laclau, 2005). Actualmente, la superficie forestada en el noroeste de la Patagonia cubre ~70.000 ha y su extensión potencial podría llegar a superar los dos millones de hectáreas. El 80% de las forestaciones corresponde a plantaciones de *Pinus ponderosa* que en su mayoría se destinan a madera aserrada, pulpa celulósica, tableros y papeles como productos finales (SAGPyA, 2004).

*Pinus ponderosa*, es una especie de conífera perenne, de crecimiento rápido y de cuidados relativamente simples. En la región patagónica, los insectos son los agentes de

daño más importantes en las plantaciones de pino siendo la avispa barrenadora *Sirex noctilio* el principal problema sanitario debido a sus niveles de daño y su amplia extensión (Gomez, 2008). Se ha adaptado muy bien a ambientes secos o áridos y presenta alta tolerancia a la salinidad (Broquen et al., 2002). Estudios previos han mostrado que esta especie de pino presenta mayor tasa de transpiración y consumo de agua que otras especies arbóreas nativas de la región como el ciprés (Gyenge et al., 2008a; Licata et al., 2008). En particular, el rendimiento de las plantaciones de *Pinus ponderosa* en la región patagónica ha sido alto, incluso mayor al obtenido en bosques nativos de la misma especie en el noroeste de Estados Unidos, su lugar de origen (Gonda, 2001, Licata et al., 2008). El rendimiento de *Pinus ponderosa* estimado para la región oscila entre 480 a 882 m<sup>3</sup>/ha con un crecimiento medio anual es de 14 a 23 a m<sup>3</sup>/ha (Laclau et al., 2002).

La implantación de pinos incrementa los reservorios de carbono, principalmente en biomasa y broza, respecto de las comunidades de estepa que reemplaza (Laclau, 2001, Noretto et al., 2006) por lo que ésta actividad podría cobrar un valor adicional en un mercado de bonos de carbono derivado de protocolo de Kyoto (Wright, 2000). Sin embargo, poco se conoce sobre el efecto que tienen estas plantaciones sobre el recurso hídrico de la región. Toma entonces importancia, evaluar que efecto tiene el reemplazo de las comunidades de estepas por forestaciones de pino sobre la disponibilidad de agua del sistema (Jackson et al., 2005; Licata et al., 2007). Los cambios en la dinámica del agua no sólo involucran un cambio en la partición entre flujos de evapotranspiración, drenaje y escorrentía sino también cambios en la redistribución del agua a nivel de paisaje y su dinámica temporal. Los sistemas de estepa en la Patagonia presentan con frecuencias pérdidas por drenaje profundo (Paruelo y Sala, 1995), las cuales constituyen un recurso importante para ecosistemas azonales como los “mallines” patagónicos.



El objetivo general de este capítulo es cuantificar las pérdidas de agua de las forestaciones de *Pinus ponderosa* en el noroeste de la estepa patagónica y comparar estas pérdidas con las de la comunidad de estepa y las praderas húmedas (mallines) presentes en el área.

## **Objetivos específicos**

- 1.** Evaluar las diferencias de evapotranspiración entre forestaciones, estepas y praderas húmedas en Patagonia.
- 2.** Analizar la dinámica temporal de la evapotranspiración en de estas tres coberturas.
- 3.** Evaluar las pérdidas de agua por evapotranspiración entre forestaciones de distintas edades.

## 2.2. Aproximación metodológica

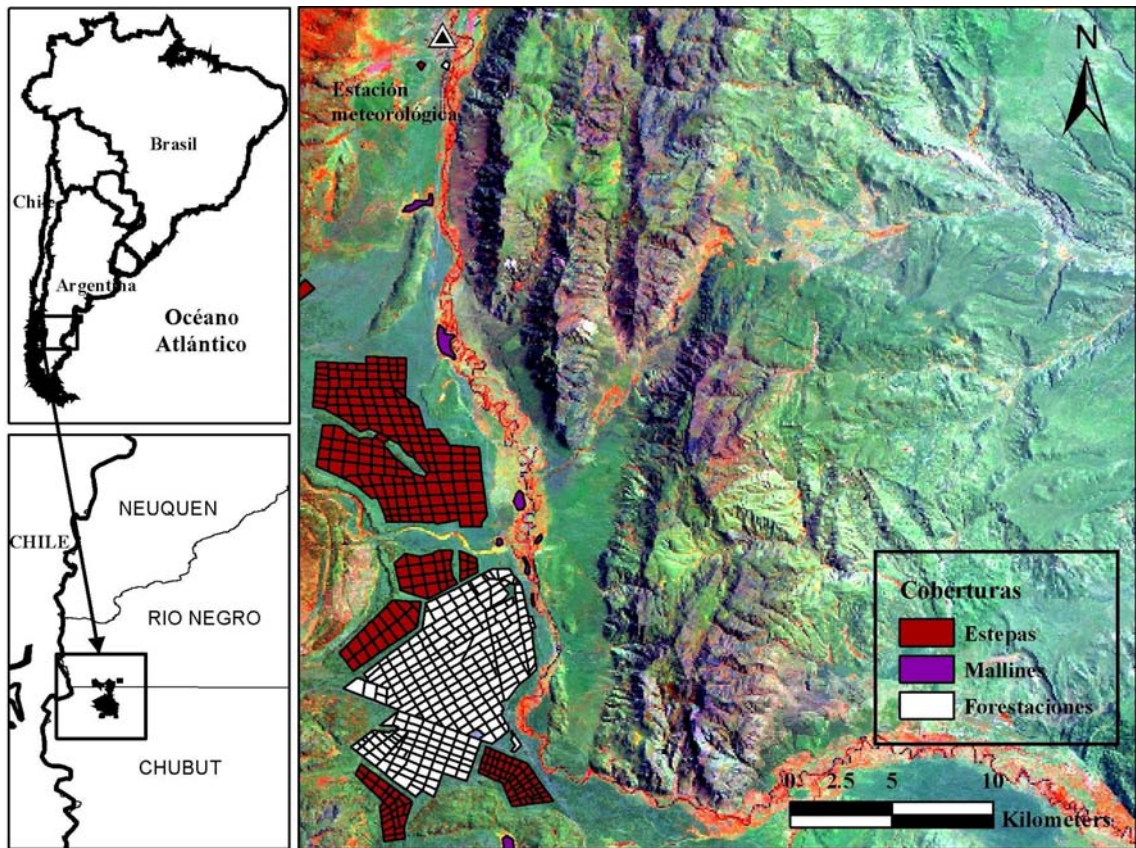
### 2.2.1. Descripción del área de estudio

El trabajo se realizó en la planicie El Maitén y sus alrededores. Ésta se ubica entre los 42°06' y 42°21' de latitud sur y los 71°10' y 71°24' de longitud oeste, en el noroeste de la estepa patagónica, en la Provincia de Chubut, Argentina. La temperatura media anual es de 8 °C y la precipitación media anual es de 424 mm (Paruelo et al., 2000). El 73% de las precipitaciones se concentran entre invierno y otoño y la mayoría de los eventos son menores a 5 mm (Jobbágy et al., 1995). Una de las características climáticas de la región es la persistencia de los vientos del oeste (Paruelo et al., 1998). Los suelos predominantes del área son Aridisoles y Entisoles (INTA-SAGYP, 1990). La vegetación dominante es una estepa arbustiva-graminosa ubicada en la transición entre los distritos fisonómico-florísticos Subandino y Occidental (León et al., 1998, Paruelo et al., 2004). Las especies de arbustos dominantes son *Mulinum spinosum*, *Adesmia campestris*, *Berberis heterophylla*, *Colletia hirta* y *Senecio filaginoides* mientras que las gramíneas que predominan son *Pappostipa speciosa*, *Stipa humilis*, *Festuca pallenscens*, *Poa ligularis* y *Bromus pictus* (León et al., 1998). En el área, son frecuentes las praderas húmedas asociadas a fuentes subterráneas de agua derivadas del drenaje de la estepa (Paruelo et al., 2000). Si bien la superficie que ocupan es relativamente pequeña (próxima al 5%) dan cuenta de una fracción sensiblemente mayor de las ganancias de C del paisaje y representan un hábitat clave para numerosas poblaciones animales y un recurso forrajero estratégico en los sistemas ganaderos patagónicos (Golluscio et al., 1998). En el último siglo, gran parte de la región ha sido fuertemente afectada por el sobrepastoreo e incendios naturales y antrópicos (Paruelo et al., 1993; Golluscio et al., 1998).

El área de trabajo corresponde a la Estancia “El Maitén”, donde las plantaciones de *Pinus ponderosa* se establecieron entre 1989 y 2003. Cada año se plantaron alrededor de 20 lotes de 13 a 20 ha cada uno. La edad de las forestaciones al momento de las estimaciones varió entre 3 y 19 años y la densidad promedio de las plantaciones fue de 700 árboles/ha. En lotes de 12 años, la densidad de tocones/ha promedio fue de 185, con valores promedio de distancia basal (DB) de 14.7 cm y distancia de altura al pecho (DAP) de 8.5 cm. La altura promedio de los árboles fue de 3.8 m. Actualmente, el área implantada con forestaciones cubre aproximadamente 3400 ha.

#### 2.2.2. Ubicación de sitios y selección de imágenes satelitales

Para evaluar los patrones de pérdida de agua por evapotranspiración (ET) y la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA) se ubicaron sitios de tres coberturas: estepas, mallines y forestaciones sobre una misma unidad fisiográfica homogénea, la planicie El Maitén (Figura II.1). El plano de los lotes forestales y las fechas de plantación fueron provistos por el encargado del Área Forestal de la Estancia El Maitén (Javier Albanesi, com. pers.).



**Figura 2.1.** Zona de estudio, planicie El Maitén y sus alrededores ubicados en el noroeste de la estepa patagónica. Se indica la estación meteorológica con un triángulo y las tres coberturas analizadas: estepa (rojo), forestación (blanco) y mallín (violeta). Imagen falso color compuesto Landsat 7ETM+, 16 de febrero de 2001.

La resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes Landsat utilizadas resulta particularmente adecuada para el desarrollo de los objetivos de este capítulo. La resolución espectral permitió estimar las variables sintéticas ET y fRFA que se desarrollarán en la siguiente sección. La resolución espacial, de 30 m en todas las bandas reflectivas y 60 m en la banda térmica permitió identificar áreas homogéneas de plantaciones de pino, comunidades de estepa y de mallines con alto grado de detalle, localización corroborada con información de campo. La frecuencia temporal del sensor, cada 16 días, permitió obtener al menos una fecha por mes libre de nubes. Se seleccionaron 11 imágenes Landsat 7 ETM+ (escena 231/89) distribuidas en dos

estaciones de crecimiento, entre los meses de septiembre y marzo. Los dos períodos analizados fueron a) 2003-2004 durante el cual se realizaron relevamientos de la vegetación en el campo y b) 2006-2007, período más próximo al momento de definición del proyecto. Las 5 fechas del período 2003-2004 fueron 05-nov-03, 23-dic-03, 8-ene-04, 25-feb-04, 12-mar-04. En el período 2006-2007 en cambio, se consideraron las siguientes 6 fechas: 26-sep-06, 12-oct-06, 31-dic-06, 16-ene-07, 17-feb-07, 21-mar-07.

Las imágenes fueron provistas por la CONAE y se procesaron con el Software ENVI 4.2. Debido a un desperfecto técnico en la plataforma Landsat todas las imágenes adquiridas a partir del año 2003 del sensor L7 ETM+ presentaron franjas de información faltante cuya ubicación en la escena fue variable según la fecha. Las imágenes se corrigieron geométricamente usando el método de selección de puntos de control con una función de ajuste polinómica de primer grado (cuadrado medio del error de transformación menor a 0,5 pixel). Para minimizar efectos atmosféricos, las bandas no térmicas se corrigieron mediante la aproximación de sustracción por objeto oscuro (DOS) descrito por Conghe et al. (2001) y la banda térmica se corrigió con el algoritmo mono-window propuesto por Qin et al. (2001). Se aplicó una máscara a los productos de cada fecha y luego se revisó cuidadosamente que los límites de los sitios estuvieran alejados de los bordes de las franjas con datos faltantes y que contuvieran al menos cuatro píxeles de temperatura superficial de 60 m de lado (aprox. 1,5 has). De modo que el número de sitios por fecha y por cobertura fue variable según la ubicación del bandeado en las imágenes (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Número de sitios por fecha y cobertura ubicados en la planicie El Maitén en las 11 imágenes Landsat 7 ETM+ analizadas.

| Fechas      | N° de sitios |             |        |
|-------------|--------------|-------------|--------|
|             | Estepa       | Forestación | Mallín |
| 05-nov-2003 | 14           | 14          | 16     |
| 23-dic-2003 | 119          | 119         | 28     |
| 08-ene-2004 | 108          | 108         | 26     |
| 25-feb-2004 | 130          | 130         | 27     |
| 12-mar-2004 | 122          | 122         | 26     |
| 26-sep-2006 | 100          | 100         | 12     |
| 12-oct-2006 | 99           | 99          | 16     |
| 31-dic-2006 | 108          | 108         | 23     |
| 16-ene-2007 | 128          | 128         | 27     |
| 17-feb-2007 | 52           | 52          | 25     |
| 21-mar-2007 | 119          | 119         | 26     |

### 2.2.3. Estimación de evapotranspiración

Se estimó la evapotranspiración diaria a partir de la temperatura superficial y la radiación neta basada en el método simplificado de balance energético propuesto por Jackson, (1985):

$$ET = R_n - B (T_s - T_a)^n - G$$

donde  $R_n$  es la radiación neta ( $Mj\ m^{-2}$ ),  $T_s$  es la temperatura superficial ( $^{\circ}K$ ),  $T_a$  es la temperatura media del aire ( $^{\circ}K$ ),  $G$  es el flujo de energía de la superficie del suelo ( $Mj\ m^{-2}$ ) y  $B$  y  $n$  son parámetros semiempíricos que varían según el tipo de vegetación. Este método ha sido utilizado satisfactoriamente en distintos ambientes y con distintas coberturas vegetales (Caselles et al., 1998; Sanchez y Caselles, 2004; Noretto et al., 2005).

La radiación neta (Apéndice I i.a.) se estimó como el balance entre la radiación neta de onda corta incidente  $S_n$  ( $Mj\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) (Apéndice I i.b.) y la radiación neta de onda larga emitida  $L_n$  ( $Mj\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) según lo propuesto por Granger (2000) (Apéndice I i.c.).

El diferencial de temperatura  $T_s - T_a$  se estimó a partir de la temperatura superficial corregida  $T_s$  (°K) (Apéndice I ii.b.) que resultó de aplicar a la banda 6 de Landsat el algoritmo propuesto por Qin et al. (2001). La temperatura del aire  $T_a$  (°K) se estimó a partir de los registros meteorológicos de estaciones ubicadas próximas a las áreas de estudio. Se tuvo en cuenta la marcha sinusoidal de la temperatura para estimar  $T_a$  al momento de la adquisición de la imagen.

$$T_a = T_{\text{media}} + [(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})/2] \text{ seno } 360 [(20 - h)/24]$$

donde  $T_{\text{media}}$ ,  $T_{\text{max}}$  y  $T_{\text{min}}$  son datos de temperatura diarios (°C), y  $h$  es la hora a la que se quiere estimar la temperatura (10.30 hs para el sensor Landsat).

Para obtener los parámetros  $B$  y  $n$  primero se calculó el Índice de Vegetación Normalizado (IVN) como la relación entre las reflectancias de las bandas del infrarrojo cercano ( $IR_c$ ) y la del rojo ( $R$ ) de Landsat.

$$IVN = rIR_c - rR / rIR_c + rR$$

Luego se ubicaron en la escena sitios de máxima y mínima actividad fotosintética y se escala éste índice según el procedimiento sugerido por Carlson et al. (1995). A partir de éste nuevo índice escalado ( $IVN^*$ ), se estimaron los coeficientes  $B$  y  $n$ . El coeficiente  $B$  refleja el promedio diario integrado de la conductancia por calor sensible en la vegetación que depende de la rugosidad y la velocidad del viento. El coeficiente  $n$  representa una corrección para condiciones de estabilidad estática no neutrales que asume generalmente valores cercanos a uno.



$$IVN^* = (IVN - IVN_{MIN}) / (IVN_{MAX} - IVN_{MIN})$$

$$B = 0.0109 + (0.051 \times IVN^*)$$

$$n = 1.067 - (0.372 \times IVN^*)$$

Por último, se estimó el flujo de energía del suelo (G) según el método propuesto por Bastiaanssen, (2000) que considera las estimaciones previas de radiación neta Rn (W m<sup>-2</sup>), temperatura superficial Tb (°C) (Apéndice I ii.a.), el albedo (α) (Apéndice I i.f.) y el Índice de Vegetación Normalizado (IVN).

$$G = Rn \times ((Tb / \alpha) \times (0.0038 \times \alpha) + (0.0074 \times (\alpha^2)) \times (1 - (0.98 \times (IVN^4))))$$

#### Estimación de fRFA y RFAA

Se estimó la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por el canopy (% fRFA) como la relación lineal que existe con el IVN según lo propuesto por Ruimy et al. (1994).

$$fRFA = -0.025 + (1.25 \times IVN)$$

Se estimó la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA, Mj m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) como el producto entre la Radiación Fotosintéticamente Activa incidente (RFA, Mj m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por el canopy (fRFA).

$$RFAA = fRFA \times RFA$$

#### 2.2.4. Datos climáticos

Los registros diarios de heliofanía, radiación y tensión de vapor de agua se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Esquel (latitud: 42°52' S, longitud: 71°07' O) y fueron provistos por el Centro de Información Meteorológica (CIM). La estación de Esquel fue la más cercana (aprox. 90 km) a los sitios de estudio de la que se obtuvieron estos registros diarios necesarios para estimar evapotranspiración. Se utilizaron los datos de heliofanía y tensión de vapor para corregir la temperatura de la superficie obtenida del sensor ETM+ de la plataforma Landsat. Los registros de radiación global se utilizaron para estimar el balance de radiación de la superficie. Los registros diarios de temperatura y precipitación en cambio, se obtuvieron de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: 42°04' S, longitud: 71°09' O) ubicada a aprox. 15 km de los sitios de estudio y permitieron estimar con mayor precisión la diferencia térmica entre el aire y la superficie y la disponibilidad hídrica.

#### 2.2.5. Análisis de datos

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico InfoStat 1.1 (2009) y el programa R 2.6.0. Para evaluar diferencias en las características radiométricas de las coberturas, se consideraron las siguientes variables: albedo, diferencia térmica entre el aire y la superficie ( $T_s - T_a$ ), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) y Absorbida (RFAA) por los tejidos verdes y evapotranspiración (ET). Se realizó una prueba de Kruskal Wallis para cada una de las variables.

Para analizar en el tiempo el funcionamiento de cada cobertura - forestaciones, mallines y estepas- y comparar en cada fecha, el funcionamiento entre coberturas, sólo se consideraron las variables: fRFA, RFAA, ET y el cociente RFAA/ET, ésta última

como un estimador de la eficiencia en el uso del agua. Para cada variable y para cada período (2003-2004 y 2006-2007), se construyeron modelos de ANOVA de medidas repetidas con cuatro estructuras de error alternativas (independencia, simetría compuesta, autoregresivo de orden uno y autoregresivo de orden uno con varianzas heterogéneas). Estas estructuras son las más simples, las más utilizadas y las que se interpretan más fácilmente desde el punto de vista ecológico. Se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo de mejor ajuste.

Para analizar diferencias de funcionamiento entre forestaciones de distintas edades, se consideraron las mismas cuatro variables: ET, fRFA, RFAA y RFAA/ET. Debido al bajo número de réplicas, se agruparon los lotes de las fechas presentes en los dos períodos: diciembre, enero, febrero y marzo. Los lotes de 3 y 4 años se agruparon en la clase Joven (JO) y los lotes de 9, 10 y 11 años en la clase Adulto (AD). Para analizar diferencias de funcionamiento entre las forestaciones JO y AD y diferencias de funcionamiento entre meses de cada clase, se realizó un test de Friedman para cada variable respuesta.

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Diferencias entre comunidades de estepas, mallines y forestaciones

Aunque las forestaciones hayan presentado un menor valor de albedo y por lo tanto mayor radiación neta, la temperatura superficial de las mismas fue menor que la de la estepa en todas las fechas analizadas. Esto se corresponde con una mayor pérdida de agua y como consecuencia un enfriamiento evaporativo mayor en las forestaciones (Tabla 2.2). En promedio, las forestaciones utilizaron 18% más de agua y mantuvieron la temperatura 3.6°C menor que la estepa. La fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por los tejidos verdes y Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por el canopy fueron en promedio, un 30% mayor en las forestaciones que en la estepa (Tabla 2.2).

Los mallines presentaron mayor albedo y menor temperatura superficial que las forestaciones y la estepa en todas las fechas analizadas. La pérdida de agua de los mallines fue mayor y como consecuencia experimentaron un enfriamiento evaporativo mayor que el de las de las forestaciones y la estepa (Tabla 2.2). En promedio los mallines utilizaron 40% más de agua y mantuvieron la temperatura 11°C menor que la estepa. En cambio, utilizaron 28% más de agua y mantuvieron la temperatura 7 °C menor que las forestaciones (Tabla 2.2). La fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por los tejidos verdes y Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por el canopy fueron en promedio, un 60% y 47% más alta en mallines que en estepas y forestaciones respectivamente (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Características radiométricas, térmicas y evaporativas de estepas, forestaciones de *Pinus ponderosa* y mallines. Se presentan los valores medios diarios y errores estándares (E.E.) de las variables: albedo, diferencia térmica (Ts-Ta), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) y Absorbida por la vegetación (RFAA) y la evapotranspiración actual (ET) estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+ en forestaciones, estepas y mallines. Se consideraron las 11 fechas analizadas para estimar cada valor medio. Se indica el número total de sitios de cada cobertura. Letras distintas indican por variable, diferencias significativas entre coberturas ( $p < 0.05$ ).

| Cobertura   | N° de sitios | fRFA (%)    |     | RFAA ( $Mj\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) |      | Albedo        |       | Tsup-Taire   |      | ET ( $mm\ día^{-1}$ ) |      |
|-------------|--------------|-------------|-----|---------------------------------|------|---------------|-------|--------------|------|-----------------------|------|
|             |              | Media       | E.E | Media                           | E.E  | Media         | E.E   | Media        | E.E  | Media                 | E.E  |
| Estepa      | 1122         | 32 <b>a</b> | 0.2 | 3.56 <b>a</b>                   | 0.04 | 0.12 <b>a</b> | 0.004 | 14 <b>a</b>  | 0.16 | 2.11 <b>a</b>         | 0.02 |
| Forestación | 1106         | 50 <b>b</b> | 0.1 | 5.13 <b>b</b>                   | 0.06 | 0.10 <b>b</b> | 0.002 | 10 <b>b</b>  | 0.16 | 2.58 <b>b</b>         | 0.03 |
| Mallín      | 252          | 82 <b>c</b> | 0.1 | 9.74 <b>c</b>                   | 0.2  | 0.14 <b>c</b> | 0.001 | 3.7 <b>c</b> | 0.15 | 3.57 <b>c</b>         | 0.07 |

### 2.3.2. Dinámica temporal

En la estepa, el valor promedio de ET de las 6 fechas del período 2006-2007 fue un 15% más alto que el de las 5 fechas del período 2003-2004. Para los mallines en cambio, el valor promedio de ET fue un 10% más alto en el período 2003-2004 (Figuras 2.2.A y B).

La diferencia entre el valor máximo y mínimo de ET entre las 5 fechas del período 2003-2004 fue  $1.47\ mm\ día^{-1}$  en los mallines,  $0.86\ mm\ día^{-1}$  en la estepa y  $2.41\ mm\ día^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.2.A). La diferencia entre el valor máximo y mínimo de ET entre las 6 fechas del período 2006-2007 fue  $2.42\ mm\ día^{-1}$  en los mallines,  $1.97\ mm\ día^{-1}$  en la estepa y  $1.76\ mm\ día^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.2.B). Cabe aclarar que por una cuestión de muestreo, el valor de ET de las forestaciones en noviembre de 2003, correspondió sólo a un conjunto de plantaciones aisladas en las cercanías de los cuarteles forestales de 16 a 25 años de edad. El resto de las fechas,

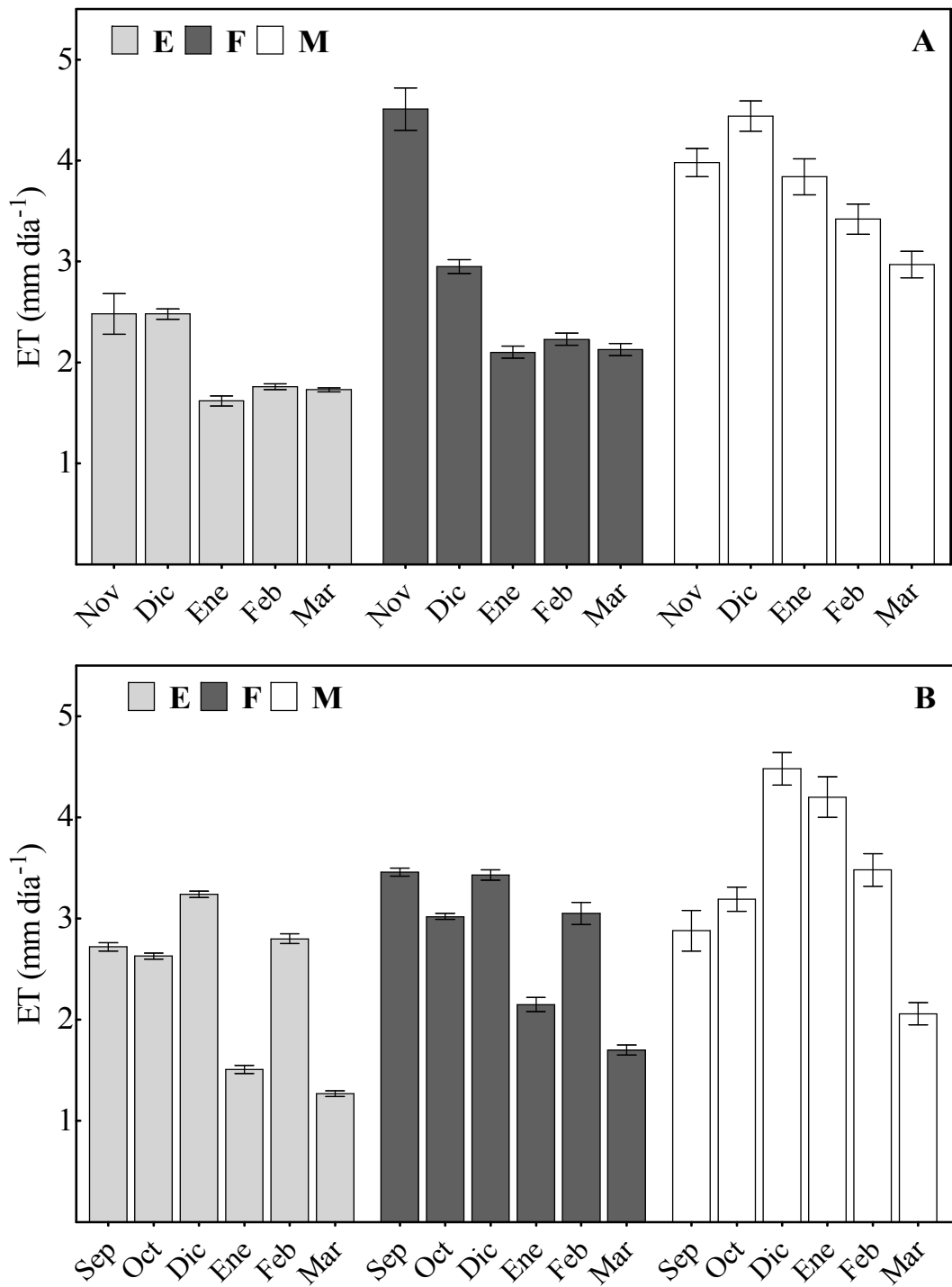
incluyó además todos los rodales implantados en los dos cuarteles forestales de entre 3 y 19 años.

En el período 2003-2004, el valor máximo de ET de los mallines se observó en diciembre mientras que, en la estepa y las forestaciones se observó en noviembre. El valor mínimo de ET de los mallines se observó en marzo mientras que, en la estepa y las forestaciones se observó en enero (Figura 2.2.A). En el período 2006-2007, el valor máximo de ET de las forestaciones se observó en septiembre mientras que, en la estepa y los mallines se observó en enero. El valor mínimo de ET de las tres coberturas se observó en marzo (Figura 2.2.B).

En ambos períodos, la mayor diferencia entre los valores de ET de las coberturas se observó en el mes de enero. Las pérdidas por ET de los mallines fueron 45-50% más altas que las de las forestaciones y 58-65% que las de las estepas para enero de 2004 y 2007 respectivamente. Las diferencias de ET entre las forestaciones y las estepas fueron 23-30% para enero de 2004 y 2007 respectivamente (Figuras 2.2.A y B).

En los dos períodos, el modelo de ANOVA de medidas repetidas cuya estructura de error tuvo el mejor ajuste según el criterio AIC fue el que consideró errores con simetría compuesta. Esto significó que, en cada fecha de cada período, la varianza de las tres coberturas fue la misma y la covarianza de cada cobertura entre una fecha y todas las demás fue otra. Es decir que, la variabilidad de ET de las forestaciones, las comunidades de estepa y los mallines en el mes de diciembre fue la misma. A su vez, la covarianza de ET de las forestaciones entre las fechas de noviembre y diciembre fue igual que la covarianza de diciembre respecto a enero. En ambos períodos, el modelo fue significativo para los factores fecha ( $p < 0.001$ ) y cobertura ( $p < 0.001$ ). Esto significó que, en los dos períodos, las diferencias de ET entre mallines, estepas y forestaciones

fueron distintas y que la dinámica temporal de ET de las tres coberturas también fue distinta.



**Figura 2.2.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) en comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). Valor promedio de ET diaria para las fechas del período 2003-2004 (5/11-23/12-08/01-25/02 y 12/03) en el panel A y las fechas del período 2006-2007 (26/09-12/10-31/12-16/01-17/02 y 21/03) en el panel B. Las barras indican el error estándar.



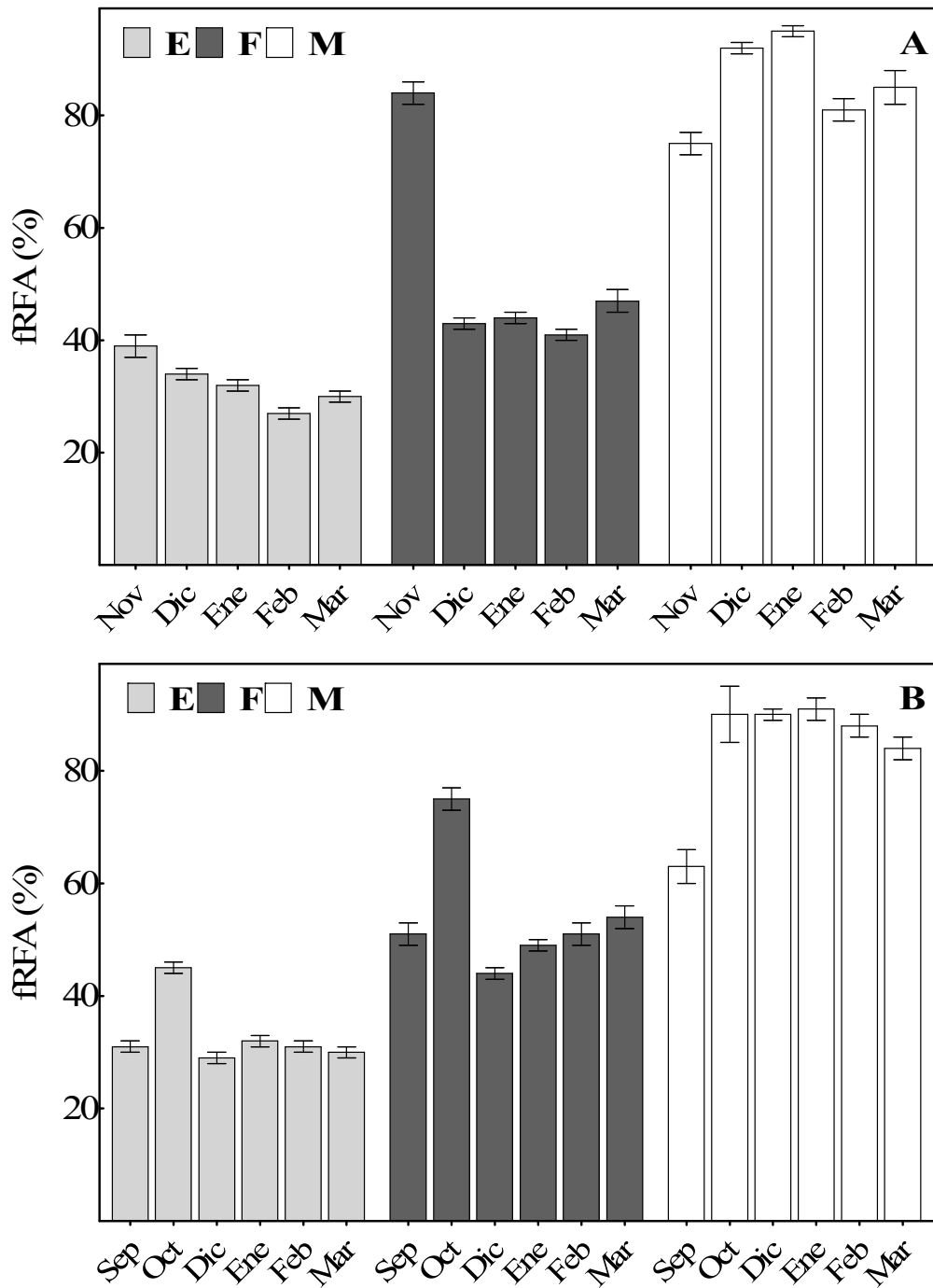
En la estepa y las forestaciones, el valor promedio de fRFA de las 6 fechas del período 2006-2007 fueron un 2% y 4% más altos que el valor promedio de fRFA de las 5 fechas del 2003-2004 respectivamente. En los mallines, en cambio, el valor promedio de fRFA fue un 2% más alto en 2003-2004 (Figuras 2.3.A y B).

La diferencia entre el valor máximo y mínimo de fRFA entre las 5 fechas del período 2003-2004 fue 14% en los mallines, 12% en la estepa y 43% en las forestaciones (Figura 2.3.A). En el período 2006-2007, la diferencia entre el valor máximo y mínimo de fRFA entre las 6 fechas fue 28% en los mallines, 16% en la estepa y 31% en las forestaciones (Figura 2.3.B).

En los dos períodos, el valor máximo de fRFA de los mallines se observó en enero mientras que, en la estepa y las forestaciones se observó en noviembre de 2003 (Figura 2.3.A) y octubre de 2006 (Figura 2.3.B). En el período 2003, la mayor diferencia entre los valores de RRFA entre mallines y forestaciones fue un 54% y entre mallines y estepas fue un 66%, ambas se observaron en el mes de enero. La diferencia más alta de RFAA entre forestaciones y estepas fue un 34% y se observó en el mes de febrero (Figura 2.3.A).

Al igual que para la variable ET, el modelo de ANOVA de medidas repetidas cuya estructura de error tuvo el mejor ajuste según el criterio AIC fue el que consideró errores con simetría compuesta. Es decir que, la variabilidad de fRFA de las tres coberturas en el mes de diciembre fue la misma. A su vez, la covarianza de fRFA de las forestaciones entre las fechas de noviembre y diciembre fue igual que la covarianza de diciembre respecto a enero. En ambos períodos, el modelo fue significativo para el factor cobertura ( $p < 0.01$ ) o sea que fueron distintas las diferencias de fRFA entre coberturas. El factor fecha en cambio, sólo fue significativo para el modelo del período

2003 ( $p < 0.05$ ), es decir que, la dinámica temporal de fRFA de las tres coberturas fue distinta en el período 2003-2004 pero no lo fue en el período 2006-2007.



**Figura 2.3.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). Porcentaje promedio de fPAR diaria para las fechas del período 2003-2004 (5/11-23/12-08/01-25/02 y 12/03) en el panel A y las fechas del período 2006-2007 (26/09-12/10-31/12-16/01-17/02 y 21/03) en el panel B. Las barras indican el error estándar.

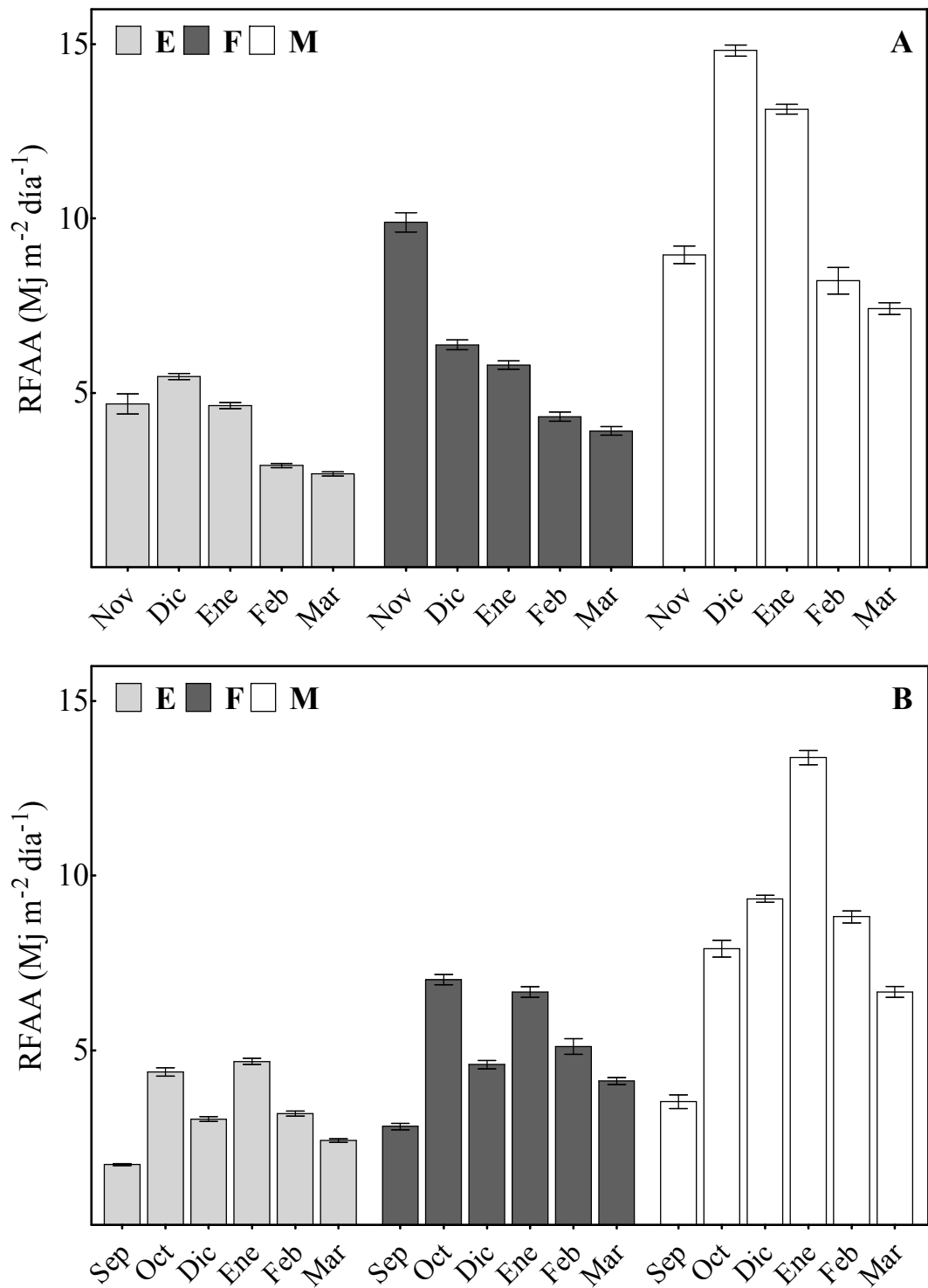
En las tres coberturas, el valor promedio de RFAA de las 6 fechas del período 2006-2007 fue más alto que el valor promedio de las 5 fechas del 2003-2004, siendo esta diferencia de un 26% para la estepa, un 20% en las forestaciones y un 27% en los mallines (Figuras 2.4.A y B).

La diferencia entre el valor máximo y mínimo de RFAA entre las 5 fechas del período 2003-2004 fue  $7.4 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en los mallines,  $2.8 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en la estepa y  $6 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.4.A). La diferencia entre el valor máximo y mínimo de RFAA entre las 6 fechas del período 2006-2007 fue  $9.8 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en los mallines,  $2.9 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en la estepa y  $4 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.4.B).

En el período 2003-2004, el valor máximo de RFAA de los mallines y la estepa se observó en diciembre mientras que, en las forestaciones se observó en noviembre. El valor mínimo de RFAA de las tres coberturas se observó en marzo (Figura 2.4.A). En el período 2006-2007, el valor máximo de RFAA de las forestaciones se observó en octubre mientras que, en la estepa y los mallines se observó en enero. El valor mínimo de RFAA de las tres coberturas se observó en septiembre (Figura 2.4.B). En el período 2003, la mayor diferencia entre los valores de RRFA entre mallines y forestaciones fue un 54% y entre mallines y estepas fue un 66%, ambas se observaron en el mes de enero. La diferencia más alta de RFAA entre forestaciones y estepas fue un 34% y se observó en el mes de febrero (Figura 2.4.A).

Al igual que para las variables ET y fRFA, el modelo de ANOVA de medidas repetidas cuya estructura de error tuvo el mejor ajuste según el criterio AIC fue el que consideró errores con simetría compuesta. Es decir que, la variabilidad de RFAA de las forestaciones, las comunidades de estepa y los mallines en el mes de diciembre fue la misma. A su vez, la covarianza de los valores de RRFA de las forestaciones entre las

fechas de noviembre y diciembre fue igual que la covarianza de diciembre respecto a enero. En ambos períodos, el modelo fue significativo para el factor cobertura ( $p < 0.01$ ), es decir que, las diferencias de RFAA entre mallines, estepas y forestaciones fueron distintas. El factor fecha en cambio, sólo fue significativo para el modelo del período 2003 ( $p < 0.05$ ), es decir que, la dinámica temporal de RRFA de las tres coberturas fue distinta en el período 2003-2004 pero no lo fue en el período 2006-2007.



**Figura 2.4.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). Valor promedio de RFAA diaria para las fechas del período 2003-2004 (5/11-23/12-08/01-25/02 y 12/03) en el panel A y las fechas del período 2006-2007 (26/09-12/10-31/12-16/01-17/02 y 21/03) en el panel B. Las barras indican el error estándar.

En las tres coberturas, el valor promedio de RFAA/ET de las 5 fechas del período 2003-2004 fue más alto que el valor promedio de las 6 fechas del 2006-2007 siendo esta diferencia de un 24% para la estepa, un 12% en las forestaciones y un 10% en los mallines (Figuras 2.5.A y B).

La diferencia entre el valor máximo y mínimo de RFAA/ET entre las 5 fechas del período 2003-2004 fue  $2 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en los mallines,  $2.6 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en la estepa y  $2.5 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.5.A). La diferencia entre el valor máximo y mínimo de RFAA/ET entre las 6 fechas del período 2003-2004 fue  $1.3 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en los mallines,  $1.5 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en la estepa y  $1.1 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  en las forestaciones (Figura 2.5.B).

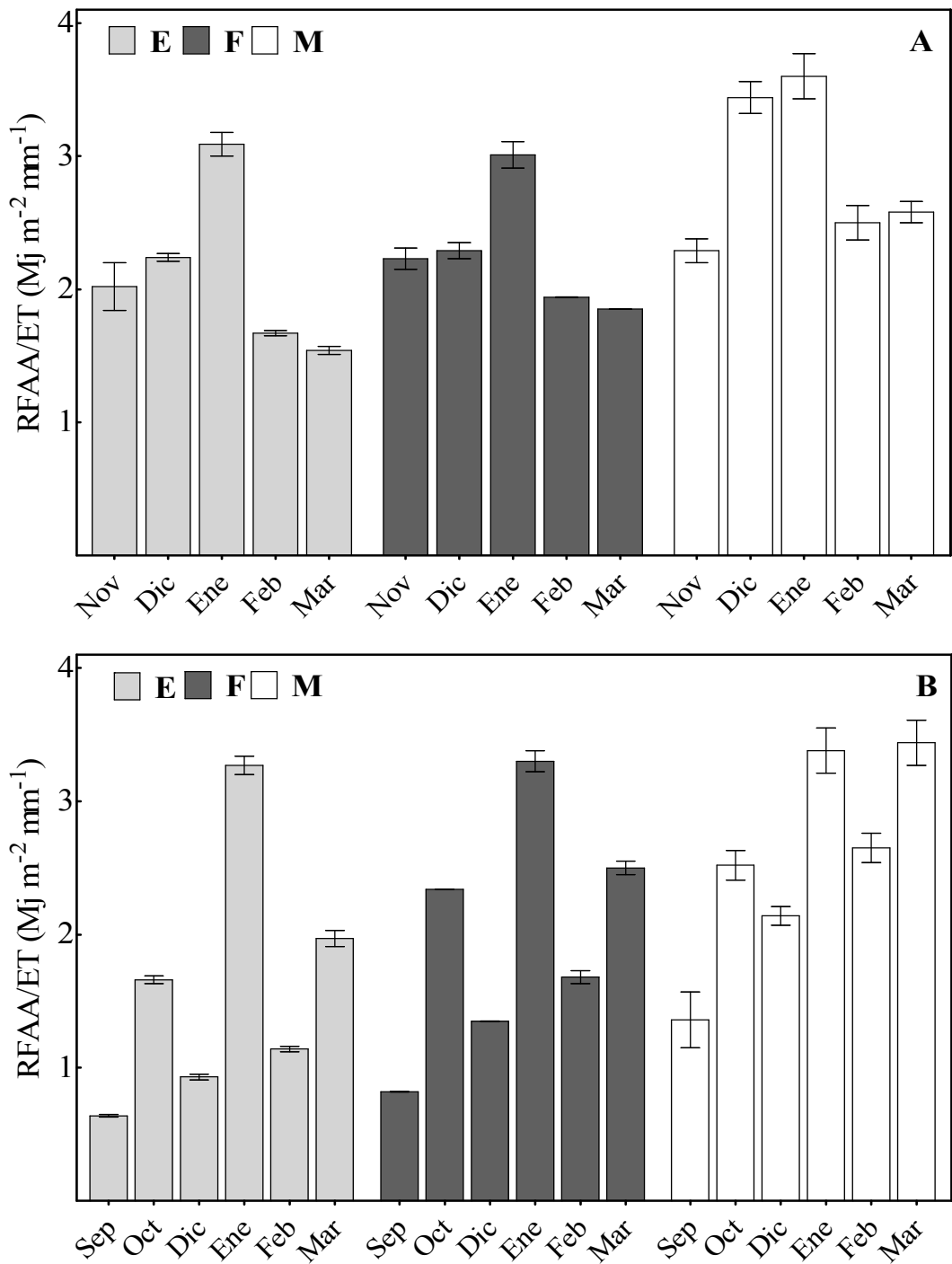
En los dos períodos, el valor máximo de este cociente RFAA/ET se observó en el mes de enero tanto en los mallines como en la estepa y en las forestaciones (Figura 2.5.A y B). El valor mínimo de RFAA/ET en las tres coberturas, se observó en marzo de 2003 (Figura 2.5.A) y septiembre de 2006 (Figura 2.5.B).

En el período 2003-2004, en promedio, los mallines tuvieron un cociente RFAA/ET 27% más alto que la estepa y 21% más alto que las forestaciones (Figura 2.5.A). En el período 2006-2007, febrero fue el mes de mayor diferencia entre los valores de RFAA/ET de los mallines y las otras dos coberturas, 37% y 57% respecto de forestaciones y estepas respectivamente (Figura 2.5.B). A su vez, en este mismo mes, la diferencia de RFAA/ET entre forestaciones y estepas también fue la más alta, siendo este valor el 31%.

Al igual que para las otras tres variables analizadas, el modelo de ANOVA de medidas repetidas cuya estructura de error tuvo el mejor ajuste según el criterio AIC fue el que consideró errores con simetría compuesta. Es decir que, la variabilidad de RFAA/ET de las forestaciones, las comunidades de estepa y los mallines en el mes de

diciembre fue la misma. A su vez, la covarianza de los valores de RRFA/ET de las forestaciones entre las fechas de noviembre y diciembre fue igual que la covarianza de diciembre respecto a enero. El modelo fue significativo para los factores fecha ( $p < 0.05$ ) y cobertura ( $p < 0.05$ ) sólo para el período 2006-2007. Esto significó que, las diferencias de RFAA/ET entre mallines, estepas y forestaciones fueron distintas y que la dinámica temporal de RFAA/ET de las tres coberturas también fue distinta.

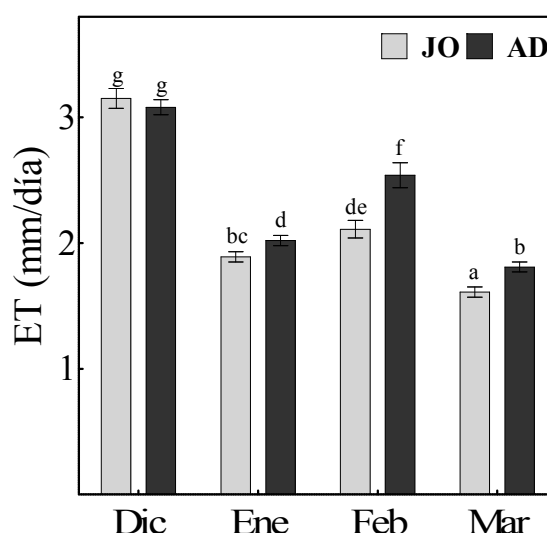




**Figura 2.5.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) en comunidades de estepas (E), forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) y mallines (M). Valor promedio de RFAA/ET diario para las fechas del período 2003-2004 (5/11-23/12-08/01-25/02 y 12/03) en el panel A y las fechas del período 2006-2007 (26/09-12/10-31/12-16/01-17/02 y 21/03) en el panel B. Las barras indican el error estándar.

### 2.3.3. Diferencias entre forestaciones de distintas edades

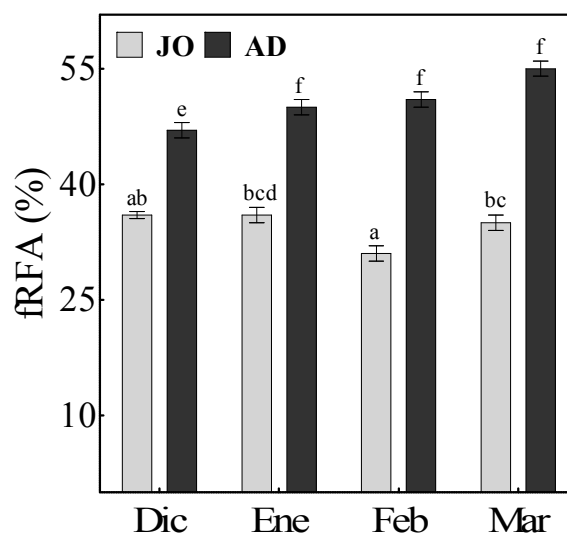
Las forestaciones de la clase adulta (AD) transpiraron en promedio entre enero y marzo, 11% más de agua que las de la clase joven (JO). Las diferencias de ET entre clases fueron significativas en los meses de enero, febrero y marzo. A su vez, el valor de ET de cada clase fue significativamente distinto entre meses (Figura 2.6). En las dos clases, el valor máximo de ET se registró en el mes de diciembre y el mínimo en el mes de marzo. La diferencia de ET entre diciembre y marzo fue 1.5 mm día<sup>-1</sup> en forestaciones de la clase JO y 1.2 mm día<sup>-1</sup> en la de la clase AD (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) de forestaciones de *Pinus ponderosa* de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). Valor promedio diario de ET para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Las barras indican el error estándar, letras distintas indican diferencias significativas entre clases por mes y entre meses por clase ( $p < 0.05$ ).

Las forestaciones AD tuvieron valores de fRFA significativamente más altos que las JO en los cuatro meses analizados. Los valores de fRFA entre meses de la clase JO no fueron distintos entre sí mientras que en la clase AD, el valor de fRFA de diciembre

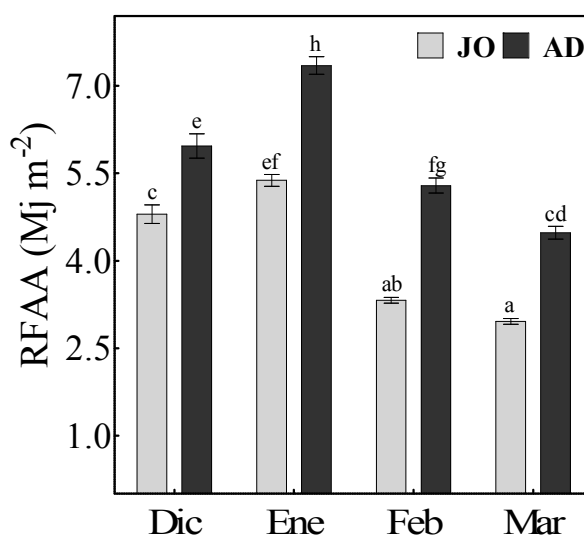
fue menor que el de los otros tres meses (Figura 2.7). La diferencia entre el valor máximo y mínimo de fRFA de las forestaciones JO fue de un 5% y en las AD de un 8% (Figura 2.7).



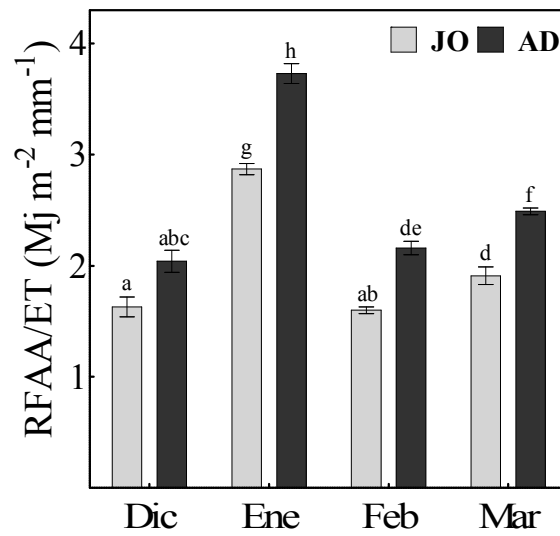
**Figura 2.7.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). Valor promedio diario de fRFA para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Las barras indican el error estándar, letras distintas indican diferencias significativas entre clases por mes y entre meses por clase ( $p < 0.05$ ).

El valor promedio entre enero y marzo de RFAA de las forestaciones AD fue un 28% más alto que el de la clase JO. Las diferencias de RFAA entre clases fueron significativas en los cuatro meses. A su vez, en la clase AD, el valor de RFAA entre meses fue distinto mientras que, en la clase JO fueron distintos los valores de RFAA de diciembre y enero pero no los de febrero y marzo (Figura 2.8). En las dos clases, el valor máximo de RFAA se registró en el mes de enero y el mínimo en el mes de marzo. La diferencia de RFAA entre enero y marzo fue  $2.4 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en las forestaciones de la clase JO y  $2.8 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en las de la clase AD (Figura 2.8).

El valor promedio entre enero y marzo del cociente RFAA/ET fue un 23% más alto en las forestaciones AD que en las de la clase JO. Las diferencias de RFAA/ET entre clases fueron significativas en enero, febrero y marzo. Es decir que, por milímetro de agua evapotranspirada, las forestaciones AD absorbieron en promedio, un 23% más de radiación por  $m^2$  que las JO. A su vez, en la clase AD, el valor de este cociente fue distinto entre meses mientras que, en la clase JO fueron distintos los valores de enero y marzo pero no los de diciembre y febrero (Figura 2.9). En ambas clases, el valor máximo del cociente RFAA/ET se observó en el mes de enero. La diferencia entre el valor máximo y mínimo del cociente en las forestaciones JO fue  $1.24 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  y de las AD fue  $1.7 \text{ Mj m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Figura 2.9).



**Figura 2.8.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). Valor promedio diario de RFAA para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Las barras indican el error estándar, letras distintas indican diferencias significativas entre clases por mes y entre meses por clase ( $p < 0.05$ ).



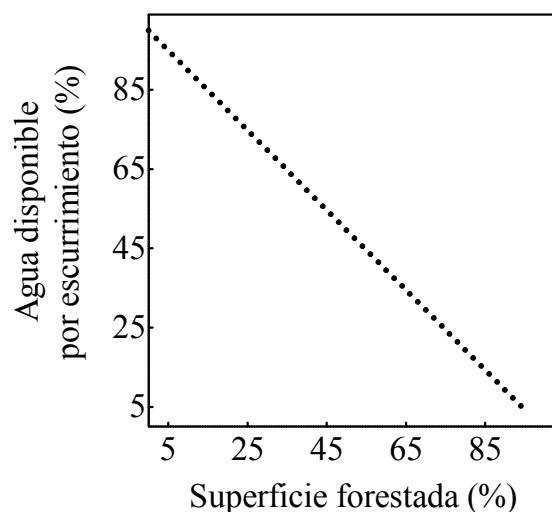
**Figura 2.9.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) por forestaciones de *Pinus ponderosa* (F) de dos clases de edades: jóvenes (JO) y adultos (AD). Valor promedio diario de RFAA/ET para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Las barras indican el error estándar, letras distintas indican diferencias significativas entre clases por mes y entre meses por clase ( $p < 0.05$ ).

## 2.4. Discusión

La evapotranspiración de las comunidades de estepa fue consistentemente menor en el tiempo que la evapotranspiración de las plantaciones de pino. Estos resultados coincidieron con los encontrados en otros sistemas forestados (Zhang et al., 2001; Noretto et al., 2005; Baldi et al., 2008). La diferencia de ET entre la forestación y la estepa pudo deberse entre otros factores, a diferencias en el área foliar, la rugosidad del canopy y la profundidad de raíces. Los pinos, con mayor área foliar y mayor rugosidad del canopy pudieron tener un mayor intercambio con la atmósfera. Por otra parte, al tener mayor profundidad de raíces, los pinos tendrían acceso a recursos hídricos más profundos. En sistemas forestados durante la estación de crecimiento, las especies herbáceas usaron mayormente el agua de los primeros 20 cm del suelo mientras que los pinos la extrajeron mayormente de los estratos más profundos sugiriendo un alto grado de complementariedad en el uso del agua (Fernández et al., 2008). Las diferencias de ET entre períodos pudieron deberse a diferencias en la disponibilidad hídrica dado que en el período 2006-2007 llovió un 27% más que en el período 2003-2004 (613.1 mm y 450.5 mm respectivamente).

La acumulación de agua en áreas del paisaje deprimidas, donde se encuentran los mallines y el aporte de agua desde áreas de estepa por escurrimiento superficial y subsuperficial, podría explicar la mayor evapotranspiración de los mallines respecto de las forestaciones. En general, en estas áreas, el agua subterránea se encuentra a escasa profundidad y podría ser fácilmente alcanzada por la vegetación, permitiendo suplir el déficit hídrico derivado de precipitaciones menores a la evapotranspiración potencial. Los cambios a escala de paisaje como la forestación con especies exóticas han afectado la redistribución de los flujos hídricos, no sólo la ET sino también la recarga de

acuíferos por variaciones en el drenaje profundo (Jobbágy et al., 2004; Farley et al., 2008; Noretto et al., 2008). El nivel de afectación de las forestaciones sobre la recarga de acuíferos dependerá de la especie utilizada, la magnitud forestada, la ubicación relativa en el paisaje y de la topografía de la región estudiada. En Patagonia, en sitios con precipitación media anual de 1200 y 800 mm, no se han detectado cambios en la productividad ni en el nivel de la napa en mallines ubicados próximos a forestaciones de pinos de distintas densidades (Weigandt et al., 2011). No se cuenta con evidencias empíricas que permitan estimar el grado de afectación del funcionamiento de mallines ubicados en sitios donde la precipitación media anual es sensiblemente inferior a la del estudio citado. Si por ejemplo, se simulara el rendimiento hidrológico de una cuenca en sitios con 387 mm de precipitación media anual y se considerase que el 5% del área está cubierta por mallines y valores medios de percolación de la estepa y de la forestación de 30% y 0.5% respectivamente (valores considerados según las simulaciones realizadas con DINAQUA en el capítulo 3), al forestar el 50% de la superficie de la cuenca, el agua disponible por escurrimiento para mallines se reduciría a la mitad (Figura 2.10).



**Figura 2.10.** Simulación sobre la disponibilidad hídrica de una cuenca según la superficie de estepa forestada.

La estimación y distribución de los flujos hídricos toma especial importancia en los sistemas semiáridos donde el agua es un factor limitante y es uno de los controles de la productividad primaria del sistema. La dinámica y magnitud de los valores de RFAA, como estimador de la productividad, de las estepas y los mallines, coincidieron con los encontrados en estudios previos (Jobbágy et al., 2002; Paruelo et al., 2004). Las forestaciones no presentan una dinámica de la RFAA sensiblemente diferente a la de estepa ni de los mallines (Figuras 2.3 y 2.4). Sin embargo, un aumento en la superficie forestada o cambios en la densidad o en la posición relativa en el paisaje, podrían afectar la disponibilidad de agua en el sistema y la fijación de carbono de la vegetación en otras posiciones del paisaje. Cabe destacar que los mallines cubren un 5% del área, aportan un 12% a la productividad primaria total (Paruelo et al., 2004) y son de alto valor forrajero para la producción ganadera de la región.

En los mallines, el cociente RFAA/ET fue un 32% más alto que en la estepa (Figura 2.5), es decir que, absorbieron más radiación por milímetro de agua evapotranspirada. Bajo las mismas condiciones ambientales los valores más altos de RFAA/ET sugieren una mayor eficiencia en el uso del agua en los sistemas más húmedos del paisaje.

Las forestaciones de distintas edades presentarían también distinta eficiencia en el uso del agua tal como lo sugieren los valores de RFAA/ET (Figura 2.9). Este cociente fue un 23% más alto en forestaciones adultas sugiriendo una menor pérdida de agua por MJ de radiación absorbida. Al comparar la medida de la eficiencia en el uso del agua de otro cociente:  $fPAR/ET$ , las plantaciones adultas (> a 9 años) de Pinos en Patagonia mostraron resultados similares de eficiencia en el uso del agua respecto a plantaciones de Eucaliptos en Entre Ríos (Nosetto et al., 2006), con valores de  $fRFA/ET$  de 0.23 y 0.27 para Pinos y Eucaliptos respectivamente. En plantaciones jóvenes (entre 2 y 5 años) se observaron resultados opuestos entre las especies,  $fRFA/ET$  en Pinos fue 0.17 y



en Eucaliptos 0.39, sugiriendo en los Pinos, un aumento en la eficiencia en el uso del agua con la edad y en Eucaliptos una disminución (Nosetto et al., 2006). En esta tesis, la escasa disponibilidad de rodales de distintas edades, no permitió una evaluación más exhaustiva de este punto.

Otros factores que podrían explicar diferencias en la eficiencia del uso del agua en pinos de distintas edades a escala de rodal serían las relacionadas con los patrones de dominancia de los individuos dentro del rodal (Fernández et al., 2011) y según el grado de dominancia de los individuos, diferencias de eficiencia en el crecimiento (Fernández et al., 2009). Un mayor entendimiento sobre los patrones de consumo de agua a nivel árbol y rodal (Gyenge et al., 2009) en las plantaciones de pino estudiadas y considerar a su vez estos patrones en distintas densidades de plantación, aportaría información que permitiría un mejor entendimiento a la escala de paisaje.

Por otra parte, sería importante considerar datos de biomasa acumulada para evaluar diferencias en la eficiencia del uso del agua en el tiempo y estimar el costo-beneficio entre consumo de agua-fijación de carbono con mayor detalle. Sin duda la estimación de valores de eficiencia en el uso de la radiación (Choudhury 2000; Piñeiro et al., 2006; Garbulsky et al., 2010) para las distintas coberturas y edades de los rodales permitirá profundizar en los detalles cuantitativos del compromiso entre ganancias de C y pérdidas de agua (Jackson et al., 2005).

En la actualidad, el área implantada en el noroeste de la Patagonia, cubre aproximadamente una cuarta parte del área potencialmente apta para la forestación (Díaz, 1997). Frente al potencial mercado de bonos de carbono y el estímulo de planes de reintegro fiscal (Haltia y Keipi, 1997; Wright et al., 2000) resulta necesario el análisis y la evaluación de las consecuencias y el impacto de la forestación de la estepa patagónica sobre la dinámica del agua y el C en los rodales pero también en el paisaje.

La evaluación de estos mediante sensores remotos permitiría estimar variables difíciles de medir a campo y compararlas con registros pasados, evaluando así no sólo la magnitud de los cambios sino también su sentido.

## **Capítulo 3**

**Dinámica hidrológica de largo plazo en comunidades de estepa y plantaciones de *Pinus ponderosa* en el noroeste de la estepa patagónica.**

### 3.1. Introducción

La disponibilidad de agua es el principal control de los procesos ecosistémicos en los ambientes semiáridos (Paruelo y Sala, 1995). El agua disponible para la vegetación está determinada por los ingresos de agua al sistema y regulada, entre otros factores, por las condiciones físicas del suelo. Estudios previos indican que la forestación de pastizales aumenta las ganancias de carbono del sistema (Fernández et al., 2002; Noretto et al., 2006; Licata et al., 2008; Gyenge et al., 2009) pero disminuye la recarga de acuíferos (Jobbágy et al., 2004, Jackson et al., 2005; Jobbágy et al., 2006), aumenta la evapotranspiración del sistema (Gyenge et al., 2002; Noretto et al., 2004, Baldi et al., 2008; Gyenge et al., 2009) y aumenta la concentración y la dinámica de sales en el suelo (Jobbágy et al., 2004, Farley et al., 2008, Noretto et al., 2008). En los últimos años, las plantaciones de coníferas en la estepa patagónica ha sido una actividad con apoyo estatal y se han extendido principalmente en áreas con gran deterioro por sobrepastoreo (Laclau, 2007). A diferencia de la mayoría de las especies características de la estepa patagónica, las especies implantadas son siempreverdes. Estas últimas, al tener mayor área foliar y raíces más profundas, pueden tener mayor acceso al agua durante todo el año y mayor intercambio evaporativo con la atmósfera (Calder, 1998). Los resultados presentados en el Capítulo 2 de esta tesis muestran que, en los sitios estudiados, la evapotranspiración de las forestaciones es mayor que la de la estepa.

Entender las consecuencias del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica del agua implica entender los cambios en los flujos que determinan el balance hídrico del ecosistema. Este queda definido como:

$$P = I + E_v + T + R + D \pm \Delta\Theta$$

donde la precipitación ( $P$ ) se distribuye entre intercepción de la vegetación ( $I$ ), evaporación directa del suelo ( $E_v$ ), transpiración ( $T$ ), escurrimiento superficial ( $R$ ), drenaje profundo ( $D$ ) y variación de la humedad edáfica ( $\Delta\Theta$ ). Los estudios sobre los efectos de la forestación de pastizales y arbustales sobre los componentes del balance hídrico se han focalizado en la transpiración y el contenido hídrico del suelo (Gyenge et al., 2002, Gyenge et al., 2009) o en el rendimiento hídrico de cuencas (Jackson et al., 2000, Farley et al., 2005). Sin embargo, poco se conoce sobre los efectos de las plantaciones de pino sobre los flujos hídricos en zonas semiáridas (Raz-Yaseef et al., 2010). En particular, en la estepa patagónica, ha sido poco estudiado el efecto de las forestaciones sobre la evaporación, la transpiración y el drenaje profundo en el largo plazo.

En el capítulo anterior, se analizaron los flujos parciales de evapotranspiración a partir del balance de energía mediante sensores remotos mientras que en este capítulo, se analizará cada flujo por separado mediante su modelado a partir del balance hídrico. Los modelos de dinámica del agua permiten estimar flujos en plazos más largos que la estación de crecimiento (por ej. más de 10 años) y evaluar distintos escenarios tanto reales como plausibles de uso del suelo, condiciones climáticas y de manejo (De Jong, 1984).

Dentro de los numerosos modelos que simulan la dinámica y los flujos del agua existen dos grandes grupos, los modelos con base física y los que se basan en el balance hídrico. En los primeros, se derivan ecuaciones de flujo de agua en las que fuerza motriz es el potencial agua (De Jong, 1984) y suelen aplicarse a escala de mayor detalle (Milly, 1986; Beven, 1989). En los segundos, el flujo es unidireccional descendiente, el agua se mueve en cascada desde los horizontes superiores a los inferiores cuando el superior alcanza un contenido hídrico igual a la capacidad de campo. En general, estos tipos de

modelos suelen aplicarse en una escala de menor detalle (De Jong y Shaykewich, 1981; Paruelo, 1984; Isidoro, 2010, Davis, 2010). DINAQUA es un modelo que se basa en el balance hídrico que ha sido desarrollado y evaluado en comunidades vegetales de la estepa patagónica por Paruelo y Sala (1995). El flujo de agua es unidireccional descendiente y a diferencia de otros modelos, calcula de manera independiente los valores de evaporación y transpiración potenciales diarios de dos o más tipos funcionales de plantas. A su vez, el modelo permite simular cambios en la proporción de los tipos funcionales de plantas y diferenciar las distintas profundidades del perfil edáfico.

En las últimas décadas se han registrado evidencias sobre el estado de degradación de las comunidades de la estepa patagónica (Paruelo et al. 1993). La degradación resultaría del uso ganadero histórico de la región (Paruelo et al., 1993, Golluscio et al., 1998, Golluscio et al., 1999). La pérdida de especies (Verón et al., 2010) y la degradación del suelo serían alguno de los indicios del proceso de desertificación del sistema que afectarían la dinámica hídrica como consecuencia del aumento de la escorrentía superficial y el drenaje profundo. En este contexto de degradación y considerando el potencial beneficio asociado al aumento de los stocks de C y de productos comercializables, la implantación de bosques cultivados se presenta como un uso alternativo atractivo.

El objetivo general del capítulo fue cuantificar los flujos hídricos totales de salida del sistema y describir la dinámica en el largo plazo de las pérdidas de agua por transpiración, evaporación y drenaje profundo al considerar distintas condiciones del estado de la vegetación en la estepa patagónica y en plantaciones de distintas edades de *Pinus ponderosa*.

### **Objetivos específicos**

1. Describir la dinámica anual y en el largo plazo de las pérdidas de agua por transpiración, evaporación y drenaje profundo en forestaciones de distintas edades de *Pinus ponderosa* y en dos condiciones de la estepa, degradada y no degradada.
2. Evaluar diferencias en la dinámica temporal y/o en la magnitud de los flujos de pérdida en los distintos escenarios simulados.
3. Comparar la magnitud de cada flujo y su dinámica temporal en los distintos escenarios simulados entre dos años de condiciones climáticas distintas.

## **3.2. Aproximación metodológica**

### 3.2.1. Descripción del modelo

DINAQUA es un modelo de simulación que se basa en el balance hídrico. El flujo de agua es unidireccional descendiente, el agua se mueve en cascada desde los horizontes superiores a los inferiores cuando el superior alcanza un contenido hídrico igual a la capacidad de campo. Este modelo permite estimar flujos de pérdida de agua en el largo plazo (mayores a 10 años). Los flujos considerados en el modelo son la transpiración, la evaporación y el drenaje profundo. Debido a que las pendientes del terreno son muy suaves y la textura del suelo es gruesa, el modelo supone que las pérdidas de agua por escurrimiento son despreciables.

Los flujos de transpiración y evaporación son estimados diariamente a partir de registros de temperatura y radiación. El flujo de transpiración es estimado a partir de considerar el contenido hídrico del suelo, la cantidad de biomasa y la tasa máxima de transpiración por unidad de biomasa de cada tipo funcional de planta. La evaporación directa del suelo se estima a partir del algoritmo propuesto por Ritchie (1973). El contenido hídrico de cada estrato se actualiza diariamente al considerar los flujos de evaporación y transpiración. El agua que se pierde del último estrato, se considera drenaje profundo.

Se consideran en el modelo tres módulos de información. El primer módulo contiene información sobre características fenológicas de hasta 10 tipos funcionales de planta. A cada tipo funcional se lo caracteriza por: la proporción de raíces en cada estrato del perfil del suelo, la transpiración máxima por gramos de biomasa y los días de inicio y fin de la estación de crecimiento (Tabla 3.1). En el segundo módulo de información se incorporan los registros climáticos diarios de precipitación, temperatura



y radiación del período considerado para el análisis. El tercer módulo incorpora información del suelo: contenido de agua a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y espesor de cada estrato. DINAQUA es un modelo que permite simular distintas condiciones iniciales de la vegetación. Este modelo ha sido desarrollado y evaluado en la estepa patagónica por Paruelo y Sala (1995) y en pastizales californianos por Jackson et al. (1998). La evaluación del modelo llevada a cabo en Patagonia corresponde a una estructura de la vegetación, a condiciones edáficas y a una composición específica similares a las de la estepa analizada en este estudio. En tal sentido, la evaluación del modelo presentado en Paruelo y Sala (1995) otorga suficiente confianza para el uso del modelo en las condiciones de este estudio.

**Tabla 3.1.** Parámetros utilizados para caracterizar la vegetación considerada en las simulaciones del modelo. Los tipos de planta considerados fueron caracterizados por las siguientes especies: *Adesmia campestris* (ADL), *Mulinum spinosum* (ADNL), *Senecio filaginoides* (ASV), *Pappostipa speciosa* (GRX), *Bromus pictus* (GRM), *Adesmia lotoides* (HERB) y *Pinus ponderosa* (PINO). Los parámetros de proporción de raíces para pastos y arbustos fueron obtenidos de Golluscio (2005) y Soriano et al. (1987) mientras que para *Pinus ponderosa* se estimó a partir de Noretto et al. (2006). La transpiración máxima y umbral de agua disponible de arbustos y pastos fueron obtenidos de Paruelo y Sala (1995). El resto de los parámetros fueron calculados como se indica en el texto, DJ = día juliano del inicio de la estación de crecimiento, DJ máximo y mínimo corresponden a los días en que la biomasa verde es máxima y al final de la estación de crecimiento y la duración en días de la estación de crecimiento.

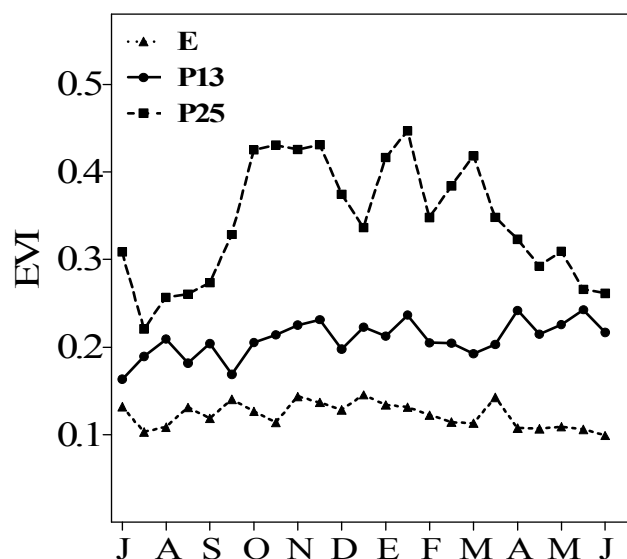
| Parámetros de entrada al modelo DINAQUA |                                                                      | ADL   | ADNL  | ASV   | GRX   | GRM   | HERB  | Pino (13 años) | Pino (25 años) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| Distribución de raíces                  | 0-10 (cm)                                                            | 0.011 | 0.036 | 0.252 | 0.518 | 0.510 | 0.689 | 0.036          | 0.036          |
|                                         | 10-20 (cm)                                                           | 0.037 | 0.095 | 0.135 | 0.156 | 0.165 | 0.191 | 0.172          | 0.172          |
|                                         | 20-40 (cm)                                                           | 0.148 | 0.30  | 0.204 | 0.168 | 0.170 | 0.118 | 0.191          | 0.191          |
|                                         | 40-80 (cm)                                                           | 0.439 | 0.54  | 0.24  | 0.16  | 0.16  | 0     | 0.322          | 0.322          |
|                                         | 80-160 (cm)                                                          | 0.334 | 0.029 | 0.11  | 0     | 0     | 0     | 0.193          | 0.193          |
|                                         | 160-400 (cm)                                                         | 0.031 | 0     | 0.065 | 0     | 0     | 0     | 0.086          | 0.086          |
| Fenología                               | DJ inicio                                                            | 337   | 360   | 360   | 350   | 344   | 258   | 335            | 335            |
|                                         | DJ máximo                                                            | 264   | 156   | 296   | 330   | 288   | 356   | 244            | 244            |
|                                         | DJ mínimo                                                            | 92    | 92    | 80    | 20    | 20    | 20    | 90             | 90             |
|                                         | Estación de crecimiento                                              | 120   | 97    | 85    | 35    | 41    | 27    | 120            | 120            |
| Transpiración máxima                    | (gr H <sub>2</sub> O gr biom verde <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> ) | 18.86 | 7.68  | 11.48 | 7.86  | 8.9   | 12.95 | 3.7            | 3.7            |
| Umbral de agua disponible               | (mm horizonte <sup>-1</sup> )                                        | 3.8   | 3.8   | 3.8   | 4     | 8     | 10    | 3.8            | 3.8            |
| Biomasa máxima                          | (gr m <sup>-2</sup> )                                                | 0.89  | 20.27 | 46.05 | 21.08 | 8.31  | 50.94 | 362            | 1030           |
| Biomasa mínima                          | (gr m <sup>-2</sup> )                                                | 0     | 0     | 15.2  | 7.53  | 2.97  | 18.19 | 223            | 365            |

### 3.2.2. Datos de entrada del modelo

*Módulo de características de la vegetación:* se consideraron siete tipos funcionales de plantas: una especie exótica de conífera perenne, *Pinus ponderosa* (PINO) y seis tipos funcionales de plantas presentes en la comunidad de la estepa (Tabla 31): un arbusto deciduo leguminoso (ADL); un arbusto deciduo no leguminoso (ADNL); un arbusto siempreverde (ASV); un pasto con características xerofíticas (GRX); un pasto con características mesofíticas (GRM) y una hierba perenne (HRB). Se caracterizó la fenología de cada tipo funcional de planta a partir de una especie representativa de la comunidad de estepa en el área de estudio (Golluscio et al., 1982). Estas especies fueron: *Adesmia campestris* (ADL), *Mulinum spinosum* (ADNL), *Senecio filaginoides* (ASV), *Pappostipa speciosa* (GRX), *Bromus pictus* (GRM) y *Adesmia lotooides* (HERB). Los parámetros de proporción de raíces en cada estrato del perfil de los arbustos, los pastos y la hierba fueron obtenidos de Golluscio (2005) y Soriano et al. (1987) mientras que los de *Pinus ponderosa* se obtuvieron de Noretto et al. (2006). Se estimó la biomasa máxima de arbustos, pastos y hierbas a partir de mediciones a campo (Noretto et al., 2006) y censos de vegetación (Marcelo Noretto, datos no publicados). Para estimar la biomasa mínima, se tuvo en cuenta las relaciones de biomasa máxima y mínima estimadas por Paruelo y Sala, (1995) de 56 y 20 gr m<sup>-2</sup> para pastos y 20 y 0 gr m<sup>-2</sup> para arbustos.

La biomasa de *Pinus ponderosa* se obtuvo a partir de Noretto et al. (2006). Se consideraron las mediciones de biomasa en campo del mes de enero de 2004 y las relaciones alométricas para estimar la biomasa máxima de hojas verdes. Para estimar la biomasa mínima, se ajustó una función lineal entre los valores de biomasa máxima medidos a campo y el valor máximo de un índice de vegetación estimado mediante imágenes MODIS, el EVI (por sus siglas en inglés, Enhanced Vegetation Index) y se

obtuvo la ecuación ( $\text{Biomasa} = 4512.9 \times \text{EVI} - 630.31$ ,  $R^2 = 0.9498$ ). Esta ecuación resultó de asociar en cada lote forestal, el valor de biomasa de hojas verdes con el valor de EVI del píxel MODIS, ambos registrados en el mes de enero de 2004. A su vez, se extrajeron los valores de los píxeles y se graficó la dinámica estacional de este índice para el año 2004 (Figura 3.1). A partir del valor promedio de EVI de los píxeles ubicados en los lotes forestales de 13 y 25 años, se estimó el valor mínimo de biomasa verde. La transpiración máxima de los arbustos, los pastos y la hierba fueron obtenidos de Paruelo y Sala (1995). Para considerar el valor máximo de transpiración del pino, se tuvo en cuenta el valor de uso de agua por unidad de superficie de hoja de  $0.6 \text{ litros m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  (Gyenge et al., 2009) y un valor promedio aproximado de área foliar específica de  $6,2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  (Monserud and Marshall, 1999; Grulke and Retzlaff, 2001; Xu et al., 2001) resultando en  $3,7 \text{ gr H}_2\text{O gr biomasa}^{-1} \text{ día}^{-1}$ . Los valores de umbral de agua disponible para la vegetación considerados se obtuvieron de Paruelo y Sala, (1995).

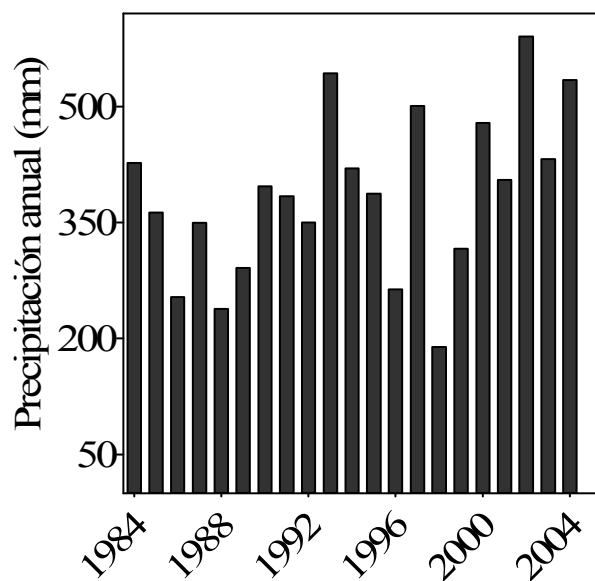


**Figura 3.1.** Dinámica anual del EVI para estepas y forestaciones de 13 y 25 años estimado a partir de la serie de imágenes MODIS del año 2004. Cada punto indica el valor promedio de EVI por fecha para cada cobertura.

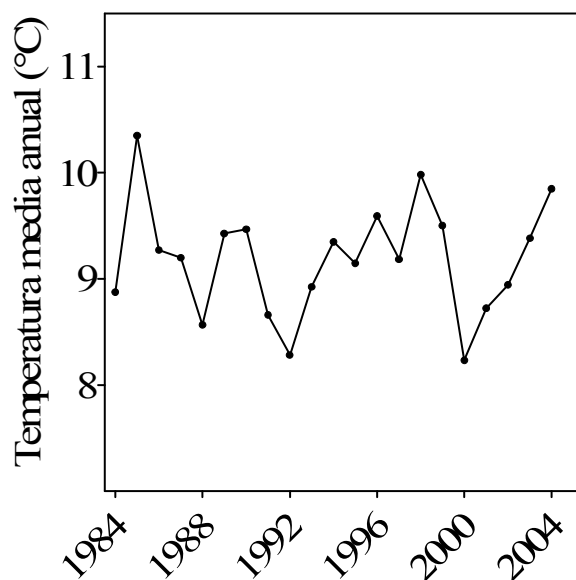
*Módulo de características del suelo:* el material originario del suelo es ceniza volcánica sobre depósito glacifluvial. Ubicado a 750 s.n.m., el sitio no presenta una pendiente importante. La superficie del suelo presenta un 60% de escombros con fragmentos menores a 2 cm de diámetro (pavimento de erosión incipiente). El color del suelo es pardo oscuro y drenaje excesivo. La textura del suelo es areno-franca en todo el perfil, no presenta alcalinidad ni salinidad perjudicial. En los horizontes A y C1 se encuentra un 30 % de fragmentos gruesos redondeados de tamaño menor a 0,5 cm de diámetro. Este perfil presenta bloques subangulares, finos, débiles y con tendencia a grano suelto. El límite entre estos dos horizontes es plano y difuso. El horizonte C2 presenta un 30 a 40 % de fragmentos gruesos y el límite con el horizonte C1 es abrupto. Se consideraron seis estratos con espesores de: 10, 10, 20, 40, 80 y 240 cm respectivamente. Se consideró el mismo valor de capacidad de campo (CC: 0.18) y

punto de marchitez permanente (PMP: 0.09) para todos los estratos. Las características del perfil del suelo fueron provistas por la estación experimental INTA Esquel.

*Módulo de registros climáticos:* los registros diarios de radiación se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Esquel (latitud: 42°52' S, longitud: 71°07' O) ubicada a aprox. 90 km del área de estudio para el período 1995- 2004. A partir de estos se calculó un valor promedio de radiación diario. Los registros diarios de precipitación y temperatura se obtuvieron de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: 42°04' S, longitud: 71°09' O) próxima al área de estudio para el período 1984 – 2004 (Figuras 3.2 y 3.3). Los valores promedio mensuales de precipitación y temperatura del período se muestran en el Apéndice II (Figuras 3.9 y 3.10 respectivamente). En los meses de verano de los primeros tres años de datos, hubo 68 registros faltantes de temperatura y precipitación diaria. Considerando la precipitación del resto de los años se completó con valor cero los registros de precipitación faltantes. Para completar los registros de temperatura en cambio, se consideró el valor promedio del día juliano de los años con registro disponible para completar el valor faltante. El período de simulación fue entonces de 21 años.



**Figura 3.2.** Distribución de las precipitaciones entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: 42°04' S, longitud: 71°09' O). Cada barra indica la lámina total anual.



**Figura 3.3.** Variación de la temperatura media entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: 42°04' S, longitud: 71°09' O). Cada punto indica el valor promedio anual de la temperatura media.

### 3.2.3. Experimentos de simulación y análisis de los datos

Para analizar escenarios plausibles y variaciones en los flujos hídricos resultantes de las plantaciones de especies siempreverde, se consideró la condición o estado inicial de la vegetación y la presencia de plantaciones. Para ello se generaron cuatro escenarios iniciales. En tres escenarios, se consideraron los seis tipos funcionales de vegetación más representativos de las comunidades de estepa. En dos de ellos, se consideró una biomasa verde inicial de  $49 \text{ gr m}^{-2}$  para simular un estado o condición degradada y en el tercer escenario se consideró una biomasa verde inicial de  $147 \text{ gr m}^{-2}$  para simular una condición no degradada. En uno de los dos escenarios simulados para la condición degradada, se incorporó un nuevo grupo funcional representado por *Pinus ponderosa* considerando un valor de biomasa inicial de  $362 \text{ gr m}^{-2}$  que representaría plantaciones de 13 años. En el cuarto escenario se consideró sólo un grupo funcional representado por *Pinus ponderosa* considerando un valor de biomasa inicial de  $1030 \text{ gr m}^{-2}$  que representaría plantaciones de 25 años de edad (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2.** Simulaciones del modelo según la condición inicial de las comunidades de estepa y la edad de las plantaciones de pino.

| <b>Simulaciones en DINAQUA</b> | <b>Vegetación</b>                            | <b>Biomasa verde aérea (gr)</b> |
|--------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| Condición Degradada            | Estepa                                       | 49                              |
|                                | Estepa +<br><i>Pinus ponderosa</i> (13 años) | 49 + 362                        |
| Condición no degradada         | Estepa                                       | 147                             |
| Sin estepa                     | <i>Pinus ponderosa</i> (25 años)             | 1030                            |



Las salidas del modelo pueden ser anuales o diarias. En ambos casos se obtiene un archivo con los valores de drenaje, evaporación actual, contenido hídrico de cada estrato de suelo y transpiración de cada tipo funcional considerado. Los flujos de salida son en mm, diarios o anuales. A partir de los valores anuales se describió la dinámica interanual de cada flujo, evaporación (E), transpiración (T) y drenaje (D) en el tiempo y se calcularon los flujos de pérdidas totales del período analizado (1984-2004). A partir de las salidas diarias se calculó para cada simulación, el valor mensual promedio del período y se describió la dinámica intra-anual de cada flujo.

Se analizaron diferencias de transpiración en dos años -1998 y 2002- de condiciones climáticas contrastantes. El registro anual de estos dos años correspondieron a los valores de mínima (198 mm en 1998) y máxima (509.5 mm en 2002) precipitación total registradas en los 21 años analizados (Figura 3.2). A su vez, el valor promedio anual de temperatura media coincidieron con los valores máximo (10.2 °C en 1998) y mínimo (8.25 °C en 2002) (Figura 3.3).

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Variación en el largo plazo de las pérdidas por evaporación, transpiración y drenaje de la estepa y pinos de distintas edades

Para los 21 años simulados, las pérdidas totales de agua por transpiración (T), evaporación (E) y drenaje profundo (D) de la estepa no degradada fueron 29%, 41% y 30% respectivamente (Figura 3.4). La evaporación fue el flujo de pérdida de agua que menos varió entre la condición degradada y la no degradada. En cambio, la transpiración disminuyó un 19% y el drenaje profundo aumentó un 17% en la condición de la estepa degradada (Figura 3.4). La presencia de pinos en la condición de la estepa degradada, redujo la evaporación total un 4% y el drenaje profundo un 43% mientras que la transpiración de la estepa se redujo un 2%.

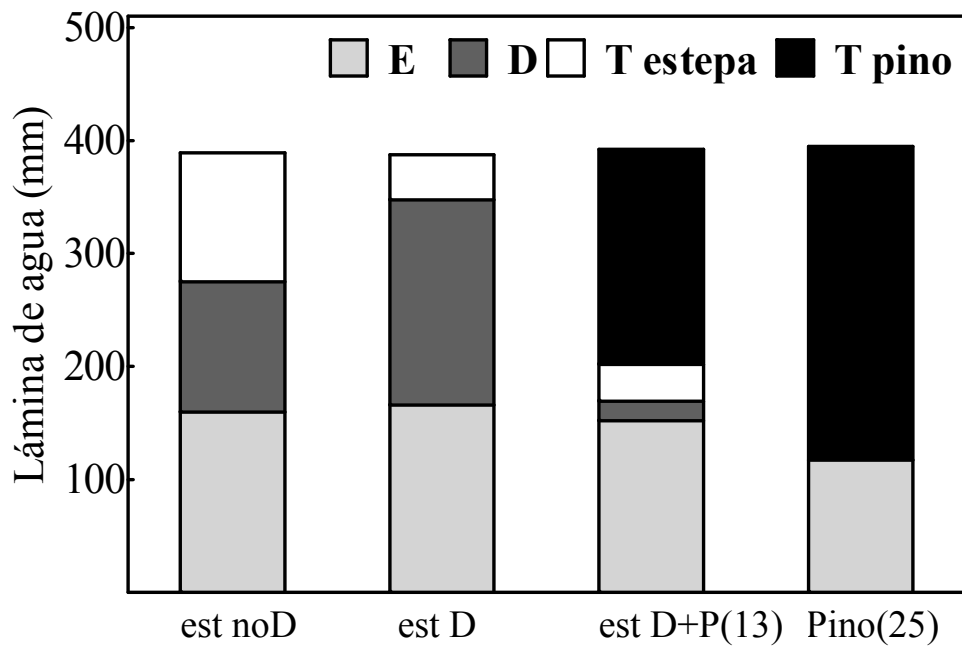
La dinámica temporal de la transpiración de la estepa fue similar en los tres escenarios simulados. El coeficiente de variación interanual (Cv) de este flujo fue menor al 1% en la condición degradada y menor al 10% en la condición no degradada (Figura 3.5). La magnitud anual de este flujo en cambio varió según la condición de la estepa, fue en promedio tres veces más alta en la estepa no degradada (114 mm) que en la degradada (46 mm) (Figuras 3.5.A y B). En promedio, la transpiración representó el 44% y 32 % de la precipitación media anual para la condición degradada y no degradada respectivamente. A su vez, la transpiración de la estepa en la condición degradada, se redujo un 18% en presencia de pinos de 13 años (Figura 3.5.C).

La variación interanual de la transpiración de los pinos de 13 años fue menor que la de los pinos de 25 años. La transpiración anual mínima y máxima de los pinos de 13 años fue 141 y 228 mm año<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 3.5.C) y en pinos de 25 años estos valores fueron 164 y 473 mm año<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 3.5.D). La

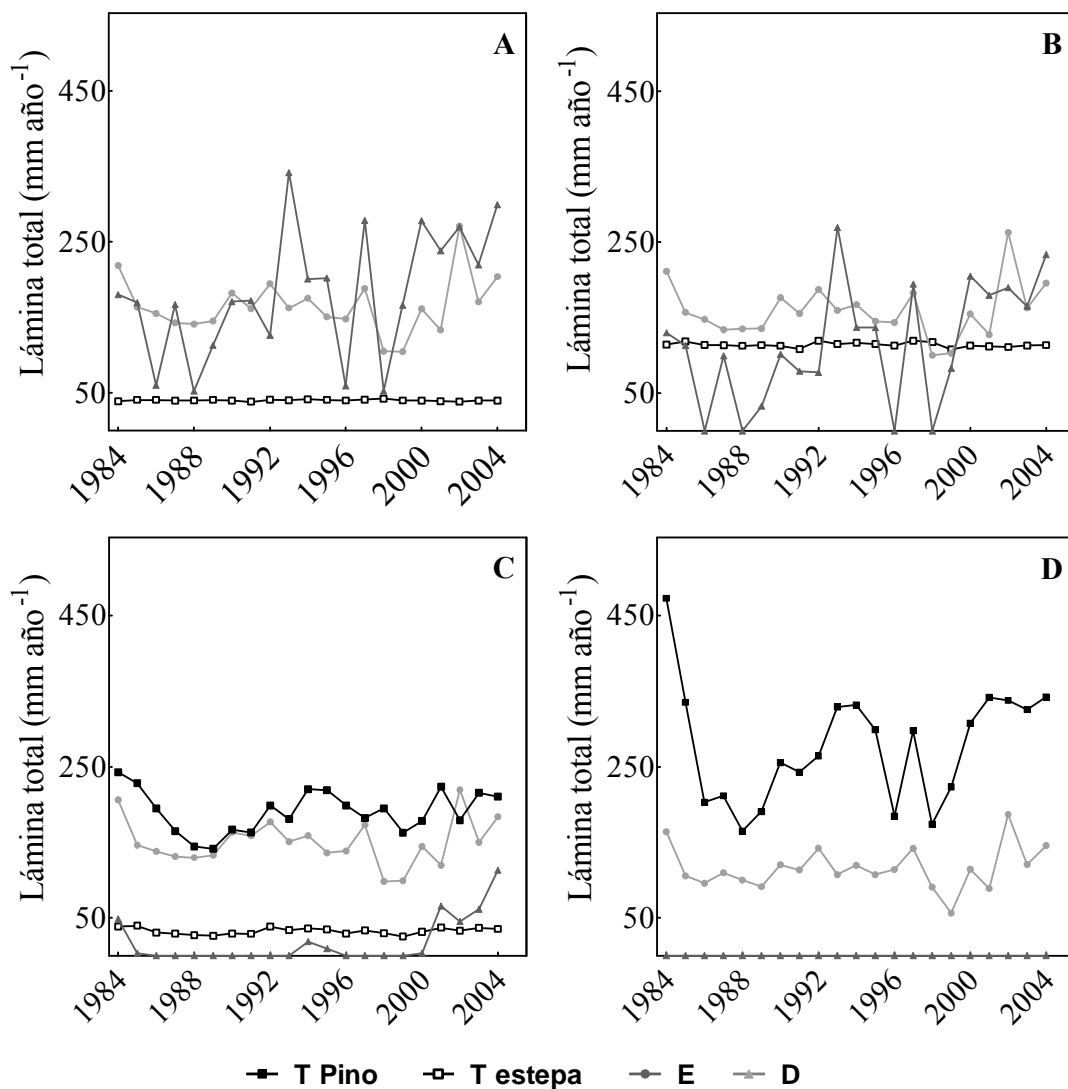
transpiración anual de los pinos de 25 años fue en promedio un 30% más alta que la de los pinos de 13 años.

Las pérdidas por drenaje profundo tuvieron una variación interanual similar para ambas condiciones iniciales de la estepa. El valor máximo de drenaje profundo en ausencia de pinos fue 342 mm en el año 1993 de la condición degradada (Figura 3.A) y el valor mínimo fue cero en el año 1998 de la condición no degradada (Figura 3.B). En presencia de pinos de 13 años, el drenaje profundo se redujo un 90% (Figura 3.5.C) mientras que en presencia de pinos de 25 años, no se observó drenaje profundo (Figura 3.5.D).

La variación interanual de las pérdidas por evaporación fue similar en los cuatro escenarios, los valores anuales máximo y mínimo se registraron en los años 2002 y 1998 respectivamente. En ausencia de pinos, la magnitud anual de este flujo varió entre 102 y 267 mm año<sup>-1</sup>, siendo un 4% mayor en la condición degradada de la estepa. En el escenario con pinos de 13 años la evaporación promedio anual se redujo un 9% (Figura 3.5.C) y un 30% en el escenario con pinos de 25 años (Figura 3.5.D).



**Figura 3.4.** Flujos totales de pérdida de agua por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de la estepa no degradada (est noD), condición inicial de estepa degradada (est D) en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años y condición de *Pinus ponderosa* de 25 años en ausencia de estepa.



**Figura 3.5.** Dinámica en el largo plazo (interanual) de los flujos de pérdida por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de estepa degradada en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años (paneles A y C), condición inicial de la estepa no degradada (panel B) y condición de *Pinus ponderosa* de 25 años en ausencia de estepa (paneles D). Cada punto indica el valor total anual de cada flujo en el período 1984-2004.

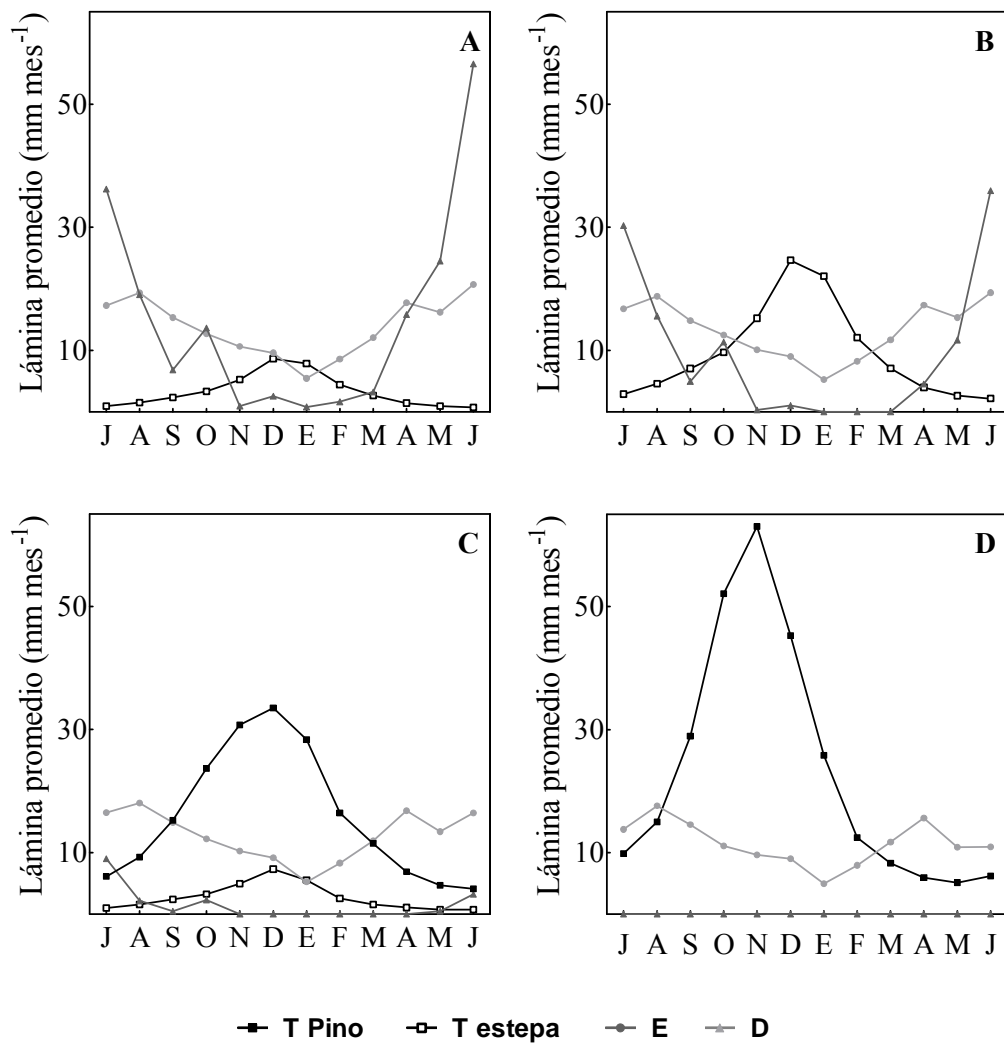
### 3.3.2. Variación estacional de las pérdidas por evaporación, transpiración y drenaje de la estepa y pinos de distintas edades

La transpiración de la estepa tuvo una marcada estacionalidad a lo largo del año, en las dos condiciones; el valor máximo se observó en el mes de diciembre, siendo estos valores de 8.6 y 24.6 mm mes<sup>-1</sup> para las condiciones degradada y no degradada, respectivamente. A su vez, el valor mínimo se observó en el mes de junio en las dos condiciones, siendo estos valores 0.7 y 2.2 mm mes<sup>-1</sup> para las condiciones degradada (Figuras 3.6.A) y no degradada (Figuras 3.6.B), respectivamente. La dinámica inversa se observó en las pérdidas por drenaje, donde la estepa degradada perdió en el mes de máximo (junio) y mínimo drenaje (enero), un 36% y 100% más de agua que la estepa no degradada (Figuras 3.6.A y B).

La transpiración del pino también tuvo una marcada estacionalidad y la dinámica de este flujo a lo largo del año fue similar entre pinos de 13 y 25 años. El valor máximo promedio se observó, en diciembre (34 mm mes<sup>-1</sup>) en pinos de 13 años (Figura 3.6.C) y en noviembre (62 mm mes<sup>-1</sup>) en pinos de 25 años (Figura 3.6.D). En los dos escenarios el valor mínimo de transpiración se observó en junio siendo 4 y 6 mm mes<sup>-1</sup> para pinos de 13 y 25 años respectivamente (Figuras 3.6.C y D).

En los cuatro escenarios simulados, la evaporación fue el flujo que tuvo menor variación estacional. La evaporación en presencia de pinos de 13 años (Figura 3.6.C) fue un 6% menor que en los escenarios sin pinos (Figuras 3.6.A y B) mientras que en el escenario con pinos de 25, la evaporación fue un 8% menor (Figura 3.6.D). En los cuatro escenarios simulados, el valor mínimo de evaporación se observó en el mes de enero mientras que los valores máximos se observaron en junio (20 mm mes<sup>-1</sup>) en ambas condiciones de la estepa (Figura 3.6.A y B) y en agosto en los escenarios con pinos de 13 (18.1 mm mes<sup>-1</sup>) y 25 años (17.3 mm mes<sup>-1</sup>) respectivamente.

En el escenario con pinos de 13 años (Figura 3.6.C) las pérdidas por drenaje profundo fueron un 90% menor que en el escenario sin pinos (Figura 3.6.A) mientras que en el escenario con pinos de 25 años no se observó drenaje profundo.



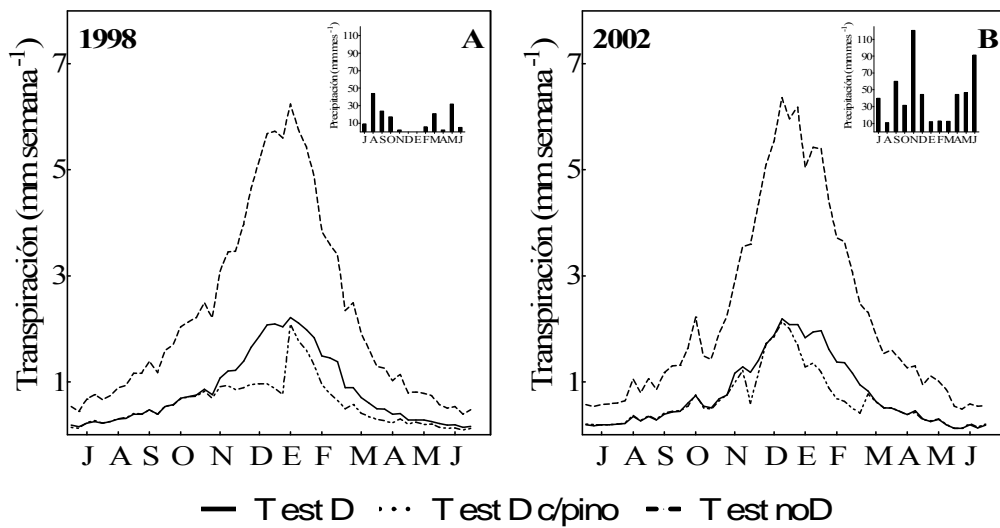
**Figura 3.6.** Dinámica anual de los flujos de pérdida por drenaje profundo (D), evaporación directa (E) y transpiración (T) para cuatro escenarios: condición inicial de estepa degradada en ausencia y presencia de *Pinus ponderosa* de 13 años (paneles A y C), condición inicial de la estepa no degradada (panel B) y condición de *Pinus ponderosa* de 25 años en ausencia de estepa (paneles D). Cada punto indica el valor mensual promedio de cada flujo en el período 1984-2004.

### 3.3.3. Dinámica anual de la transpiración de la estepa y pinos de distintas edades en dos condiciones de precipitación contrastantes

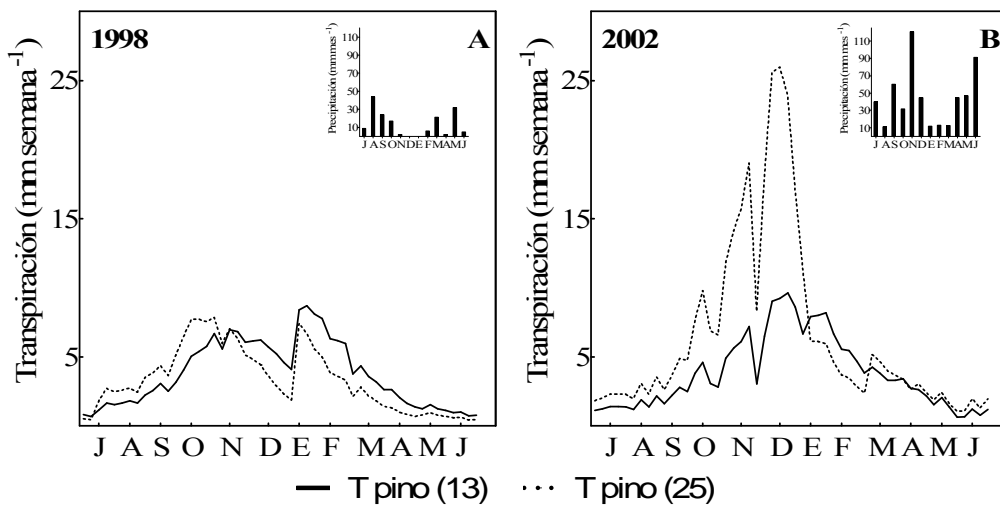
La dinámica de la transpiración de la estepa en ausencia de pinos fue similar en los dos años en los tres escenarios simulados (Figuras 3.7.A y B). En la condición degradada, la magnitud del flujo no fue distinta entre años pero disminuyó en presencia de pinos un 30% en el año seco (Figura 3.7.A) y un 17% en el año húmedo (Figura 3.7.B). En los tres escenarios, los valores máximos de transpiración de la estepa se observaron en el mes de enero en el año seco (1998) (Figura 3.7.A) y en el mes de diciembre en el año húmedo (2002) (Figura 3.7.B). En promedio entre los dos años, el valor máximo de transpiración de la estepa en la condición degradada fue 2.25 y 2.10 mm semana<sup>-1</sup> en ausencia y presencia de pinos respectivamente. En la condición no degradada este valor fue 6.3 mm semana<sup>-1</sup>. En los tres escenarios en los dos años, los valores mínimos de transpiración de la estepa se observaron en el mes de junio (Figuras 3.7.A y B). En presencia de pinos la dinámica de la transpiración de la estepa fue similar a la dinámica en ausencia de pinos.

La dinámica y magnitud de la transpiración de pinos de 13 años fue similar en los dos años analizados (Figuras 3.8.A y B). En el año seco (1998) el valor máximo de transpiración se observó en el mes de enero (8.7 mm semana<sup>-1</sup>; Figura 3.8.A) mientras que en el año húmedo (2002), este valor se observó en el mes de diciembre (9.6 mm semana<sup>-1</sup>; Figura 3.8.B). En pinos de 25 años, tanto la dinámica como la magnitud de la transpiración fueron distintas entre los dos años. El pino transpiró un 49% más en el año húmedo (Figura 3.8.B) que en el seco (Figura 3.8.A). En el año seco (1998), el valor máximo de transpiración se observó en octubre (7.8 mm semana<sup>-1</sup>) mientras que en el año húmedo este valor se observó en noviembre (25.9 mm semana<sup>-1</sup>) (Figuras 3.8.A y B).





**Figura 3.7.** Dinámica anual de la transpiración de la estepa (T) en tres escenarios: estepa degradada (D) en ausencia y presencia de pinos de 13 años (D c/pino) y estepa no degradada (noD) en dos años de condiciones climáticas distintas 1998 (A) y 2002 (B), cuyas precipitaciones fueron 189 mm y 509.5 mm respectivamente. Cada punto indica el valor de transpiración semanal. Dentro de cada panel se muestra la distribución mensual de las precipitaciones.



**Figura 3.8.** Dinámica anual de la transpiración (T) de pinos de 13 y 25 años en dos años de condiciones climáticas distintas 1998 (A) y 2002 (B), cuyas precipitaciones fueron 189 mm y 509.5 mm respectivamente. Cada punto indica el valor de transpiración semanal. Dentro de cada panel se muestra la distribución mensual de las precipitaciones.

### 3.4. Discusión

Las simulaciones sobre el establecimiento de pinos en la estepa patagónica sugieren una importante modificación en los flujos hídricos. El flujo de pérdida de agua que se vio más afectado por el establecimiento de pinos fue el drenaje profundo, seguido por la transpiración de la estepa y la evaporación directa del suelo (Figura 3.4). Los pinos, al tener mayor biomasa y profundidad de raíces (Nosetto et al., 2004) pudieron utilizar recursos hídricos no accesibles para los grupos funcionales de la estepa. A su vez, al tener mayor biomasa verde, los pinos tuvieron mayor intercambio con la atmósfera (Calder, 1998). La presencia de pinos no modificó la dinámica anual de la transpiración de la estepa (Figura 3.3), el valor máximo de transpiración fue en diciembre coincidiendo con lo observado en la estimación de ET mediante sensores del capítulo anterior (Figura 2.2). A pesar de que en este capítulo se promediaron valores de 21 años y en el capítulo anterior se analizaron sólo dos períodos de crecimiento, las estimaciones de los valores máximos coincidieron. Por último, la presencia de pinos disminuyó la magnitud de la evaporación anual pero no la dinámica intra e interanual de este flujo. La disminución en la magnitud de este flujo posiblemente esté asociada al consumo de agua de los pinos. En cambio, la dinámica de la evaporación, que coincidió con la dinámica de las precipitaciones, estaría mayormente asociada a disponibilidad hídrica del estrato superior del suelo (Paruelo et al., 1999), determinada principalmente por la textura y la pedregosidad del mismo (Paruelo, 1984).

En la estepa patagónica, la estación de crecimiento y el período de lluvias ocurren en dos momentos del año distintos. La predominancia de lluvias invernales da lugar a pérdidas de agua por drenaje profundo (Paruelo et al., 1999). En ausencia de pinos, la transpiración y la evaporación de la estepa tuvieron una marcada

estacionalidad y una dinámica anual inversa, coincidiendo con lo descrito por Paruelo y Sala (1995) para sitios de estepa patagónica con características similares. La transpiración fue máxima en los meses de verano (noviembre-febrero) mientras que la evaporación lo fue en los meses de mayor disponibilidad hídrica (abril-agosto). Los valores máximos de drenaje profundo en cambio, estuvieron acotados a los meses de invierno, que es cuando se dan la mayor parte de las precipitaciones (Figura 3.3).

La relación anual entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (PPT/EVPOT) varió entre 0.14 y 0.5. El análisis mensual de esta relación mostró que en promedio, PPT/EVPOT fue mayor a 0.8 entre los meses de abril y septiembre. Esto indicaría que el agua no sería un factor limitante en por lo menos parte del año. A pesar de ello, las especies que dominan los ambientes semiáridos tienen tasas de crecimiento relativamente bajas ya que deben compensar entre el crecimiento y resistencia a la sequía (Grime et al., 1997; Tilman, 1998). Esto limitaría la respuesta de la vegetación a cambios en las precipitaciones y dichos cambios podrían llevar un tiempo prolongado (Paruelo et al., 1999). En este capítulo se observó que a igual biomasa verde, la estepa no transpiró más en el año con mayor ingreso de agua al sistema (Figuras 3.5 y 3.7), sugiriendo una baja respuesta marginal de la vegetación a cambios en las precipitaciones (Paruelo et al., 1999; Verón et al., 2006). En los pinos, la respuesta marginal a cambios en las precipitaciones fue distinta ya que a igual biomasa verde, pinos de 25 años, transpiraron un 50 % más en el año con mayor ingreso de agua al sistema (Figura 3.8).

Al comparar los valores de ET obtenidos por la aproximación mediante sensores remotos y el modelo de simulación, se observó que, para el mismo período (nov-2003 a mar-2004), el valor promedio mensual de ET mediante sensores remotos fue mayor que el simulado con DINAQUA. La correlación entre los valores simulados y los derivados

de sensores remotos fue  $Y = 1.36 X + 39$  ( $r^2=0.58$ ,  $n=5$ ) para la estepa y  $Y = 1.26 X + 14.5$  ( $r^2=0.94$ ,  $n=5$ ) para la forestación, donde Y es el valor de ET mensual estimado mediante sensores remotos y X es el valor mensual de ET simulado con DINAQUA. El valor promedio diario de ET simulado con DINAQUA y con SR para este período fue  $0.65 \text{ mm día}^{-1}$  y  $2 \text{ mm día}^{-1}$  para la estepa y  $1 \text{ mm día}^{-1}$  y  $2.8 \text{ mm día}^{-1}$  para la forestación respectivamente. Es decir que, la estimación mediante SR fue 67% y 63% más alta que lo simulado con DINAQUA para la estepa y la forestación. Las diferencias de ET entre modelos pueden deberse a que a diferencia del modelo, las estimaciones mediante SR se realizaron en días soleados en donde, si existe disponibilidad hídrica, la ET es mayor que en días nublados. La combinación de dos aproximaciones metodológicas permitió analizar las consecuencias de la forestación de pastizales desde dos perspectivas, el balance de energía mediante SR y el balance hídrico con DINAQUA. No disponemos para este sitio de mediciones a campo de ET como para evaluar los resultados de los modelos, las mediciones de consumo de agua de estepas ( $1.94 \text{ mm día}^{-1}$ ) y forestaciones de *Pinus ponderosa* ( $3.79 - 2.15 \text{ mm día}^{-1}$ , según la densidad de la plantación) más próximas al área de estudio, se ubican en sitios donde la precipitación media anual (684 mm) es el doble que en los sitios de este trabajo (389 mm) (Gyenge et al., 2005; Licata et al., 2008). Sin embargo, aún las estimaciones son importantes, en términos de la dinámica del agua ambas aproximaciones permiten postular consecuencias similares de la forestación con pinos de la estepa: una importante reducción del drenaje profundo en un escenario de forestación, aún con las estimaciones de pérdida de agua más bajas (DINAQUA).

Las diferencias de transpiración de pinos según la edad de la forestación estarían asociadas, principalmente a diferencias de área foliar. Sin embargo, a diferencia de otros trabajos en donde se plantea un consumo de agua sostenido en el tiempo (Gyenge et al.,

2002; Licata et al., 2008), en condiciones extremas de déficit hídrico, los pinos no estarían sosteniendo altas tasas de transpiración (Figura 3.8.A). Restaría entonces evaluar cómo responderían las forestaciones mayores a 25 años, si se sucedieran años secos y de qué manera impactaría este tipo de escenarios sobre el balance hídrico del sistema. Esto toma particular importancia en el contexto productivo en el que se enmarca el avance forestal en el noroeste de la estepa patagónica.

## **Capítulo 4**

**Diferencias de funcionamiento de distintas unidades de vegetación del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar.**

## 4.1. Introducción

La definición de áreas protegidas en zonas que estuvieron sometidas durante largos períodos al uso antrópico representa un cambio en el uso del suelo en sentido contrario a los cambios que implican algún tipo de “agriculturización”, ya sea con cultivos anuales o perennes. Este tipo de cambio, ha adquirido especial importancia en Europa como consecuencia de las políticas activas sobre los espacios protegidos (Guo, 2002; Paul, 2002; Mendoza-Fernández et al., 2009). En particular, el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar ubicado en el sureste de la Península Ibérica, ha recibido especial atención para su conservación por ser un remanente de los ambientes semiáridos del continente europeo (Aranda y Oyonarte, 2005; Peñas de Giles et al., 2006) que contiene una alta diversidad de tipología de suelos (Ibáñez et al., 1998; Aranda y Oyonarte, 2005) y numerosas especies endémicas (Médail y Quédez, 1999; Mendoza-Fernández et al., 2009).

Las áreas protegidas, además de su importancia intrínseca, proveen valores de referencia para evaluar el impacto del cambio en el uso del suelo sobre el funcionamiento ecosistémico (Paruelo et al., 2005). En los últimos años, los avances en teledetección permitieron cartografiar la heterogeneidad funcional de los ecosistemas en áreas protegidas (Piñeiro et al., 2002; Garbulsky et al., 2004; Fernandez et al., 2008; Fernandez et al., 2010, Roldán et al., 2010). Estos estudios complementan, con variables que presentan una menor constante de tiempo de respuesta, a los estudios de estructura de la vegetación (Paruelo et al., 2001; Alcaraz et al., 2006; Alcaraz et al., 2009). El uso de áreas protegidas como situación de referencia requiere de una adecuada caracterización de la variabilidad espacial y temporal y de las distintas unidades a comparar con situaciones bajo uso.

El análisis de variables funcionales, permite evaluar cambios en el estado de conservación de la vegetación en el tiempo y en el espacio. Algunas de las variables biofísicas que caracterizan el funcionamiento de los sistemas están relacionadas con la productividad primaria y los componentes del balance de energía (Paruelo et al., 2005; Fernández et al., 2008; Fernández et al., 2010). La estimación de variables de funcionamiento mediante sensores remotos ha adquirido relevancia en estudios sobre descriptores o indicadores de cambios del funcionamiento ecosistémico (Baldi et al., 2008), tendencias de estos cambios (Baldi et al., 2008; Alcaraz et al., 2009) y seguimiento y monitoreo de la cobertura vegetal (Oyarzabal et al., 2008) y del suelo (Escribano, 2009). Este tipo de aproximaciones permite incorporar en el análisis, registros pasados y objetivos de los distintos estados de la vegetación.

El Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, ubicado en un área árida, es un mosaico de paisajes resultantes no sólo de procesos naturales sino también de la historia de uso antrópico como consecuencia del uso agrícola y ganadero que se ha producido con distinta intensidad. Es un sistema ideal para evaluar consecuencias del diseño de políticas ambientales y la planificación de programas de conservación ya que se han realizado estudios detallados de unidades homogéneas de vegetación, litología y paisaje denominadas “ecotopos” (Escribano, 2002).

El objetivo general de este capítulo es analizar diferencias en el funcionamiento de distintos tipos de vegetación (ecotopos) en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar sometidos a distinto nivel de conservación. Esto permitirá avanzar en el conocimiento sobre los efectos de las políticas de conservación en el funcionamiento ecosistémico y la caracterización de la variabilidad espacial y temporal de situaciones de referencia.



## **Objetivos específicos**

1. Analizar cómo difiere el funcionamiento de las distintas unidades de vegetación (“ecotopos”) bajo distinto régimen de protección.
2. Analizar tendencias en el tiempo de las distintas unidades de vegetación (“ecotopos”) bajo distinto régimen de protección.

## **4.2. Aproximación metodológica**

### 4.2.1. Descripción del área de estudio

El trabajo se desarrolló en el parque Natural Cabo de Gata- Níjar (PNCGN) y un área lindante de similar superficie. Esta área fue establecida como Parque Natural en 1987 y declarada Reserva de Biósfera en 1997. Es considerado el sitio más seco de Europa occidental y es una de las pocas áreas semi-desérticas y de estepas del continente que está protegida (Escribano, 2002). La precipitación media anual es de 178 mm y la temperatura media anual es de 18.1 °C. Las temperaturas promedio máxima y mínima son de 21.7 °C y 14.6 °C respectivamente (Paruelo et al., 2005). El índice de aridez (Ia) se encuentra próximo a 0.2, en el límite del árido. El parque, se ubica entre los 37°6' y 38°48' de latitud norte y los 2°18' y 1°51' de longitud este, en la provincia de Almería al sureste de España y abarca una superficie terrestre de 380 km<sup>2</sup> (Figura 4.1).

En el paisaje del parque se distinguen dos unidades geomorfológicas diferentes, la más extensa son montañas de origen volcánico formadas por distintos tipos de materiales. La segunda unidad, de menor superficie, la compone la planicie costera. Tanto en el parque como en el área lindante existe una alta diversidad de tipos de suelos de distintos orígenes y de numerosos materiales que han dado como resultado de su interacción un paisaje edáfico caracterizado por una alta heterogeneidad espacial (Escribano, 2009). En los ambientes de montaña, según su posición en el relieve, se pueden encontrar distintos tipos de suelos, Entisoles (Xerorthents) en las partes altas, y Mollisoles y Aridisoles en las laderas: Haploxerolls en las partes medias, y Calcixerolls y Calciorthids en la parte baja de las laderas. En los ambientes de piedemontes, que son

principalmente deposicionales, los suelos pertenecen al orden Aridisoles en su mayoría, se encuentran Calciorthids y Haplargids (Cecilio Oyonarte, com. pers.).

En general, los suelos son de textura franca o franca arenosa en superficie y franco subsuperficialmente, excepto en las tipologías con horizonte árgico donde es arcillosa. Los suelos de montaña son poco profundos, con contacto lítico en los primeros 50 cm mientras que, en los piedemontes, el suelo es profundo. En todos los casos el contenido de grava es elevado. La capacidad de retención de agua es buena pero la escasa profundidad en los suelos de montaña hace que la reserva total, en el mejor de los casos, sea moderada. Los suelos del piedemonte en cambio, presentan reservas de agua elevadas. El pH de los suelos es básico, entre 7 y 8,5 y no presentan problemas de salinidad, salvo en localizaciones muy concretas asociadas al mal uso agrícola.

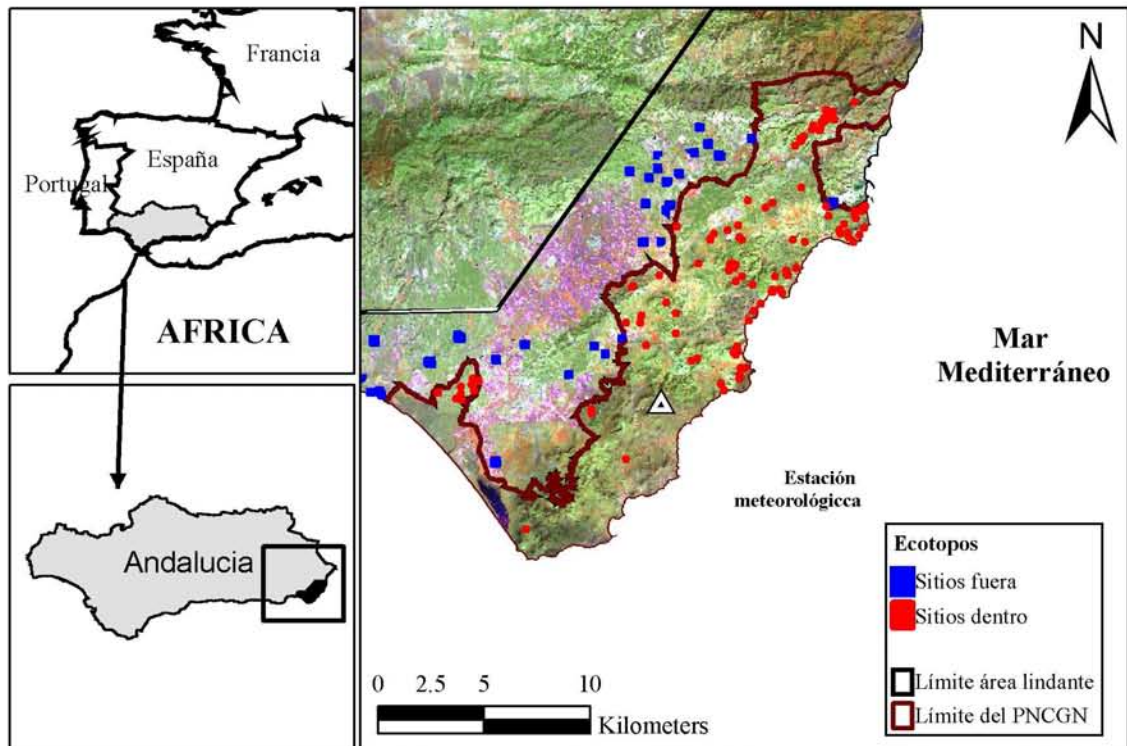
La vegetación está estrechamente asociada a la diversidad de tipos de paisajes que se encuentran en el área. A partir de un mapa de suelos, se identificaron las unidades de paisaje y tipos de litorelieve y se realizó una clasificación jerárquica en la que se consideraron: la especie dominante, la fisonomía, el ambiente geomorfológico, los usos del territorio y el carácter funcional. Se obtuvo una cartografía del parque a escala 1:10.000 en las que quedaron identificadas las distintas unidades de vegetación llamadas “ecotopos” (Escribano, 2002). A los fines de este capítulo, se extrajo una síntesis de los tipos de vegetación relevantes, espartales, pastizales y secanos. Los espartales o matorrales son las formaciones más abundantes del parque y constituyen la matriz del paisaje. Estos ambientes se encuentran dominados por *Stipa tenacissima* y acompañan en menor proporción *Dactylis hispanica*, *Avenula murcica*, *Dipcadi serotinum* y *Chamaerops humilis* (Escribano, 2008), cuya estructura y funcionamiento son similares a los de una estepa gramínea o gramínea-arbustiva. Los pastizales tienen

coberturas variables, suelen ser ricos en especies y pueden ser densos. Dominan especies xerofíticas como *Hypparrhenia hirta* (Escribano, 2008). Los secanos son áreas de cultivo donde pueden encontrarse diversas plantaciones de cereales, olivos o almendros. Estos cultivos sólo reciben agua de lluvia. En las áreas menos modificadas del parque, pueden encontrarse acompañados de arbustos como *Pistacia lentiscos* y *Quercus coccifera*. Cabe destacar que, la vegetación en el área ha sido manejada históricamente y luego de tantos años bajo uso antrópico los espartales dominados por *Stipa tenacissima* se consideran formaciones naturales (Escribano, 2008).

El área que contiene el parque y el su entorno ha sido tradicionalmente explotada para la actividad minera, la ganadería (cabras y ovejas principalmente), la agricultura tradicional y la pesca (Escribano, 2008). Estas actividades continuaron en el área lindante al parque hasta la actualidad. En cambio, luego de la formación del parque y dentro del régimen de protección establecido, dentro del parque sólo se permitieron la actividad ganadera en arbustales y la agricultura tradicional en terrazas (Escribano, 2002).

#### 4.2.2. Ubicación de sitios y selección de imágenes satelitales

Para analizar el funcionamiento de las distintas unidades de vegetación y evaluar diferencias del funcionamiento según el régimen de protección, se consideraron las pérdidas de agua por evapotranspiración (ET), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) y Absorbida por el canopeo (RFAA) en sitios ubicados dentro y fuera del PNCGN (Figura 4.1). La ubicación y delimitación de los sitios dentro y fuera del parque fue provista por Cecilio Oyonarte.



**Figura 4.1.** Zona de estudio, Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (PNCGN) y área lindante, límites en rojo oscuro y negro respectivamente, ubicados al sur de Almería. Se indica la estación meteorológica con un triángulo y los ecotopos según se encuentren dentro (rojo) o fuera (azul) del parque. Imagen falso color compuesto Landsat 5TM, 10 de marzo de 2006.

Al igual que en el capítulo 2, la resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes Landsat resulta particularmente adecuada para el desarrollo de los objetivos de este capítulo. La resolución espectral permitió estimar ET, fRFA y RFAA. La resolución espacial, de 30 m en todas las bandas reflectivas y 120 m en la banda térmica permitió identificar áreas homogéneas de vegetación tanto dentro como fuera del parque. La frecuencia temporal de registro del sensor, cada 16 días, permitió obtener 7 imágenes Landsat 5 TM (escena 199/34) libres de nubes entre los años 1984 y 2005 en fechas de verano que fueron: 20-ago-84, 13-ago-87, 9-sep-91, 1-sep-94, 29-jul-99, 9-ago-03 y 13-jul-05. Para que el estado hídrico de la vegetación y del suelo al momento del registro de cada imagen fuera comparable, se verificó la ausencia de lluvias durante

los 90 días previos a la fecha de registro de la imagen y se obtuvieron disponibles sólo 7 fechas que cumplieran esta condición. Las imágenes fueron provistas y corregidas geométricamente por la Junta de Andalucía. Se procesaron con el Software ENVI 4.2 y para minimizar los efectos atmosféricos por presencia de aerosoles se corrigieron las bandas no térmicas mediante la aproximación Rayleigh (Irish, 2000).

La unidad muestreada, el “ecotopo”, fue caracterizado por presentar características homogéneas en los tres niveles de jerarquía: paisaje, litorelieve y vegetación (Escribano, 2009). Sobre la cartografía del parque, se identificaron un total de 34 ecotopos de los cuales, a los objetivos de este capítulo se seleccionaron sólo tres de ellos con diferente vegetación: seco, pastizal y espartal presentes también en el área lindante (Tablas 4.1). Se analizaron diferencias de funcionamiento entre los tipos de coberturas según su régimen de conservación y se evaluaron las tendencias de su funcionamiento en el tiempo. El muestreo se realizó sobre una grilla definida por píxeles de la imagen Landsat. Se delimitaron para cada uno de los ecotopos, 20 lotes de 90 m de lado lejos de los bordes dentro del parque y 15 lotes de 90 m de lado en el área lindante (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1.** Características de los sitios dentro y fuera del PNCGN analizados en las 7 fechas Landsat 5 TM para tres tipos de vegetación: espartal, pastizal y seco.

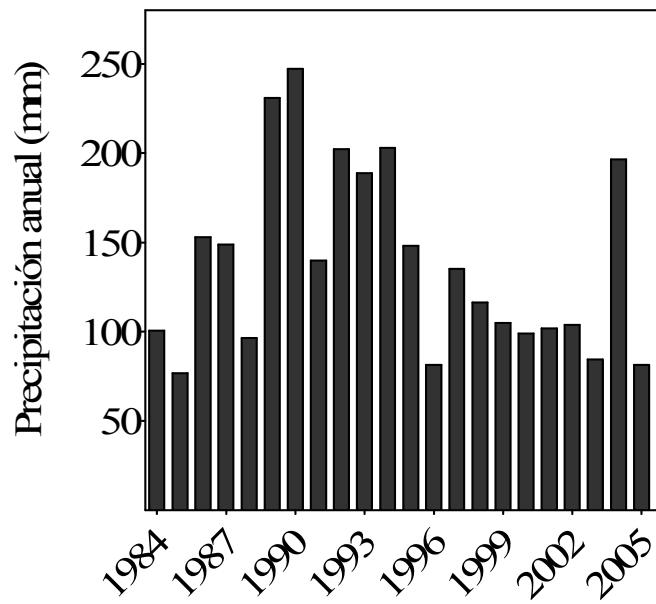
| <b>Ubicación</b>         | <b>Paisaje</b> | <b>Litorelieve</b>     | <b>Vegetación</b> | <b>Leyenda del ecotopo</b> | <b>Nº de Sitios</b> |
|--------------------------|----------------|------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>Dentro del parque</b> | Piedemonte     | Glacis coluvio-aluvial | Espartal          | EspD                       | 20                  |
|                          | Planicie       | Llanura Eólica         | Pastizal          | PasD                       | 20                  |
|                          | Piedemonte     | Abanico Coluvial       | Secano            | SecD                       | 20                  |
| <b>Fuera del parque</b>  | Piedemonte     | Glacis coluvio-aluvial | Espartal          | EspF                       | 15                  |
|                          | Planicie       | Llanura Eólica         | Pastizal          | PasF                       | 15                  |
|                          | Piedemonte     | Abanico Coluvial       | Secano            | SecF                       | 15                  |

#### 4.2.3. Estimación de evapotranspiración

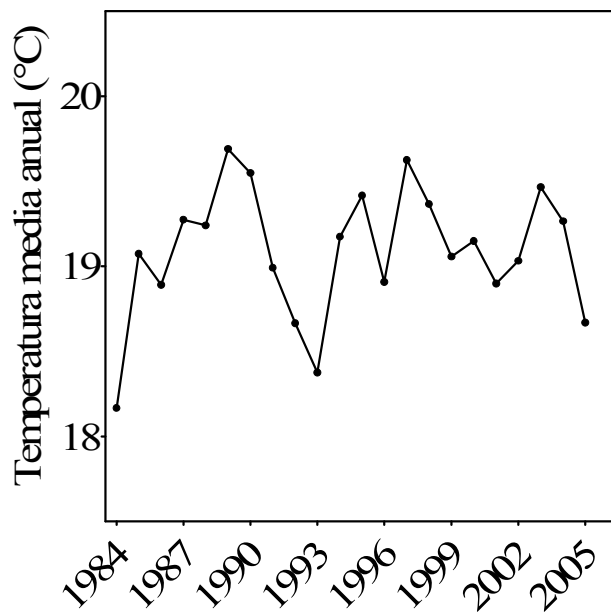
En este capítulo se aplicó la misma aproximación metodológica que en el capítulo 2: “Efecto de las plantaciones de Pino ponderosa sobre la las pérdidas de agua por evapotranspiración en el noroeste de la estepa patagónica”. Se estimó mediante imágenes satelitales e información climática, la evapotranspiración diaria a partir de la temperatura superficial y la radiación neta basada en el método simplificado de balance energético propuesto por Jackson, (1985). Los cálculos para estimar ET, fRFA y RFAA se desarrollaron en la sección 2.2.3 (pág. 19 a 21) y las estimaciones de albedo y temperatura superficial en el Apéndice I.

#### 4.2.4. Datos climáticos

Los registros diarios de heliofanía y radiación se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería (latitud: 36°47' N, longitud: 2°22' E), próxima al área de estudio (aprox. 20 km). Se utilizaron los datos de heliofanía y tensión de vapor para corregir la temperatura de la superficie obtenida del sensor TM de la plataforma Landsat 5. Los registros de radiación global se utilizaron para estimar el balance radiativo de la superficie y los registros diarios de temperatura permitieron estimar la diferencia térmica entre el aire y la superficie. Los registros diarios de precipitación y temperatura se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería (Figura 4.2 y 4.3).



**Figura 4.2.** Distribución de las precipitaciones entre los años 1984 y 2005 de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería (latitud: 36°47' N, longitud: 2°22' E). Cada barra indica la lámina total anual.



**Figura 4.3.** Variación de la temperatura media entre los años 1984 y 2005 de la estación meteorológica del aeropuerto de Almería (latitud: 36°47' N, longitud: 2°22' E). Cada punto indica el valor promedio anual de la temperatura media.



#### 4.2.5. Análisis de datos

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico InfoStat 1.1 (2009). Para evaluar diferencias en las características radiométricas de espartales, secanos y pastizales, se consideraron las siguientes variables: albedo, diferencia térmica entre el aire y la superficie ( $T_s - T_a$ ), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) y Absorbida (RFAA) por los tejidos verdes y evapotranspiración (ET). Se realizó una prueba de Kruskal Wallis para cada una de las variables. En todos los análisis del capítulo se consideró a cada fecha independiente de la otra, es decir que no tuvieron una estructura analizable mediante medidas repetidas en el tiempo, no fueron todas del mismo mes ni tuvieron un intervalo constante entre ellas.

Para comparar el funcionamiento dentro y fuera del parque entre espartales, secanos y pastizales, sólo se consideraron las variables: fRFA, RFAA, ET y el cociente RFAA/ET, ésta última como un estimador de la eficiencia en el uso del agua. Por cada variable, se realizó en cada fecha, una prueba de Friedman que consideró el tipo de cobertura (espartal, pastizal y seco) y su ubicación relativa (dentro y fuera del parque). A su vez, para analizar la tendencia en el tiempo de cada una de las cuatro variables respuesta, se realizaron seis regresiones lineales, una por cada tipo de cobertura según su ubicación ( $n=7$ ).

### 4.3. Resultados

#### Diferencias entre espartales, pastizales y secanos con distinto grado de protección

Los valores promedio de los atributos funcionales de la vegetación estudiados difirieron entre tipos de cobertura. El espartal tuvo valores de fRFA y RFAA mayores a los del pastizal y el secano ( $p < 0.05$ ) (Tabla 4.2). El pastizal, a su vez, presentó valores significativamente más bajos de estas dos variables que el secano (Tabla 4.2). El espartal y el pastizal evapotranspiraron a una tasa similar y significativamente mayor a la de los secanos (Tabla 4.2). Este tipo de cobertura mostró los valores más altos de albedo y los pastizales los menores. La diferencia en la temperatura superficial y del aire fue significativamente distinta entre las coberturas (Tabla 4.2), presentando el pastizal las mayores diferencias y el espartal las menores.

**Tabla 4.2.** Características radiométricas, térmicas y evaporativas de espartales, secanos y pastizales ubicados dentro del PNCGN y en un área lindante al mismo. Se presentan los valores medios diarios y errores estándares (E.E.) de las variables: albedo, diferencia térmica ( $T_s - T_a$ ), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA) y Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) y tasa actual de evapotranspiración (ET) estimados a partir de imágenes Landsat 5 TM. Se consideraron las 7 fechas analizadas para calcular cada valor medio. Se indica el número total de sitios de cada ecotopo. Letras distintas indican por variable, diferencias significativas entre coberturas ( $p < 0.05$ ).

| Ecotopo         | N° de sitios | fRFA (%)    |       | RFAA ( $Mj\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) |      | Albedo        |       | Tsup-Taire    |      | ET ( $mm\ día^{-1}$ ) |      |
|-----------------|--------------|-------------|-------|---------------------------------|------|---------------|-------|---------------|------|-----------------------|------|
|                 |              | Media       | E.E   | Media                           | E.E  | Media         | E.E   | Media         | E.E  | Media                 | E.E  |
| <b>Espartal</b> | 245          | 15 <b>c</b> | 0.002 | 1.90 <b>c</b>                   | 0.03 | 0.15 <b>b</b> | 0.002 | 5.70 <b>a</b> | 0.02 | 2.86 <b>b</b>         | 0.05 |
| <b>Pastizal</b> | 245          | 12 <b>a</b> | 0.003 | 1.51 <b>a</b>                   | 0.04 | 0.12 <b>a</b> | 0.001 | 7.91 <b>b</b> | 0.02 | 2.78 <b>b</b>         | 0.07 |
| <b>Secano</b>   | 315          | 13 <b>b</b> | 0.003 | 1.71 <b>b</b>                   | 0.03 | 0.17 <b>c</b> | 0.002 | 6.09 <b>a</b> | 0.01 | 2.60 <b>a</b>         | 0.05 |

### *Diferencias dentro y fuera del parque*

El efecto de la protección se verificó en algunas variables y de manera diferencial en los tipos de cobertura estudiados. La ET y la RFAA resultaron ser más altas dentro del PNCGN que fuera en 6 de las 7 fechas estudiadas en los espartales, la cobertura más típicamente natural del área. Estas diferencias fueron significativas en 4 de las 6 fechas para ET y en 2 fechas para RFAA. Los tipos de cobertura más modificadas (pastizales y secanos) mostraron menores diferencias entre dentro y fuera que los espartales. El cociente RFAA/ET resultó ser más alto fuera del PNCGN que dentro en una fecha para el espartal y 2 fechas para el secano. Para fRFA las diferencias fueron menos marcadas que para las otras variables (Tabla 4.3). En el Apéndice II se presentan las medias y diferencias de todas las variables, nivel de protección y tipo de vegetación. Notar que, en las seis coberturas analizadas, en al menos 2 de las 7 fechas, las diferencias fueron significativamente distintas entre años (Apéndice II). En particular, el espartal dentro del parque (EspD) presentó diferencias significativas entre 4 de las 7 fechas analizadas para las variables ET y RFAA (Apéndice II, Tablas 4.4 y 4.7 respectivamente).

**Tabla 4.3.** Diferencias de la tasa actual de evapotranspiración (ET), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA), la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) y el cociente (RFAA/ET) entre espartales, secanos y pastizales ubicados dentro del PNCGN (D) y en un área lindante al mismo (F). Se indica el número de fechas de cada diferencia y cuántas de ellas fueron significativas ( $p < 0.05$ ).

| <b>Variable respuesta</b>                                | <b>Tipo de cobertura</b> | <b>Diferencias</b> | <b>Número de fechas</b> | <b>Número de fechas con diferencia significativas</b> |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>ET</b><br>(mm día <sup>-1</sup> )                     | Espartal                 | D>F                | 6                       | 4                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 1                       | 0                                                     |
|                                                          | Pastizal                 | D>F                | 2                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 5                       | 2                                                     |
|                                                          | Secano                   | D>F                | 5                       | 1                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 2                       | 0                                                     |
| <b>fRFA</b><br>(%)                                       | Espartal                 | D>F                | 5                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 1                       | 0                                                     |
|                                                          | Pastizal                 | D>F                | 2                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 2                       | 0                                                     |
|                                                          | Secano                   | D>F                | 2                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 3                       | 0                                                     |
| <b>RFAA</b><br>(Mj m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )   | Espartal                 | D>F                | 6                       | 2                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 1                       | 0                                                     |
|                                                          | Pastizal                 | D>F                | 5                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 2                       | 0                                                     |
|                                                          | Secano                   | D>F                | 3                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 4                       | 0                                                     |
| <b>RFAA/ET</b><br>(Mj m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) | Espartal                 | D>F                | 4                       | 0                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 3                       | 1                                                     |
|                                                          | Pastizal                 | D>F                | 4                       | 1                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 3                       | 0                                                     |
|                                                          | Secano                   | D>F                | 2                       | 1                                                     |
|                                                          |                          | D<F                | 5                       | 2                                                     |

### *Tendencias en el tiempo*

La RFAA de las distintas coberturas medida en fechas de verano aumentó a lo largo del período estudiado. La pendiente de la regresión entre el valor de RFAA y el tiempo fue significativa en 5 de las 6 situaciones (Tabla 4.4). Este aumento, medido a través de la pendiente del modelo de regresión ajustado, fue significativamente mayor en las coberturas ubicadas dentro del PNCGN que fuera de él (Tabla 4.4). Estas diferencias también se verificaron, aunque con menos intensidad en el caso de la fRFAA. No se observaron para la ET ni para el cociente RFAA/ET diferencias significativas entre la pendiente de la regresión y el tiempo.

**Tabla 4.4.** Valores de bondad de ajuste ( $R^2$ ) y pendientes (b) de las regresiones lineales para espartales (Esp), secanos (Sec) y pastizales (Pas) ubicados dentro del PNCGN (D) y en un área lindante al mismo (F). Se indica con (\*) los valores  $p < 0.01$  y en cursiva se resaltan los valores  $p < 0.05$ .

| Tipo de cobertura | ET (mm día <sup>-1</sup> ) |       | fRFAA (%)      |              | RFAA (Mj m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ) |               | RFAA/ET (Mj m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) |       |
|-------------------|----------------------------|-------|----------------|--------------|----------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|-------|
|                   | R <sup>2</sup>             | b     | R <sup>2</sup> | b            | R <sup>2</sup>                               | b             | R <sup>2</sup>                                 | b     |
| <b>Esp D</b>      | 0.068                      | 0.072 | 0.609          | <i>1.00*</i> | 0.794                                        | <i>0.148*</i> | 0.146                                          | 0.028 |
| <b>Pas D</b>      | 0.117                      | 0.071 | 0.461          | 1.07*        | 0.547                                        | 0.163*        | 0.020                                          | 0.010 |
| <b>Sec D</b>      | 0.002                      | 0.015 | 0.360          | 0.785        | 0.728                                        | <i>0.146*</i> | 0.239                                          | 0.040 |
| <b>Promedio D</b> | -                          | 0.053 | -              | 0.785        | -                                            | 0.152         | -                                              | 0.026 |
| <b>Esp F</b>      | 0.065                      | 0.079 | 0.270          | 0.643        | 0.636                                        | <i>0.115*</i> | 0.046                                          | 0.016 |
| <b>Pas F</b>      | 0.141                      | 0.066 | 0.227          | 0.750        | 0.402                                        | 0.134         | 0.048                                          | 0.016 |
| <b>Sec F</b>      | 0.024                      | 0.047 | 0.258          | 0.571        | 0.648                                        | <i>0.112*</i> | 0.053                                          | 0.021 |
| <b>Promedio F</b> | -                          | 0.064 | -              | 0.655        | -                                            | 0.120         | -                                              | 0.018 |

Los valores máximos de ET y RFAA para los tres tipos de cobertura se observaron en los sitios dentro del PNCGN, siendo la fecha de 2003 la de máximo ET y la de 2005 la de máxima RFAA para las tres coberturas (Apéndice III, Tablas 4.5 y 4.7 respectivamente). En ambas variables, los valores mínimos de ET y RFAA de

espartales, pastizales y secanos se observaron en los sitios fuera del PNCGN en la fecha de 1987 (Apéndice III, Tablas 4.5 y 4.7 respectivamente). Para fRFA y RFAA/ET, los valores máximos y mínimos no coincidieron en la misma fecha ni se observaron diferencialmente dentro o fuera del PNCGN como en las dos variables anteriores (Apéndice III, Tablas 4.6 y 4.8 respectivamente).

#### 4.4. Discusión

La tendencia en el tiempo de la radiación absorbida por la vegetación dentro del parque fue mayor que fuera del mismo aun cuando las diferencias en esa variable entre ecotopos dentro y fuera del parque no fueran significativas. Esto sugiere que están ocurriendo cambios de distinta magnitud en las situaciones con diferente grado de protección y que la detección de esos cambios a partir de la comparación de medias no es evidente en el corto plazo (menos de una década). La normativa que regula los usos del parque se efectivizó en 1994 y la fecha más actual analizada en este trabajo fue 2005. Cabe destacar que, la magnitud de los cambios en el uso del suelo no fueron extremos ya que dentro del PNCGN continúan realizándose actividades agrícolas y ganaderas tradicionales (Escribano, 2002). En una década es posible detectar señales de cambio en el funcionamiento asociadas al nivel de protección. Un ejemplo de ello, sería la diferencia entre las pendientes de RFAA dentro y fuera del parque en los tres tipos de cobertura (Apéndice III, Tabla 4.4). Esto sugeriría que, dentro del parque el aumento de radiación absorbida en el tiempo fue mayor que fuera del mismo. A su vez, en el espartal y el secano, una pendiente más alta del cociente RFAA/ET dentro del parque, sugeriría una tendencia en aumento en el aprovechamiento del agua. Adicionalmente en la mayor parte de los años la ET de la vegetación menos modificada (espartales) fue mayor en las áreas protegidas. Es posible que no se hayan observado diferencias de ET entre sitios fuera y dentro del parque debido a una mayor transpiración de la vegetación dentro del parque y a una mayor evaporación fuera del mismo por un aumento en la cobertura del suelo desnudo. Sin embargo, al pensar que en las condiciones de humedad en que se han seleccionado las imágenes, la superficie del suelo se encuentra extremadamente seca y en esas condiciones la evaporación debería ser despreciable.

Las diferencias entre años de las cuatro variables analizadas fueron mayores que la asociada al tipo de vegetación o al grado de protección (Apéndice III). Esto resalta la importancia de caracterizar la variabilidad interanual al analizar las diferencias de funcionamiento en los tipos de cobertura. La tendencia positiva de la radiación absorbida (RFAA) e interceptada (fRFA), en menor medida, sugeriría un aumento de las diferencias en el funcionamiento entre las coberturas de dentro y fuera del parque. Nótese que en las tres coberturas, los valores de ET entre 1984 y 2005 fueron similares (Apéndice III, Tabla 4.5) mientras que los valores de RFAA entre estas dos fechas se duplicaron (Apéndice III, Tabla 4.7). Los resultados de este capítulo muestran por un lado, la importancia de considerar variables de funcionamiento ecosistémico en la detección de cambios en el uso del suelo y la necesidad de evaluar sus cambios a lo largo del tiempo. Por el otro, reafirman la importancia de conocer el funcionamiento de áreas conservadas para poder considerarlas como sistemas de referencias teniendo el recaudo de considerar el manejo que se haga en las mismas. En el caso del PNCGN, existe una reglamentación del uso marcada en el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN), e incluye una zonificación espacial distinguiendo diferentes niveles de protección en virtud de la cual cambia el tipo o la intensidad del uso, por ejemplo no en todas las zonas está permitido el pastoreo (Cecilio Oyonarte, com. personal). Un análisis más detallado permitiría profundizar el análisis de los distintos tipos de vegetación según el nivel de protección, aspecto si duda interesante pero que excede de los objetivos de este trabajo.



## **Capítulo 5 – Discusión general**

En este capítulo se revisan los aportes más relevantes de esta tesis en el marco general planteado en el capítulo introductorio. Se sintetizan y discuten los principales resultados de la tesis y se proponen posibles implicancias de dos cambios distintos de uso del suelo sobre la dinámica del agua en sistemas semiáridos.

### **5.1. Principales resultados y consideraciones finales**

La forestación de la estepa patagónica aumenta la cantidad de agua que sale del sistema en forma de vapor y disminuye el drenaje profundo. Los resultados encontrados en esta tesis muestran que, en el noroeste de la estepa patagónica las plantaciones de pino estarían utilizando en promedio, un 18% más de agua y absorbiendo un 30% más de radiación (RFAA) que las comunidades de estepa. En cambio, estarían utilizando un 28% menos de agua y absorbiendo un 47% menos de radiación que las praderas húmedas o mallines. Las diferencias en las pérdidas por evapotranspiración son evidentes tanto usando una aproximación basada en sensores remotos como una basada en la simulación de los flujos hídricos. Las simulaciones indican que los pinos no alteraron la dinámica estacional de las pérdidas por evapotranspiración.

Una diferencia notable entre la dinámica del agua simulada para la estepa y la forestación es la magnitud de las pérdidas por drenaje profundo. Estas disminuyen de 182 -116 mm/año a 0 cuando se foresta la estepa en una condición inicial degradada y no degradada respectivamente. La reducción del drenaje profundo en el noroeste de la estepa patagónica podría afectar la disponibilidad de agua por escurrimiento de las

praderas húmedas, los mallines, que cubren el 5% de la superficie de la cuenca y son de alto valor forrajero para la producción ganadera de la región (Paruelo et al., 2004).

El aumento de la evapotranspiración al forestar ya fue observado en otros sistemas (Zhang et al., 2001; Noretto et al., 2005; Baldi et al., 2008). En Patagonia, el mayor consumo de agua por parte de los pinos a nivel de planta (Gyenge et al., 2002; Licata et al., 2008), se traduce en una mayor evapotranspiración a nivel del ecosistema. Sin embargo, según las simulaciones, los pinos no estarían sosteniendo altas tasas consumo de agua en condiciones de déficit hídrico. La respuesta de las forestaciones a una sucesión de años secos y las implicancias asociadas a esta respuesta, toma especial importancia cuando se considera el contexto productivo en el que se enmarca el avance forestal en el noroeste de la estepa patagónica.

Cada uno de los tres ecotopos analizados que estructuralmente no muestran diferencias dentro y fuera del parque, fueron distintos en algunos aspectos de su funcionamiento según el nivel de protección según mis análisis para el sureste de España. En menos de una década, se detectaron señales de cambios positivos en la RFAA de los sitios bajo protección. A su vez, una mayor ET en los espartales, que es la vegetación más abundante y menos modificada dentro del parque, sugiere la necesidad de estudios de un plazo mayor a los 10 años, para observar cambios consistentemente significativos asociados al nivel de protección.

La medida de la eficiencia en el uso del agua ( $fRFAA/ET$ ) usada mostró valores similares para Pinos en Patagonia y Eucaliptos en Entre Ríos (Noretto et al., 2006) que aumentó con la edad en forestaciones de Pinos y disminuyó con la edad en forestaciones de Eucaliptos (Noretto et al., 2006). A su vez, la eficiencia en el uso del agua ( $RFAA/ET$ ) de las plantaciones de Pinos fue un 13% más alta que la de las comunidades de estepa reemplazadas y un 22% más baja que la de praderas húmedas.

Las diferencias de este cociente permiten evaluar cambios en el uso del suelo que junto con estimaciones de biomasa acumulada permitirían evaluar el costo-beneficio entre consumo de agua y fijación de carbono. Por otra parte, en sitios bajo distinto nivel de protección, una mayor eficiencia en el uso del agua (RFAA/ET) de la vegetación menos modificada (los espartales) dentro del PNCGN, sugeriría cambios en el uso del suelo en distinto sentido. Este cociente puede utilizarse como indicador del efecto de la protección sobre distintos tipos de vegetación.

## **5.2. Perspectivas futuras**

A partir de los objetivos explorados en esta tesis surgen nuevas líneas para futuras investigaciones. En el noroeste de la estepa patagónica se podrían considerar estimaciones de la dinámica del agua complementarias a las usadas en esta tesis como por ejemplo, el registro de cloruros en el perfil del suelo en forestaciones, estepas y mallines (Nosetto et al., 2007; Nosetto et al., 2008) así como estimaciones de transpiración de distintos rodales de Pinos de distintas edades. A su vez, debería ampliarse el análisis de la eficiencia de uso del agua de las distintas edades de los Pinos. Esto aportaría a la planificación del uso del territorio que maximice los beneficios minimizando el impacto sobre el balance hídrico de la cuenca. La simulación de escenarios con distintas especies arbóreas implantadas (por ej. especies nativas o especies deciduas) permitiría estimar diferencias en el impacto sobre el balance hídrico de la cuenca.

## **Bibliografía**

Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J.M. and Cabello, J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography* 200-212.

Alcaraz-Segura, D., Cabello J., Paruelo J.M. and Delibes, M.P. 2009. Use of Descriptors of Ecosystem Functioning for Monitoring a National Park Network: A Remote Sensing Approach. *Environmental Management* 38-48.

Aranda, V. and Oyonarte, C. 2005. Effect of vegetation with different evolution degree on soil organic matter in a semi-arid environment (Cabo de Gata-Níjar Natural Park, SE Spain). *Journal of Arid Environments* 62:631-647.

Baldi, G., Nosoetto, M.D. and Jobbágy, E.G. 2008. El efecto de las plantaciones forestales sobre el funcionamiento de los ecosistemas sudamericanos. *Ambiência* 4:23-34.

Baldi, G., Nosoetto, M.D., Aragón, R., Aversa, F., Paruelo, J.M. and Jobbágy, E.G. 2008. Long-term Satellite NDVI Data Sets: Evaluating Their Ability to Detect Ecosystem Functional Changes in South America. *Sensors* 8:5397-5425.

Bastianseen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin, Turkey. *Journal of Hidrology* 229:87-100.

Benitez, P. and Obersteiner, M. 2006. Site identification for carbon sequestration in Latin America: A grid-based economic approach. *Forest Policy and Economics* 8:636-651.

Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology: The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* (105)1-2:157-172.

Broquen, P., Candan, F., Falbo, G., Girardin, J.L. and Apcarian, A. 2002. Efecto del *Pinus ponderosa* Dougl. sobre la reacción del suelo en el Sudoeste del Neuquén , Argentina . *Bosque* (23) 1:47-59.

Brutsaert, W. 1986. Catchment-scale evaporation and atmospheric boundary layer. *Water Resources Research* 22:39-46.

Calder, I.R. 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology* 18:625-631.

Carlson, T.N., Capehart, W.J. and Gilles, R.R. 1995. A New Look at the Simplified Method for Remote Sensing of Daily Evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment* 54:161-167.

Caselles, V., Artigao, M.M., Hurtado, E., Coll C. and Brasa, A. 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: Application to the Barrax Area, Albacete, Spain. *Remote Sensing of Environment*. 63:1-10.

Castillo, F.E. and Sentis, F.C. 1996. *Agrometeorología*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ed. Mundi-Prensa.

Chahine, M.T., 1992. The hydrologic cycle and its influence on climate. *Nature* 359:373-380.

Chapin, F.S III., Matson, P.A. and Mooney H.A. 2002. *Principoles of terrestrial ecosystem ecology*. New York, Springer-Verlag.

Choudhury, B.J. 2000. A sensitivity analysis of the radiation use efficiency for gross photosynthesis and net carbon accumulation by wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* 101:217-234.

Conghe, S. and Curtis, E.W., 2003. Monitoring Forest Succession With Multitemporal Landsat Images: Factors of Uncertainty. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(11):2557-2567.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J.M., Raskin, R., Sutton, P. and van den Belt, M. 1997. The value of world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.

Davis, S.L. and Dukes, M.D. 2010. Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. *Agricultural Water Management* 98:19-28.

De Jong R., 1984. Soil water models: A review. *Land Resource Research Institute Contribution* 123:1-39.

De Jong R. and Shaykewich, C.F. 1981. A soil water budget model with a nearly impermeable layer. *Canadian Journal of Soil Science* 61:361-371.

Escribano, P. 2002. Definition of zonation units in Cabo de Gata-Níjar Natural Park. Thesis Report GIRS-2002.045. Wageningen University, 95pp.

Escribano, P. Palacios Orueta, A. y Oyonarte, C. 2008. Cuantificación y distribución espacial de los tipos de cubierta en los ecosistemas semiáridos con imágenes hiperespectrales, caso práctico en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Almería). *Ecosistemas* 17:79-88.

Escribano, P. 2009. Integración de técnicas espectrales para la detección y cuantificación de los tipos de cubiertas en ecosistemas áridos. Bases para un programa de seguimiento del P.N. Cabo de Gata-Níjar, Almería. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, 214pp.

Farley, K.A., Jobbágy, E.G. and Jackson, R.B. 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11:1565-1576.

Farley, K.A., Piñeiro, G., Palmer, S.M., Jobbágy, E.G. and Jackson, R.B. 2008. Stream acidification and base cation losses with grassland afforestation. *Water Resources* 44:1-11.

Fearnside, P. 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 80:21-34.

FAO, 1985. *Agroclimatological data for Latin America and the Caribbean*. Trade Yearbook, Rome.

FAO, 2004. *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina Documento de Trabajo. Informe Nacional, Argentina*.

FAO, 2005. *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales. Hacia una ordenación forestal sostenible*

Feddes, R.A., Kabat, P., Bakel, P.J.T., Bronswijk, J.J.B. and Halbertsma, J., 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - state of the art. *Journal of Hydrology* 100:69-111.

Fernández, M.E., Gyenge, J., Licata, J., Schlitcher, T. y Bond, B. 2008. Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system. *Agroforestry Systems* 74:185-197.

Fernández, M.E. and Gyenge, J. 2009. Testing Binkley's hypothesis about the interaction of individual tree water use efficiency and growth efficiency with dominance patterns in open and close canopy stands. *Forest Ecology and Management* 257:1859-1865.

Fernández, N. and Piñeiro, G. 2008. La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales. *Ecosistemas* 17:64-78.

Fernández, N., Paruelo, J.M. and Delibes, M. 2010. Ecosystem functioning of protected and altered Mediterranean environments: A remote sensing classification in Doñana, Spain. *Remote Sensing of Environment* 114:211-220.

Foley, J., Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E. a, Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J. a, Prentice, I.C., Ramankutty, N. and Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science*. New York, 309:570-574.

Garbulsky, M.F. and Paruelo, J.M. 2004. Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics. *Journal of Vegetation Science* 15:711-720.

Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Papale, D., Ardö, J., Goulden, M.L., Kiely, G., Richardson, A.D., Rotenberg, E., Veenendaal, E.M. and Filella, I. 2010. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* 19:253-267.

Geary, T.F. 2001. Afforestation in Uruguay-Study of a changing landscape. *Journal of Forestry* 99:35-39.

Golluscio, R., Deregibus, V. and Paruelo, J.M. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral* 8:265-284.



Golluscio, R., Paruelo, J.M. and Deregibus, V. 1999. Pastoreo con descansos en la Patagonia: desarrollo de un paquete tecnológico. *Revista Argentina de Producción animal* (19)1:89-102.

Gomez, C.A. 2008. Principales especies de insectos forestales en plantaciones de Pino de la Patagonia, cuadernillo N°3 de la Serie técnica: Manejo Integrado de Plagas Forestales.

Gonda, 2001. Manejo de Pino ponderosa. Modelo preliminar para plantaciones en sitios de calidad media en la Patagonia andina. CIEPAF, Ficha técnica *Revista Patagonia Forestal* Año VII 3:1-7.

Granger, R.J. 2000. Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. *Journal of Hydrology* 229:70-76.

Grime, J.P. and others. 1997. Integrated screening validates primary axes of specialisation. *Oikos* 79:259-281.

Grulke, N. and Retzlaff, W. 2001. Changes in physiological attributes of ponderosa pine from seedling to mature tree. *Tree Physiology* 21:275-286.

Guo, R.B. and Gifford, R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use: a meta-analysis. *Global Change Biology* 8:345-360.

Gyenge, J.E., Fernández, M.E., Salda, G.D. and Schlichter, T.M. 2002. Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. *Agroforestry Systems* 55:47-55.

Gyenge, J.E.G., Fernández, M.E.F., Dalla Salda, G.D.A.S. and Schlichter, T.S. 2005. Leaf and whole-plant water relations of the Patagonian conifer *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Bizzarri: implications on its drought resistance capacity. *Water*, 62:297-302.

Gyenge, J.E., Fernández, M.E., Sarasola, M. and Schlichter, T.M. 2008a. Testing a hypothesis of the relationship between productivity and water use efficiency in Patagonian forests with native and exotic species. *Forest Ecology and Management* 255:3281-3287.

Gyenge, J.E., Fernández, M.E. and Schlichter, T.M. 2009. Effect of pruning on branch production and water relations in widely spaced ponderosa pines. *Agroforestry Systems* 77:223-235.

Gyenge, J.E., Fernández, M.E. and Schlichter, T.M. 2009. Patrones de uso del agua y productividad de las forestaciones con especies exóticas en comparación con vegetación nativa en el N.O. de la Patagonia argentina: implicancias para la sustentabilidad de esta actividad productiva. *Actas del XIII Congreso Forestal Mundial*, 18-23 de Octubre, Buenos Aires, Argentina.

Haltia, O. and Keipi, K. 1997. *Financing Forest Investments in Latin America : The Issue of Incentives*. Washington D.C., ENV-113.

Ibanez, J., De-Alba, S., Lobo, A. and Zucarello, B. 1998. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with discussion). *Geoderma* 83:171-192.

InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

INTA-SAGYP. 1990. *Atlas de suelos de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.

Isidoro, D. and Grattan, S.R. 2010. Predicting soil salinity in response to different irrigation practices, soil types and rainfall scenarios. *Irrigation Science* 223-227.

Jackson, R.D. 1985. Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proceedings of the IEEE* 73:1086-1096.

Jackson, R.B., Sala, O.E., Paruelo, J.M. and Mooney, H. a. 1998. Ecosystem water fluxes for two grasslands in elevated CO<sub>2</sub>: A modeling analysis. *Oecologia* 113:537-546.

Jackson, R.B., Schenk, H.J., Jobbágy, E.G., Canadell, J., Colello, G.D., Dickinson, R.E., Field, C.B., Friedlingstein, P., Heimann, M., Hibbard, K., Kicklighter, D.W., Kleidon, a, Neilson, R.P., Parton, W.J., Sala, O.E. and Sykes, M.T. 2000. Belowground Consequences of Vegetation Change and Their Treatment in Models. *Ecological Applications* 10:470-483.

Jackson, R.B., Banner, J.L., Jobbágy, E.G., Pockman, W.T. and Wall, D.H. 2001. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature* 418:623-626.

Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K. a, Maitre, D.C. le, McCarl, B. and Murray, B.C. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310:1944-1947.

Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. and León, R.J.C. 1995. Estimación de régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. *Ecología Austral* 5:47-53.

Jobbágy, E.G., Sala, O.E. and Paruelo, J.M. 2002. Patterns and Controls of Primary Production in the Patagonian Steppe: A Remote Sensing Approach. *Ecology* 83:307-319.

Jobbágy, E.G. and Jackson, R.B. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10:1299-1312.

Jobbágy, E.G., Paruelo J.M., Piñeiro G., Piñeiro, D., Carámbula, M., Morena, M., Sarli, V. and Altesor, A. 2005. Efectos del Clima y el Uso del Suelo en el

Funcionamiento de los Ecosistemas: Desafíos y Perspectivas del Sur. Informe Anual 2003-2004. IAI 47-61.

Jobbágy, E.G., Vasallo, M., Farley K., Piñeiro, G., Garbulsky, M., Nosetto, M. D., Jackson, R. and Paruelo, J.M. 2006. Forestación en pastizales: hacia una vision integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia* 10(2):109-124.

Jobbágy, E.G., Nosetto, M. D., Paruelo, J.M. and Piñeiro, G. 2006. Las forestaciones rioplatenses y el agua. *Ciencia Hoy* 16(95):12-21.

Kerr, J.T. and Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *TRENDS in Ecology and Evolution* 18(6):299-305.

Laclau, P., Pozo, L., Huerta, L., Andenmatten, E and Letourneau, F. 2002. Rentabilidad de la forestación con pino ponderosa (*Pinus ponderosa* (Dougl.) Laws) en el noroeste de la Patagonia, Argentina. *Bosque* 23(1):21-35.

Laclau, P. 2003. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *Forest Ecology and Management*, 173, 353-360.

Laclau, P. 2005. Cambio Climático y Forestación. *Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario* Idia XXI 8:250-253.

León, R.J.C., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J.M., and Soriano, A. 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral* 8:125-144.

Liang, S. 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. *Remote Sensing of Environment* 76:213-238.

Licata, J., Gyenge, J.E., Fernández, M.E., Schlichter, T.M. and Bond, B.J. 2008. Increased water use by ponderosa pine plantations in northwestern Patagonia, Argentina compared with native forest vegetation. *Forest Ecology and Management* 255:753-764.

Medail, F. and Quezel, P. 1999. Biodiversity Hotspots in the Mediterranean Basin: Setting Global Conservation Priorities. *Conservation Biology* 13:1510-1513.

Mendoza-Fernandez, A., Martínez-Hernández, F., Garrido-Becerra, J.A., Pérez-García, F.J., Medina-Cazorla, J.M., Peñas de Giles, J. and Mota, J.F. 2009. Is the endangered flora protected? Gaps in the Network of Protected Natural Areas of Andalusia (RENPA): the case of the province of Almeria. *Acta Botánica Gallica* (156)4:637-648.

Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and Human Well-being. A framework for Assessment*, Island Press.

Milly, P.C.D. 1986. Event-based simulation model of moisture and energy fluxes at a bare soil surface. *Water Resources Research* (22)12:1680-1692.

Monserud, R. and Marshall, J. 1999. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Canadian Journal of Forest Research* 29:521-535.

Monteith, J.L. 1988. Does transpiration limit the growth of vegetation or vice versa? *Journal of Hydrology* 100:57-68.

Morton, D.C., DeFries, R.S., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Arai, E., Del Bon Espirito-Santo, F., Freitas, R. and Morissette, J. 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *PNAS* (103)39:14637-14641.

Murty, D., Kirchbaum M., McMurtie R., and McGilvray, H. 2002. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology* 8:105-123.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G. and Paruelo, J.M. 2004. Reservorios de carbono en plantaciones de pino ponderosa en la estancia El Maitén. Informe técnico 26 pp.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G. and Paruelo, J.M. 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11:1101-117.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G. and Paruelo, J.M. 2006. Carbon sequestration in semiarid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments* 67:142-156.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Tóth, T. and Jackson, R.B. 2008. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. *Global Biogeochemical Cycles* 22:1-12.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B. and Jackson, R.B. 2011. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* in press, doi:10.1016/j.agee.2011.1001.1008.

Oyarzabal, M., Oyonarte, C. and Giorno, A. 2008. Propuesta de un sistema de seguimiento y alerta para la gestión de espacios protegidos: el caso del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar (Almería, España). *Ecosistemas* 17:98-107.

Oyonarte, C., Aranda, V. and Durante, P. 2008. Soil surface properties in Mediterranean mountain ecosystems: Effects of environmental factors and implications of management. *Forest Ecology and Management* 254:156-165.

Paruelo, J.M. 1984. Principales Controles de las Pérdidas de agua en la Estepa Patagónica. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires, 137pp.

Paruelo, J.M., Bertiller, M.B., Schlichter, T.M. and Coronato, F.R. 1993. Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. Convenio Argentino-Alemán cooperación técnica INTA\_GTZ, Lucha contra la Desertificación en la Patagonia a través de un sistema de monitoreo ecológico 111pp.

Paruelo, J.M. and Sala, O.E. 1995. Water Losses in the Patagonian Steppe: A Modelling Approach. *Ecology* 76(2):510-520.

Paruelo, J.M., Beltrán, A., Jobbágy, E. G., Sala, O.E. and Golluscio, R. A., 1998. The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral* 8:85-101.

Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., Sala, O.E., Lauenroth, W.K. and Burke, I.C. 1998. Functional and Structural Convergence of Temperate Grassland and Shrubland Ecosystems. *Ecological Applications* (8)1:194-206.

Paruelo, J.M., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. and Sala, O.E. 1999. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient. *Ecosystems* 2:64-68.

Paruelo, J.M., Sala, O.E. and Beltrán, A. 2000. Long-term dynamics of water and carbon in semi-arid ecosystems: a gradient analysis in the Patagonian steppe. *Plant Ecology* 150:133-143.

Paruelo, J.M., Burke, I.C. and Lauenroth, W.K. 2001. Land-use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA. *Global Change Biology* 7:631-639.

Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G. and Sala, O.E. 2001. Current Distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate South America. *Ecosystems* 4:683-698.

Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., Guerschman, J.P., Cesa, A., Jouve, V. and Garbulsky, M.F. 2004. Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography* 13:385-395.

Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz, D., Cabello, J. and Escribano, P. 2005. Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas in southeastern Spain. *Applied Vegetation Science* 8:93-102.

Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Piñeiro, G., Jobbágy, E.G., Verón, S.R., Baldi, G. and Baeza, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 10(2):47-61.

Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G. and Khanna, P.K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168 (1-3): 241-257.

Peñas de Giles, J., Benito de Pando, B. and Martínez-Ortega, M.M. 2006. Efectos de la pérdida y la fragmentación de hábitat sobre la conservación del endemismo *Linaria nigricans* (SE España). V Simposio Internacional sobre la Flora Silvestre en Zonas Áridas. Centro de las Artes de la Universidad de Sonora 889-911.

Piñeiro, G., Alcaraz D., Paruelo, J., Oyonarte, C., Guerschman, J., Escribano, P., and Cabello, J. 2002. A Functional Classification of Natural and Human-Modified Areas of 'Cabo de Gata', Spain, Based on Landsat TM Data. 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Buenos Aires, Argentina. 452-455.

Piñeiro, G., Oesterheld, M. and Paruelo, J.M. 2006. Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems* 9:357-373.

Qin, Z. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing* 22(18):3719-3746.

Raz-Yaseef, N., Rotenberg, E. and Yakir, D. 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:454-462.

Ritchie, J.T. 1973. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8:1204-1213.



Roldán, M., Carminati, A., Biganzoli, F. and Paruelo, J.M. 2010. Las reservas privadas ¿son efectivas para conservar las propiedades de los ecosistemas? *Ecología Austral* (20)2:185-199.

Ruimy, A., Saugier, B. and Dedieu, G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 99(D3):5263-5283.

SAGPyA, 1999. Argentina, oportunidades de inversión en bosques cultivados. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina.

SAGPyA, 2002. Primer inventario nacional de plantaciones forestales en macizo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina.

SAGPyA, 2004. Proyecto forestal de desarrollo. Inventario de plantaciones forestales y establecimiento de un banco de datos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina.

Sala, O.E. and Paruelo, J.M. 1997. Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems. *Island Press* part.III-13:237-252.

Sala, O.E., Jackson, R.B., Mooney, H.A. and Howarth, R.W. 2000. *Methods in ecosystem science*. Ed. Springer.

Sanchez, J.M. and Caselles, V. 2004. Determining actual evapotranspiration in a boreal forest. *Recent Research Developments in Geophysics* 6:59-80.

SIG Agropecuario. Sistema de Información Agropecuario del Ministerio de Economía y Producción de la República Argentina. [www.sigagropecuario.gov.ar](http://www.sigagropecuario.gov.ar).

Shukla, C., 1982. Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate. *Science* 215:1498-1501.

Shukla, C., Nobre, P. and Sellers, P., 2008. Amazon Deforestation and Climate Change. *Science* 247:1322-1325.

Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90:434-440.

Soriano, A. 1991. Río de la Plata Grasslands. Chapter 19:367-407 in *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Shuttleworth, W. J., 1993. *Potencial Evaporation Report* 6 pp.

Silveira, L., Alonso, J. and Martínez, L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia* (10)2:75-93

Skole, D. and Tucker, C. 1993. Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science* 260:1905-1910.

Stenseth, N., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *TRENDS in Ecology and Evolution* 20 (9): 503-510.

Steffan-Dewenter, I., Kessler, M., Barkmann, J., Bos, M., Buchori, D., Erasmi, S., Faust, H., Gerold, G., Glenk, K., Gradstein, R., Guhardja, E., Harteveld, M., Hertel, D., Ho, P., Kappas, M., Ko, S., Leuschner, C., Maertens, M., Marggraf, R., Migge-Kleian, S., Mogeia, J., Pitopang, R., Schaefer, M., Schwarzem, S., Sporn, S., Steingrebe, A., Tjitrosoedirdjo, S., Tjitrosoemito, S., Twele, A., Weber, R., Woltmann, L., Zeller, M. and Tschardtke, T. 2007. Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification. *PNAS* (104)12:4973–4978.

Sud, Y.C., Walter, G.K., Kim, J.H., Liston, G.E., Sellers, P.J. and Lau, W.K.M. 1996. Biogeophysical Consequences of a Tropical Deforestation Scenario: A GCM Simulation Study. *Journal of Climate* 9:3225-3247.

Tilman, D. 1998. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. Princeton: Princeton University Press.

Timmermans, W.J., Krustas, W.P., Anderson, M.C. and French, A.N. 2007. An intercomparison of the Surface energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modelling schemes. *Remote Sensing of Environment* 1-16.

Trevín, J. 2005. Política forestal: el gradualismo como exceso. *Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario Idia XXI* 8:273-274.

Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E. and Steininger, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 18(6):306-314.

Valle, F. 2003. Mapa de Series de Vegetación de Andalucía. Junta de Andalucía. Ed. Rueda. Madrid.

Verón, S.R., Paruelo, J.M. and Oesterheld, M. 2006. Assessing desertification. *Journal of Arid Environments*, 66:751-763.

Verón, S.R., Paruelo, J.M. and Oesterheld, M. 2010. Grazing-induced losses of biodiversity affect the transpiration of an arid ecosystem. *Oecologia* 1780-1784.

Vitousek, P.M. 1994. Beyond Global Warming: Ecology and Global Change. *Ecology* 75(7):1861-1876.

Vitousek, P.K., Mooney, H.A., Lubchenco, J. and Melillo, J.M. 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.

Weigandt, M., Gyenge, J.E., Fernández, M.E., Varela, S. and Schlichter, T.M. 2011 Is forage productivity of meadows influenced by the afforestation of upstream hillsides? A study in NW Patagonia. *Forest Systems* 20:165-175.

Wright, J.A., Di Nicola, A., and Gaitan, E. 2000. Latin American forest plantations – Opportunities for carbon sequestration, economic development and financial returns. *Journal of Forestry* 98:20-23.

Xu, M., De Biase, T., Qi, Goldstein, A. and Liu, Z. 2001. Ecosystem respiration in a young ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains, California. *Tree Physiology* 21:309-318.

Zhang, H., Sellers, H. and McGuffie, K. 1996. Impacts of Tropical Deforestation. Part I: Process Analysis of Local Climate Change. *Journal of Climate* 9:1947- 1517.

Zhang, L., Dawes, W.R. and Walker, G.R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37:701-708.

# Apéndice I

## I.i. Cálculo de Radiación

Se estimó a partir de la radiación neta de onda corta incidente  $S_n$  ( $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y la radiación neta de onda larga emitida  $L_n$  ( $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) según lo propuesto por Granger, (2000).

$$(a) R_n = S_n + L_n$$

donde  $S_n$  se estimó a partir de radiación de onda corta global  $S_t$  ( $\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) propuesta por Shuttleworth, (1993) y el albedo  $\alpha$  según Liang, (2000).

$$(b) S_n = S_t (1 - \alpha)$$

$$(c) L_n = -4.25 - 0.24 S_t$$

Para estimar la radiación de onda corta ( $S_n$ ) se consideró la estimación propuesta por Shuttleworth, (1993) donde la radiación total incidente de onda corta ( $S_t$ ) se calculó según.

$$(d) S_t = (a + b m M^{-1}) S_o$$

donde el cálculo considera la heliofanía efectiva ( $m$ ) y la longitud total del día ( $M$ ) en horas,  $a$  y  $b$  son constantes que asumen en valores fijos de 0.25 y 0.5 respectivamente para climas templados. La radiación solar extraterrestre  $S_o$  ( $\text{mm día}^{-1}$ ) se calculó como:

$$(e) S_o = 15.392 d_r (\omega \text{seno}\Phi \text{seno}\delta + \text{cos}\Phi \text{seno}\omega)$$

donde  $d_r$  es la distancia relativa entre la tierra y el sol,  $\omega$  es el ángulo horario solar,  $\delta$  es la declinación solar y  $\Phi$  es la latitud del área de estudio.

La estimación de albedo resulta de aplicar el algoritmo propuesto por Liang, (2000), donde cada uno de los coeficientes representa en que proporción contribuyen cada una de las bandas del sensor Landsat a la estimación de este índice.

$$(f) \alpha = 0.356 \lambda_{B1} + 0.130 \lambda_{B3} + 0.373 \lambda_{B4} + 0.085 \lambda_{B5} + 0.072 \lambda_{B7} - 0.0018$$

### **L.ii. Cálculo de temperatura superficial**

La temperatura superficial se estima a partir de la banda 6 del sensor Landsat ETM+ donde L es el valor de radiancia de un cuerpo negro para la temperatura integrada para la banda 6 del sensor ETM+ y  $K_2 = 1282.71$  °K (Irish, 2000) y  $K_1 = 666.09 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  son constantes. A su vez, la temperatura superficial  $T_b$  (°K) se corrige mediante el algoritmo “mono-window” propuesto por Qin et al., (2001) resultando  $T_s$  (°K).

$$(a) T_b = K_2 / (\ln(K_1 (L + 1)^{-1}))$$

$$(b) T_s = \{h(1-C-D) + [k(1-C-D) + C + D * T_b - (D * T_{at})]\} / C$$

donde  $T_{at}$  (°K) es la temperatura atmosférica efectiva media calculada según el método propuesto por Qin *et al.*, (2001),  $T_b$  (°K) es la temperatura superficial de satélite calculada previamente en (iii), h y k son constantes  $h = -67.35535$  y  $k = 0.45861$  necesarias para linealizar la ecuación de radiación de Plank. Los coeficientes C y D están definidos como:

$$(c) C = \varepsilon \times t$$

$$(d) D = (1-t) [1 + (1-\varepsilon) t]$$

donde,  $\varepsilon$  representa la emisividad que puede ser estimada a partir del Índice de Vegetación Normalizado (IVN) según la metodología propuesta por Van de Griend y Owe, (1993) y t es la transmitancia atmosférica ( $\text{g cm}^{-2}$ ) estimada a partir del contenido de humedad según Qin et al., (2001).

## **Bibliografía**

Granger, R.J., 2000. Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. *Journal of Hydrology* 229: 70-76.

Irish, R.R., 2000. Landsat 7 science data user's handbook. Report 430-15-01-003-0. National Aeronautics and Space Administration.

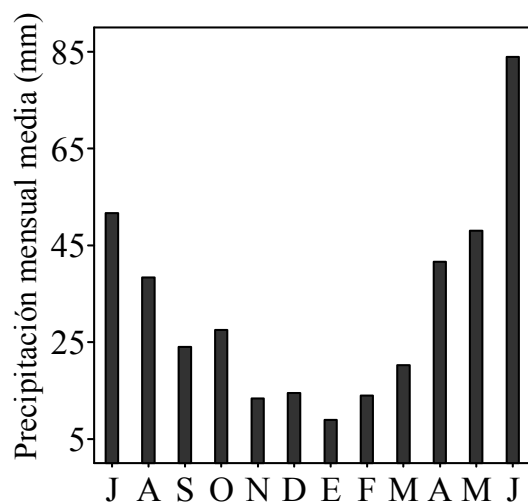
Liang, S., 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. *Remote Sensing of Environment* 76: 213-238.

Qin, Z., 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing* 22 (18): 3719-3746.

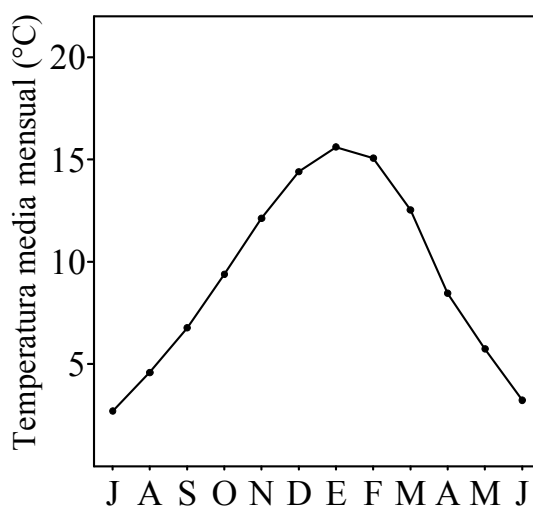
Shuttleworth, W.J., 1993. Potencial Evaporation Report. 6 pp.

Van de Griend, A.A. and Owe, M., 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14 (6): 1119-1131.

## Apéndice II



**Figura 3.9.** Distribución del valor promedio mensual de las precipitaciones entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: 42°04' S, longitud: 71°09' O).



**Figura 3.10.** Variación de la temperatura media mensual entre los años 1984 y 2004 de la estación meteorológica de la estancia El Maitén (latitud: -42°04' S, longitud: 71°09' O).



## Apéndice III

### Diferencias entre espartales, pastizales y secanos según su grado de protección

En esta sección, se presentan las tablas detalladas a partir de las cuales se construyó la síntesis de las diferencias encontradas entre espartales, secanos y pastizales ubicados dentro del PNCGN (D) y en un área lindante al mismo (F) del Capítulo 4: “Diferencias de funcionamiento de distintas unidades de vegetación del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar”. Las variables analizadas fueron: la tasa actual de evapotranspiración (ET) (Tabla 4.5), la fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación (fRFA) (Tabla 4.6), la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) (Tabla 4.7) y el cociente (RFAA/ET) (Tabla 4.8).

**Tabla 4.5.** Pérdidas de agua por evapotranspiración (ET) en espartal, pastizal y seco de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ).

| ET<br>(mm día <sup>-1</sup> ) | EspD    | EspF     | PasD    | PasF     | SecD     | SecF     |
|-------------------------------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|
| Año                           | Media   | Media    | Media   | Media    | Media    | Media    |
| <b>1984</b>                   | 3.39 f  | 3.31 cd  | 2.88 ab | 2.84 a   | 3.47 cde | 3.28 c   |
| <b>1987</b>                   | 2.04 cd | 1.84 a   | 2.16 cd | 2.44 d   | 1.79 abc | 1.73 ab  |
| <b>1991</b>                   | 3.09 cd | 3.17 cd  | 2.93 ab | 3.14 c   | 3.03 cde | 2.93 a   |
| <b>1994</b>                   | 2.41 d  | 2.27 abc | 2.48 d  | 2.59 d   | 2.2 ab   | 2.11 a   |
| <b>1999</b>                   | 2.39 c  | 2.29 abc | 2.26 ab | 2.31 abc | 2.01 a   | 2.11 abc |
| <b>2003</b>                   | 3.63 e  | 3.61 de  | 3.45 ab | 3.18 a   | 3.38 ab  | 3.39 bcd |
| <b>2005</b>                   | 3.24 f  | 3.16 de  | 2.91 ab | 3.24 d   | 2.89 ab  | 2.88 a   |
| <b>Promedio</b>               | 2.88    | 2.80     | 2.72    | 2.82     | 2.68     | 2.63     |

**Tabla 4.6.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada (fRFA) en espartal, pastizal y secano de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ).

| <b>fRFA (%)</b> | <b>EspD</b> | <b>EspF</b> | <b>PasD</b> | <b>PasF</b> | <b>SecD</b> | <b>SecF</b> |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Año</b>      | Media       | Media       | Media       | Media       | Media       | Media       |
| <b>1984</b>     | 12 e        | 12 de       | 8 ab        | 8 a         | 10 bc       | 11 cd       |
| <b>1987</b>     | 11 e        | 10 e        | 8 ab        | 8 a         | 10 abc      | 10 abcd     |
| <b>1991</b>     | 16 c        | 17 c        | 12 a        | 12 ab       | 16 c        | 16 c        |
| <b>1994</b>     | 17 c        | 16 bc       | 15 bc       | 16 bc       | 14 a        | 15 ab       |
| <b>1999</b>     | 15 e        | 14 cde      | 11 a        | 12 abc      | 11 ab       | 13 bcd      |
| <b>2003</b>     | 15 d        | 13 cd       | 10 ab       | 8 a         | 13 c        | 12 cd       |
| <b>2005</b>     | 19 d        | 17 abcd     | 17 abcd     | 15 a        | 17 ab       | 16 abc      |
| <b>Promedio</b> | 15          | 14.14       | 11.57       | 11.28       | 14.14       | 13.28       |

**Tabla 4.7.** Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) en espartal, pastizal y secano de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ).

| <b>RFAA (Mj m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)</b> | <b>EspD</b> | <b>EspF</b> | <b>PasD</b> | <b>PasF</b> | <b>SecD</b> | <b>SecF</b> |
|--------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Año</b>                                       | Media       | Media       | Media       | Media       | Media       | Media       |
| <b>1984</b>                                      | 1.61 e      | 1.55 de     | 1.12 ab     | 0.98 a      | 1.31 bc     | 1.40 cd     |
| <b>1987</b>                                      | 1.52 f      | 1.38 de     | 1.053 a     | 1.051 ab    | 1.32 bc     | 1.33 cd     |
| <b>1991</b>                                      | 1.84 c      | 1.88 c      | 1.41 a      | 1.40 ab     | 1.80 c      | 1.78 c      |
| <b>1994</b>                                      | 2.01 c      | 1.95 bc     | 1.92 bc     | 1.95 c      | 1.7 a       | 1.85 ab     |
| <b>1999</b>                                      | 2.15 f      | 1.96 bcde   | 1.58 a      | 1.72 ab     | 1.65 abc    | 1.90 bcd    |
| <b>2003</b>                                      | 1.96 d      | 1.76 cd     | 1.33 ab     | 1.09 a      | 1.79 cd     | 1.64 c      |
| <b>2005</b>                                      | 2.60 c      | 2.35 abc    | 2.40 abc    | 2.10 a      | 2.41 abc    | 2.20 ab     |
| <b>Promedio</b>                                  | 1.96        | 1.83        | 1.54        | 1.47        | 1.71        | 1.73        |

**Tabla 4.8.** Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación por milímetros de agua evapotranspirada (RFAA/ET) en espartal, pastizal y secano de las 7 fechas analizadas en sitios ubicados dentro (D) y fuera (F) del PNCGN. Letras distintas indican por fecha, diferencias significativas entre tipos de vegetación y según su ubicación ( $p < 0.05$ ).

| <b>RFAA/ET<br/>(Mj m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>)</b> | <b>EspD</b>      | <b>EspF</b>    | <b>PasD</b>     | <b>PasF</b>    | <b>SecD</b>     | <b>SecF</b>     |
|--------------------------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Año</b>                                             | Media            | Media          | Media           | Media          | Media           | Media           |
| <b>1984</b>                                            | 0.49 <b>c</b>    | 0.55 <b>bc</b> | 0.65 <b>ab</b>  | 0.53 <b>bc</b> | 0.43 <b>a</b>   | 0.53 <b>bc</b>  |
| <b>1987</b>                                            | 0.76 <b>bcd</b>  | 0.82 <b>a</b>  | 0.61 <b>abc</b> | 0.56 <b>a</b>  | 0.77 <b>ab</b>  | 0.85 <b>bcd</b> |
| <b>1991</b>                                            | 0.60 <b>c</b>    | 0.59 <b>bc</b> | 0.53 <b>a</b>   | 0.52 <b>ab</b> | 0.61 <b>abc</b> | 0.62 <b>bc</b>  |
| <b>1994</b>                                            | 0.84 <b>a</b>    | 0.89 <b>a</b>  | 0.79 <b>a</b>   | 0.82 <b>a</b>  | 0.80 <b>a</b>   | 0.89 <b>a</b>   |
| <b>1999</b>                                            | 0.92 <b>bc</b>   | 0.90 <b>bc</b> | 0.71 <b>ab</b>  | 0.81 <b>bc</b> | 0.91 <b>a</b>   | 1.02 <b>c</b>   |
| <b>2003</b>                                            | 0.54 <b>d</b>    | 0.53 <b>d</b>  | 0.39 <b>a</b>   | 0.40 <b>ab</b> | 0.54 <b>abc</b> | 0.50 <b>d</b>   |
| <b>2005</b>                                            | 0.82 <b>abcd</b> | 0.79 <b>c</b>  | 0.83 <b>d</b>   | 0.69 <b>a</b>  | 0.86 <b>ab</b>  | 0.83 <b>abc</b> |
| <b>Promedio</b>                                        | 0.70             | 0.72           | 0.64            | 0.62           | 0.70            | 0.75            |