



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**“APLICACIÓN DEL MODELO DHSVM SOBRE MICROCUENCAS
FORESTADAS EN LA ZONA DE CORRAL, REGIÓN DE LOS RÍOS”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ALFREDO SAAVEDRA MELÉNDEZ

PROFESOR GUÍA

JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ANTONIO LARA AGUILAR

XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Felipe Alfredo Saavedra Meléndez
FECHA: 08/20/2014
PROFESOR GUÍA: James McPhee Torres

APLICACION DEL MODELO DHSVM SOBRE MICROCUENCAS FORESTADAS EN LA ZONA DE CORRAL, REGIÓN DE LOS RÍOS

El trabajo que se presenta consiste en un estudio comparativo de la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación, de dos microcuencas forestadas con diferentes coberturas vegetacionales en la Zona Centro Sur de Chile. Para dicho propósito se emplea el modelo hidrológico “Distributed Hydrology Soil Vegetation Model” (DHSVM) con una resolución espacial de 27 metros de ancho y una escala temporal diaria.

Las cuencas se sitúan en la comuna de Corral, provincia de Valdivia cercano a la localidad de Chaihuín, a unos 350 m.s.n.m. La zona presenta un clima templado lluvioso con humedad alta producto de la cercanía con el océano pacífico. Las cuencas analizadas poseen coberturas vegetacionales de bosque nativo, del tipo forestal siempreverde, y plantación de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en diferentes proporciones (RC13 bosque nativo y RC12 cobertura mixta). En el suelo se distinguen diferencias asociadas al tipo de cobertura vegetal que posee la zona en las capas superficiales.

Se prepara el modelo DHSVM utilizando información meteorológica y fluviométrica de alta resolución de estaciones cercanas a la zona de estudio provistas por la Universidad Austral de Chile. Además se dispone de información topográfica del satélite ASTER GDEM y parámetros del suelo y cobertura vegetal. Los parámetros se obtienen de mediciones en terreno y de fuentes bibliográficas.

Se ejecuta el modelo satisfactoriamente y se ajustan parámetros con incertidumbre logrando una buena representación para la cuenca RC13. Luego se adoptan los mismos parámetros calibrados, ahora en la cuenca RC12, obteniendo un exceso de agua en el sistema de un 31%. Finalmente se calibra la cuenca RC12 reduciendo el exceso de agua a un 10%.

De la calibración se obtiene que el exceso de agua se explica por una mayor evapotranspiración de la plantación de eucalipto. La evapotranspiración total en los tres años de simulación alcanza un 33% y un 20% de las precipitaciones para las cuencas RC12 (61% de eucalipto) y RC13 respectivamente, estas diferencias se ven acentuadas en verano.

Se obtiene que la intercepción es superior en el bosque nativo dada su alta densidad de hojas en comparación del bosque de eucalipto; así también la disponibilidad de agua aumenta en el bosque nativo dado un consumo de agua menor que la plantación exótica.

Se concluye que la presencia de eucalipto afecta en gran proporción en los balances hídricos de las cuencas, aumentando la evapotranspiración y disminuyendo la disponibilidad de agua en el suelo. Ambos efectos se ven acentuados en verano. Se advierte también que la influencia del suelo es menor en el balance anual.

AGRADECIMIENTOS

La labor de este trabajo ha significado un importante esfuerzo y sólo fue posible gracias a todas las personas que me apoyaron durante este largo proceso. Agradezco en primer lugar a Evelyn por apoyarme, soportarme y apurarme siempre, a mis amigos del tercer piso y compañeros de terraza, que dado lo largo de mi estadía compartí con más de una generación. Agradezco la infinita disposición en particular del Seba y de la Pauli, a mis profesores de la comisión, a Christian Little, Rodrigo Bravo y David Lobos de la UACH que me apoyaron en mis viajes por la zona. Agradezco a quienes hicieron mejor mi pasada por la Universidad de Chile, a la Jaqui, Mónica, Vivi, etc. Agradezco a mis padres por aguantarme todas mis locuras entre medio y a mi familia que estará contenta con mi titulación.

Probablemente se me olvide más de alguna persona, pero en estos momentos reflexiono y concluyo que los momentos de nuestra existencia tienen todos aprendizajes para brindarnos, el paso por la Universidad es uno de estos momentos, la vida continuará llenándonos y solo queda agradecer y sentirse afortunado por lo que nos ha tocado vivir.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Los Bosques	3
2.2	El bosque en Chile	3
2.3	Bosque nativo y bosque exótico	4
2.4	El modelo DHSVM y sus aplicaciones.....	5
2.5	Índices de ajuste.....	6
3	ÁREA DE ESTUDIO.....	8
3.1	Ubicación	8
3.2	Clima.....	8
3.3	Geomorfología.....	9
3.4	Vegetación.....	9
3.5	Suelo	10
4	METODOLOGÍA	11
4.1	Mapa de elevación digital (DEM), dirección de flujo y red hidrométrica	11
4.2	Coberturas vegetacionales.....	12
4.3	Caracterización del suelo	13
4.4	Periodo de Modelación	15
4.5	Registros Meteorológicos.....	16
4.5.1	Pluviometría	16
4.5.2	Temperatura.....	18
4.5.3	Humedad relativa.....	19
4.5.4	Velocidad del viento	19
4.5.5	Radiación incidente de onda corta.....	19
4.6	Registros fluviométricos	21
4.7	Condiciones Iniciales	22
4.8	Aplicación del modelo en las cuencas	23
5	RESULTADOS.....	24
5.1	Resultados cuenca RC13 (Bosque Nativo)	24
5.2	Resultados cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13	25
5.3	Resultados cuenca RC12 calibrada.....	27
5.4	Análisis de los procesos	29

5.5	Sensibilidad del índice de área foliar	30
6	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	31
7	BIBLIOGRAFÍA	33
	ANEXOS.....	38
A1.	Ecuaciones del modelo	38
	Evapotranspiración.....	38
	Radiación de onda corta	40
	Esguerrimiento no saturado y saturado subterráneo	40
A2.	Mapas de profundidad de suelo	42
	Mapas de profundidad de suelo	42
	Dirección de flujo	43

Índice de tablas

Tabla 3.1: Parámetros geomorfológicos y cobertura vegetal de las cuencas.	9
Tabla 4.1: Cobertura vegetal de las cuencas.	12
Tabla 4.2: Parámetros asociados al tipo de vegetación de las cuencas.....	13
Tabla 4.3: Parámetros geomorfológicos y cobertura vegetal de las cuencas.	14
Tabla 4.4: Profundidades de suelo	15
Tabla 4.5: Características de los pluviógrafos.....	17
Tabla 4.6: Características de los vertederos y sus registros para el periodo 2009-2010.....	22
Tabla 4.7: Condiciones iniciales para el modelo.	23
Tabla 5.1: Parámetros calibrados de la cuenca RC13.....	24
Tabla 5.2: Índices de ajuste para la cuenca RC13	24
Tabla 5.3: Índices de ajuste cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13	26
Tabla 5.4: Parámetros calibrados de la cuenca RC12 para plantación de eucalipto.....	27
Tabla 5.5: Índices de ajuste cuenca RC12 calibrada.....	28
Tabla 5.6: Balance anual de escorrentía, evapotranspiración y almacenamiento en el suelo.	29

Índice de figuras

Figura 2.1: Esquema de la grilla, modelo DHSVM.....	6
Figura 3.1: Ubicación de la RCV y cuencas experimentales	8
Figura 3.3 Plantación de Eucalipto (A) y Bosque Nativo (B) de la Reserva Costera Valdiviana	10
Figura 3.4 Comparación calicatas Bosque Nativo (A) y Eucaliptus (B).	10
Figura 4.1 Modelo de elevación digital de la zona de estudio a partir de imágenes ASTER GDEM, ubicación de los vertederos y red hidrográfica.....	12
Figura 4.2: Medición en terreno del índice de área foliar.	13
Figura 4.3: Bastón pedológico y muestra de suelo	15
Figura 4.4: Mapa de coberturas vegetales y ubicación de las estaciones	16
Figura 4.5: Regresiones lineales entre mediciones de precipitación diaria de los distintos pluviógrafos.....	17
Figura 4.6: Serie de precipitaciones diarias estación Las Garzas para el periodo de estudio y temperatura de la estación Isla Teja.	19
Figura 4.7: Humedad relativa vs Radiación Incidente de onda corta, estación Isla Teja	20
Figura 4.8: Velocidad del viento (a), humedad relativa (b) y radiación incidente (c) de estación Isla Teja. Gradiente de precipitaciones con la altitud (d).....	20
Figura 4.9: Fotografía vertedero cuenca aledaña a la zona de estudio.	21
Figura 4.10: Escorrentías diarias observadas de las cuencas de estudio.....	22
Figura 5.1: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Qsim) y observadas (Qobs) de la cuenca RC13 calibrada. (B) Qsim vs. Qobs (C) Error (Qobs-Qsim) vs Qobs.....	25
Figura 5.2: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Qsim) y observadas (Qobs) de la cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13. (B) Qsim vs Qobs. (C) Error (Qobs-Qsim) vs Qobs.	26
Figura 5.3: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Qsim) y observadas (Qobs) de la cuenca RC12 calibrada. (B) Qsim vs Qobs. (C) Error (Qobs-Qsim) vs Qobs.....	28
Figura 5.4: Almacenamiento en las hojas, evapotranspiración mensual acumulada y almacenamiento de agua en el suelo para el periodo de simulación (2008 año de calentamiento del modelo).....	30

1 INTRODUCCIÓN

En Chile una gran parte del bosque nativo ha sido eliminado o explotado como consecuencia del aumento de la presión demográfica y de técnicas agropecuarias y de maderío inadecuadas, en consecuencia existen extensas superficies con un uso inadecuado o con vegetación degradada. Desde principios de siglo se están estableciendo progresivamente plantaciones forestales exóticas en remplazo del bosque nativo (Shlatter, 1977, Lara *et al.*, 2009, Echeverría *et al.*, 2006). Los bosques nativos son en su mayoría de propiedad privada y han sido utilizados principalmente para producción maderera, generalmente con intervenciones no sostenibles (Lara *et al.*, 2009). La degradación de estos bosques han tenido como consecuencia importantes pérdidas de servicios ecosistémicos, tales como la disponibilidad y calidad del agua, el turismo, la pesca recreacional y la conservación de la biodiversidad (Lara *et al.*, 2003).

La reducción de los bosques y el cambio de uso del suelo juegan un papel clave en el control del calentamiento global, debido a que reducen las emisiones de carbono desde la atmósfera y a la vez son un reservorio de éste a largo plazo previniendo el cambio climático (Sheeran 2006). Para el ciclo hidrológico en particular son de significativa importancia los procesos de deforestación y reforestación (Calder, 1992, Lara *et al.*, 2009).

Experiencias en USA y Europa reportan que la deforestación genera una reducción de la evapotranspiración, produce un aumento de los caudales superficiales y de los caudales peaks a nivel local, sin embargo a niveles superiores las diferencias son relativamente bajas. Se asocia el aumento de los caudales a la falta de árboles, a las alteraciones del suelo y a la compactación producto de diferentes métodos de tala. Los efectos de la tala disminuyen con el rebrote de las plantaciones en el tiempo (Robinson *et al.*, 2003).

En Chile diferentes estudios concluyen que el reemplazo del bosque nativo por plantaciones exóticas influye de manera negativa sobre el rendimiento hídrico de las cuencas. Las plantaciones generan mayores tasas de evapotranspiración y captan agua de profundidades superiores, por lo tanto generan caudales menores, esta diferencia cobra mayor importancia en los meses de verano (Oyarzún *et al.*, 1999, Oyarzún *et al.* 2005, Lara *et al.*, 2003, Lara *et al.* 2009, Little *et al.*, 2009, Berrones *et al.*, 2013).

Es indispensable contar con estudios que aporten con herramientas para establecer relaciones, y entender la dinámica, entre la cobertura de bosque nativo y generación de escorrentía (Álvarez, 2010) puesto que la cuantificación del servicio ecosistémico de provisión de agua relacionado a las diferentes coberturas boscosas requiere de mayor investigación (Lara *et al.* 2009).

El estudio realizado busca entender bajo el sustento de un modelo físico los procesos que mayormente influyen en el cambio de la hidrología producto del cambio en la cobertura vegetal en los bosques de la región de los Ríos. Con esto se podrá evaluar de mejor manera los impactos en el ciclo hidrológico de deforestar el bosque nativo, dando mayores antecedentes para futuros estudios del tema.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

Entender las diferencias en las respuestas hidrológicas ante diferentes coberturas vegetales mediante una herramienta de modelación en cuencas forestadas pequeñas en la Reserva Costera Valdiviana, comuna de Corral, Región de Los Ríos, Chile.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la aplicabilidad del modelo hidrológico “DHSVM” para reproducir la respuesta hídrica de cuencas forestadas en la región de Los Ríos.
- Identificar las componentes del ciclo hidrológico que mejor explican las diferencias en la respuesta hidrológica de cuencas con distinta cobertura vegetal, a partir de los resultados del modelo de simulación.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Los Bosques

El bosque es consecuencia de una cadena de cambios climáticos, geológicos, desarrollo de suelos y muchos otros factores que dan forma al paisaje, determinando la diversidad y cantidad de especies. Los árboles son las especies más importantes de la población forestal y conviven en su entorno arbustos, vides, hierbas, helechos, musgos y hongos. Además complementan el ecosistema diversas especies animales, guardando un delicado equilibrio (Farb, 1974).

El funcionamiento interno de los árboles es de alta complejidad; estos respiran por las hojas que también fabrican el alimento, los estomas funcionan como válvulas que regulan la pérdida de agua por la hoja y la admisión y exhalación de gases (Farb, 1974). La apertura de los estomas está condicionada a diferentes forzantes, ya sea; la cantidad y calidad de la luz, la cantidad de CO² disuelto en el aire, el estado hídrico de las hojas, metabolitos mesófilos, metabolitos de las raíces o la humedad del aire (Graham et al., 1982). Las raíces acopian agua y minerales del suelo, y además anclan el árbol. El tronco expone las hojas a la acción del sol llevando agua desde las raíces y a la vez recibe de ellas su alimento. Las semillas se dan en flores y conos (Farb, 1974).

Existe una relación entre la estructura del suelo y el crecimiento de las raíces, la interacción de éstas últimas influye en la estructura, que se ve reflejada con cambios en la agregación (Torres *et al*, 2013)

2.2 El bosque en Chile

Los bosques nativos de Chile entre la VII y XVI región destacan por su alto grado de endemismo (flora y fauna exclusiva) y está dentro de los ecosistemas más amenazados del mundo (Lara et al., 2003, Armesto et al., 1996).

En 1990 el instituto forestal (INFOR) estimó en 7,5 millones de hectáreas al bosque nativa bajo la condición que fuera potencialmente productivo. Por otro lado la CONAF y otras instituciones en 1997 estima en 13,4 millones de ha al bosque nativo de más de 2 metros de altura y una fracción dosel igual o mayor al 25%. Esta última estimación indica que un 82,3% del bosque nativo se concentra entre las regiones XIV y XII. Un 35,9% se concentra en la XI Región convirtiéndose en la región con más superficie de bosque nativo seguida de la XIV región de los ríos con 2,74 millones de ha (Lara *et al* 2009, CONAF 1999, INFOR 1992).

Las principales causas de deterioro del bosque nativo son la sustitución y la habilitación agropecuaria. En el periodo 1994-2008 monitoreado por CONAF se calcula una pérdida neta de 96.205 ha concentrados mayormente en las regiones Bio-Bio, La Araucanía y Los Ríos. Los numerosos incendios forestales son otra causa de deterioro, entre las coberturas afectadas en la temporada 2007-2008 el bosque nativo cubre el 14% del área incendiada (Lara *et al* 2009, CONAF 1999).

Desde 1975 hasta el 2000 se estimó una reducción del bosque nativo del 67% en 578.164 ha estudiadas en la cordillera de la costa de las regiones del Maule y Bio-Bio, lo que equivale a un 4,5% de reducción anual. Se asocia esta disminución a la incorporación de plantaciones exóticas (Echeverría *et al*, 2006).

2.3 Bosque nativo y bosque exótico

Los bosques tienen un rol importante en la acumulación y entrega gradual de agua. Las cuencas cubiertas con bosque nativo producen en verano escurrimientos de 3 a 6 veces mayor que cuencas con cubiertas de praderas o plantaciones como pino o eucaliptos (Lara et al., 2003). El rápido crecimiento de las plantaciones exóticas disminuye paulatinamente las reservas de agua del suelo, sobre todo en periodos estivales (Oyarzún *et al.*, 1999).

Huber et al. (1986) registró las transpiraciones de varias especies de bosque nativo siempreverde concluyendo que al aumentar el área foliar de una especie aumenta también la transpiración. Esta es máxima en verano cuando hay mayor radiación solar y temperatura, y menor humedad relativa. Las variables meteorológicas explicarían más de un 86% del proceso transpirativo. Así también a mayor densidad de estomas mayor transpiración. Especies de menores áreas foliares como el Ulmo pueden generar tasas de transpiración por unidad de área superiores a otras especies con mayor área foliar. En zonas de precipitaciones superiores a 1200 mm anuales la intercepción es mayor en especies latifoliadas en comparación a coníferas, generando un aporte de evaporación extra ante eventos de precipitación (Huber et al., 2001).

Berrones et al., 2013 comparó dos microcuencas cubiertas con bosque nativo siempreverde y deciduo. El bosque deciduo mostró un mayor consumo de agua y por lo tanto una mayor evapotranspiración. Al aumentar el área foliar en primavera el bosque deciduo aumentó también sus tasas de transpiración generando menor escorrentía. Las especies siempreverde consumieron agua de los primeros centímetros de suelo (10-20cm) mientras que el bosque deciduo consumió bajo los 40cm de suelo.

Huber et al., 2010 comparó cuencas forestadas con *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. Las plantaciones de *P. radiata* interceptaron 16 y 17% de las precipitaciones (2149 mm) y las de *E. globulus* un 10 y 11%. Las evapotranspiraciones fueron equivalentes al 76 y 70% para las cuencas con *P. radiata* y 65 y 64% las cuencas con *E. globulus*. Iroumé et al 2002 registró entre 1998 y 2000 se interceptó un 14 y 22% de la precipitación para coberturas de bosque nativo deciduo y plantaciones de Pino Oregon respectivamente.

Un estudio realizado en el sudeste de Etiopía bajo periodo de estrés hídrico mostró para la especie *Eucalyptus globulus* una tasa de transpiración de 55 kg en temporada seca y 8 kg para las especies nativas (Fetene et al., 2004). Esta misma especie registró una absorción subsuperficial del suelo superior a las especies nativas y una evapotranspiración cinco veces mayor en épocas secas. El crecimiento del *E. globulus* fue independiente de la humedad superficial, tomando agua de estratos más profundos al poseer importante biomasa de raíces (Fritzsche *et al.*, 2006).

Oyarzún et al. (1999) registró que tasas de evapotranspiración aumentaron desde un 30% hasta 58% en tres años desde la plantación de especies exóticas, lo que supone una disminución del rendimiento hídrico de las cuencas en el largo plazo.

La influencia de la cobertura vegetal se extiende también a la caracterización del suelo, generando diferencias entre las porosidades, la cantidad de materia orgánica y los parámetros químicos de los sustratos. Se estudió el suelo bajo diferentes usos tomando como base el bosque nativo en Loncoche. Se registró un mayor asentamiento cuando el bosque nativo se reemplaza con pradera

y pino, esto debido a una disminución de los poros gruesos propios de los suelos bajo bosque nativo (Ellies *et al.*, 1993). “En los alrededores de la ciudad de Valdivia se encontraron diferencias en las poblaciones de microorganismos del suelo bajo *Pinus radiata*, al compararlos con bosque nativo valdiviano. Este último presentó una mayor cantidad de microorganismos en comparación con el pino, en el cual se favoreció la proliferación fungosa en detrimento de la bacteriana. Bajo la cobertura de pino las condiciones de pH de 3.6 a 3.9 fueron significativamente más ácidas que bajo el bosque natural con pH entre 4.2 a 4.4, explicando con esto en parte el cambio en la población de microorganismos” (Schlatter, 1977).

Lara *et al.* (2009) estimó un incremento medio del 14,1% del caudal total de verano ante un aumento de un 10% del bosque nativo, esto en base al de rendimientos hídricos menores ante cubiertas de plantaciones exóticas de *Pinus Radiata* y *Eucalyptus spp.*

Little *et al.* (2009) realizó un estudio en dos cuencas (Purapel en Nirivilo, PNN y Cauquenes en el Arrayán, CQA), donde habría una disminución de la cubierta forestal nativa de 52,3% a 14,2% para el PPN y el 36,1% al 8,1% en CQA, entre 1975 y 2000. Inversamente en el mismo período, el porcentaje de superficie cubierta por plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata*, aumentó de 12% a 55% en el PPN, y de 4,7% a 42% en CQA. A partir de un análisis de los datos observados se estima una disminución de la escorrentía de 13,1 a 7,5 mm en verano en PPN y de 7,3 a 5 mm en CQA.

En definitiva, según estos estudios, el bosque nativo generaría menor evapotranspiración que las plantaciones forestales aumentando los caudales, especialmente en épocas secas, al tener una mayor porosidad amortiguaría los caudales de crecida y distribuiría los caudales de mejor forma en épocas secas. Lo anterior se denomina efecto esponja (Lara *et al.*, 2003).

2.4 El modelo DHSVM y sus aplicaciones

El modelo hidrológico “DHSVM” (“Distributed hydrology soil vegetation model”) realiza balances de masa y energía dentro de una cuenca incorporando en sus cálculos los procesos hidrológicos de mayor relevancia. Para dicho fin el modelo utiliza ecuaciones físicas validadas, teniendo aplicaciones en múltiples continentes con resultados satisfactorios. Los cálculos incorporan relaciones explícitas entre la hidrología, la vegetación, el suelo y el clima. Los procesos incorporados son; intercepción, evaporación, transpiración, flujo saturado y no saturado, acumulación y derretimiento de nieve. Se aplica típicamente a altas resoluciones espaciales, del orden de 100 metros para cuencas hidrográficas de hasta 10^4 km², a escalas de tiempo subdiarias a diarias para simulaciones multianuales (Wigmosta *et al.*, 1994).

El proceso de modelación consiste en la división de la cuenca en una grilla, y en cada celda se realiza un balance de masa acorde a los procesos incluidos en el modelo. La modelación incluye dos capas de vegetación para el cálculo de la evapotranspiración y el balance radiativo (Ver Figura 2.1); la superior incluye las copas de los árboles (dosel) y la inferior la vegetación de baja altura (sotobosque). También se incluyen dos capas de suelo, cada cual interactúa con los estratos contiguos y con las raíces (Wigmosta *et al.*, 1994)..

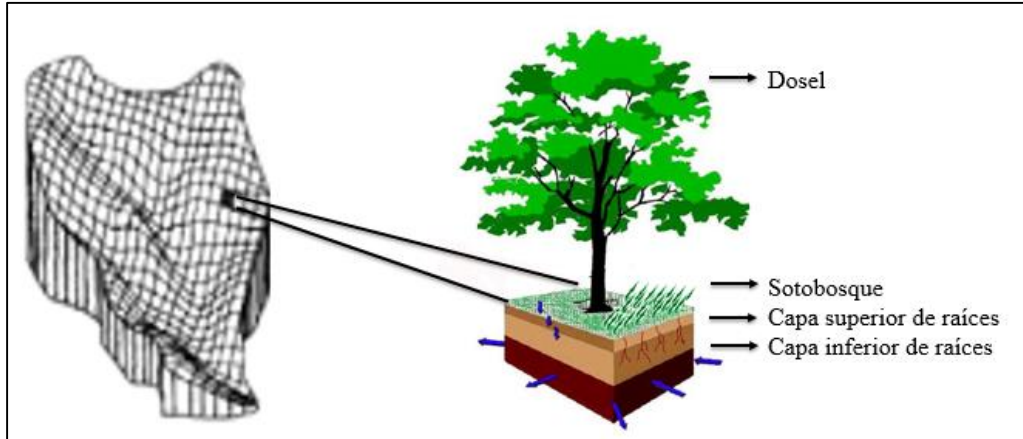


Figura 2.1: Esquema de la grilla, modelo DHSVM (Fuente: Wigmosta et al., 1994 modificado).

Según la información recopilada no existen usos a la fecha del modelo DHSVM en Chile. Este modelo sea empleado mayormente en Estados Unidos bajo diferentes coberturas vegetales del tipo caducifolias, perennifolias, latifoliadas y coníferas. Se ha utilizado con éxito para estudiar; los efectos el cambio de coberturas de suelo, efectos del calentamiento global, resultados de modelación de variables climáticas y modelos de elevación digital, entre otros (Alila *et al.*, 2001, Bowling *et al.*, 2001, Burges *et al.*, 1998, Cuo *et al.*, 2009, La Marche *et al.*, 2000, Leung *et al.*, 1996 y 1999).

Waichler *et al.*, 2005 aplicó el modelo DHSVM a pequeñas cuencas en el Bosque Experimental H.J. Andrews (HJA) forestadas con Pino Oregón bajo manejo forestal. Después de la calibración, la eficiencia global en la simulación de caudal por hora supera el 0.7 (Nash-Sutcliffe) y el error medio anual fue menor de 10%. La precisión del modelo disminuyó al simular caudales extremos, con sobrestimación de flujos bajos y subestimación de flujos altos. Sin embargo, los análisis estadísticos de peaks simulados y observados arrojaron caracterizaciones similares de los efectos del manejo. Las debilidades principales de las simulaciones fueron la acumulación de la capa de nieve, el deshielo en condiciones de lluvia-nieve, y la producción de crecida. Van Shaar *et al.*, 2002 utilizó el modelo para simular los efectos hidrológicos de los cambios en la obertura terrestre de cuatro cuencas forestadas con coníferas, que van desde 27 hasta 1.033 km², dentro de la cuenca del río Columbia. En general, los bajos valores del índice de área foliar (LAI) significaron un mayor aporte hídrico por nieve precipitada, un mayor flujo en los cauces y una menor evapotranspiración. Comparaciones con el modelo VIC (modelo que parametriza en vez de representar de manera explícita los efectos topográficos), muestran que el escurrimiento predicho por DHSVM es más sensible a los cambios de uso del suelo que lo predicho por VIC.

2.5 Índices de ajuste

Para evaluar la calidad del ajuste del modelo se utilizan distintos índices, sin embargo cada uno de ellos presenta características diferentes dependiendo del tipo de error asociado (Krause, 2005).

Coefficiente de determinación – r^2

El coeficiente de determinación r^2 se define como el valor cuadrático del coeficiente de correlación acorde a Bravais-Pearson.

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

Donde los valores O y P corresponden a los valores observados y predichos respectivamente. El problema de este indicador es que no reconoce problemas de subestimación o sobrestimación sistemática. Varía entre 0 y 1, donde 1 representa un ajuste perfecto y 0 representa la inexistencia de una correlación (Krause, 2005).

Índice de Nash-Sutcliffe E

Este índice es propuesto por Nash y Sutcliffe en 1970 y se define de la siguiente forma:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

Donde los valores O corresponden a los valores observados y los P a los valores predichos por el modelo. Su valor varía entre $-\infty$ y 1. Si su valor es menor a cero, quiere decir que el promedio de los valores observados representa una mejor estimación que la modelación hecha. El problema de este índice resulta en que sobrestima el error producido por valores singulares muy grandes mientras que menosprecia el error de valores pequeños mal modelados (Krause, 2005).

Índice BIAS

El error sistemático BIAS (\bar{e}) indica una sobreestimación del modelo al adoptar valores positivos y una subestimación de la predicción cuando es negativo. Se calcula como el error medio, en este caso el error es la diferencia entre los predicho y lo observado.

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (3)$$

Las unidades de éste índice son las mismas de la variable evaluada (Richard *et al.*, 2006).

3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación

Se analizan en este estudio 2 microcuencas contiguas denominadas “RC12” y “RC13”, éstas se ubican en la Reserva Costera Valdiviana (RCV) en la comuna de Corral cerca de la localidad de Chaihuín, Región de los Ríos a 18 kilómetros aproximadamente de la ciudad Corral (Ver Figura 3.1).

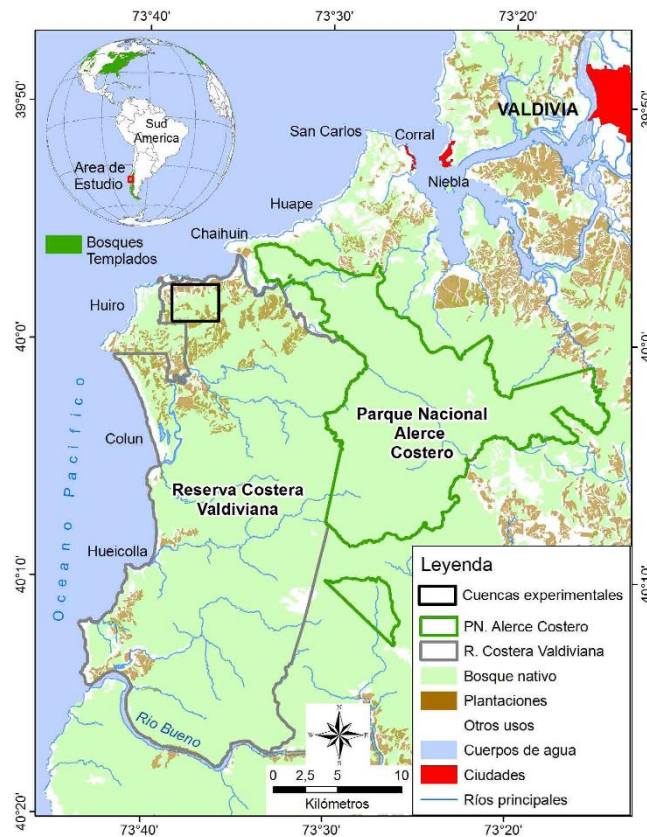


Figura 3.1: Ubicación de la RCV y cuencas experimentales (Fuente: Lara *et al.*, 2013)

La RCV se ubica en las coordenadas 39°58'S y 73°35'O, en la Eco-Región de los bosques valdivianos lluviosos del sur de Chile, posee cerca de 50.000 ha y está a cargo de The Nature Conservancy (Lara *et al.* 2013).

3.2 Clima

El clima es templado lluvioso con influencia costera, con una precipitación media anual entre 1800 y 2.500 milímetros en los sectores de menor altitud, y hasta 4.000 milímetros en los sectores más altos. Disminuyen las precipitaciones entre enero y marzo menos del 10 % (Lara *et al.*, 2013). La precipitación registrada en las estaciones (FORECOS) cercanas a las cuencas de estudio registran un promedio de 1581 milímetros para el periodo 2008-2012. La precipitación sólida es muy escasa (Little, 2011).

La temperatura media registrada en las cercanías de las cuencas de estudio para el 2009 es de 10.5 °C (Cuevas *et al.* 2010). En el parque nacional Alerce costero (Ver Figura 3.1) para el periodo Octubre 2011-Septiembre 2012 la temperatura promedio fue de 7,5 °C.

3.3 Geomorfología

Las 2 cuencas analizadas (RC12 y RC13) tienen superficies menores a 0,5 km² y presentan pendientes promedio de 25% y 17% respectivamente. Se encuentran cerca de la costa a una cota aproximada de 350 m.s.n.m. Los parámetros geomorfológicos fueron calculados en base a imágenes satelitales ASTER GDEM con una resolución de 30 x 30 metros y a partir de Little, 2011 (Ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Parámetros geomorfológicos y cobertura vegetal de las cuencas.

Parámetro\Cuenca	RC12	RC13
Área [km2]	0,20	0,35
Cota Superior [m.s.n.m.]	398	385
Cota Media [m.s.n.m.]	355	354
Cota Inferior [m.s.n.m.]	283	305
Pendiente media [m/m]	0,25	0,17

3.4 Vegetación

Las cuencas analizadas tienen diferentes coberturas vegetales, incluyendo bosque nativo y plantaciones eucaliptus. La cuenca RC13 posee bosque nativo y una fracción despreciable de eucaliptus, mientras que la cuenca RC12 posee un 38% bosque nativo y un 62% de *Eucalyptus globulus* aproximadamente (Little, 2011).

En terreno se caracterizaron las especies dominantes y codominantes. La zona con eucaliptus (*Eucalyptus globulus*) tiene especies que alcanzan los 18 metros de altura, además existe un sotobosque variado que llega hasta 4 metros donde se aprecian especies como el Canelo (*Drimys winteri*), Ampe, Avellano (*Gevuina avellana*), Mañío (*Saxegothaea conspicua*), Arrayán (*Luma apiculata*), Ovata (*Myrceugenia ovata*), Tepa (*Laureliopsis philippiana*) y Meli (*Amomyrtus meli*). Las zonas con bosque nativo poseen un dosel dominante compuesto, de mayor a menor abundancia por Coihue (*Nothofagus dombeyi*), Canelo, Mañío y Tepa. Las especies alcanzan alturas de hasta 22 metros. El dosel codominante se conforma por las especies Meli (*Amomyrtus meli*), Avellano, Mañío y Tepa alcanzando hasta 19 metros. Se posee además un sotobosque de Laurel regenerando (*Laurelia sempervirens*), Mañío, Luma (*Amomyrtus luma*), Meli, Patagua, Chusquea (*Chusquea coleou*), Ampe, Chupon (*Fascicularia bicolor*), Tepu (*Tepualia stipularis*) y Sauco del diablo (*Pseudopanax laetevirens*). Estas especies alcanzan alturas máximas de 3 metros. Aparte de esto se observan copihues, musgos, trepadoras y lianas (Ver Figura 3.2).



Figura 3.2 Plantación de Eucalipto (A) y Bosque Nativo (B) de la Reserva Costera Valdiviana (Fuente (B): Lara *et al.*, 2009)

3.5 Suelo

La cordillera de la costa está compuesta por rocas metamórficas de la era paleozoica cubiertas parcialmente por sedimentos marinos del periodo terciario. En la zona oeste de la RCV hay formaciones intrusivas de la era cretácica. Los suelos son en su mayoría Ultisoles de bajo pH (4,2-4,8), bajo contenido de nutrientes y altos niveles de aluminio (Little, 2011). Los suelos metamórficos se caracterizan por ser ácidos, con drenaje moderado a pobre y con alto contenido orgánico. Es posible encontrar suelos graníticos de buen drenaje, más fértiles que los metamórficos, de texturas son de franco-limosa a franco-arenosa y de profundidades arraigables superiores a los 50 cm (Lara *et al.*, 2013).

En terreno se compararon calicatas en zonas de diferentes coberturas (Ver Figura 3.3). En el área de Eucaliptus se encontró una capa superficial de materia orgánica de espesor aproximado de 2 cm y color negro, mientras que en el bosque nativo se encontró una primera capa de 10 a 15 cm. rica en materia orgánica como hojarasca, raíces y material en descomposición. Se observó en esta última la presencia de gusanos, lo que comprueba la alta actividad orgánica en el suelo. Se encontró raíces gruesas en la primera capa y delgadas en las primeras 2 capas.

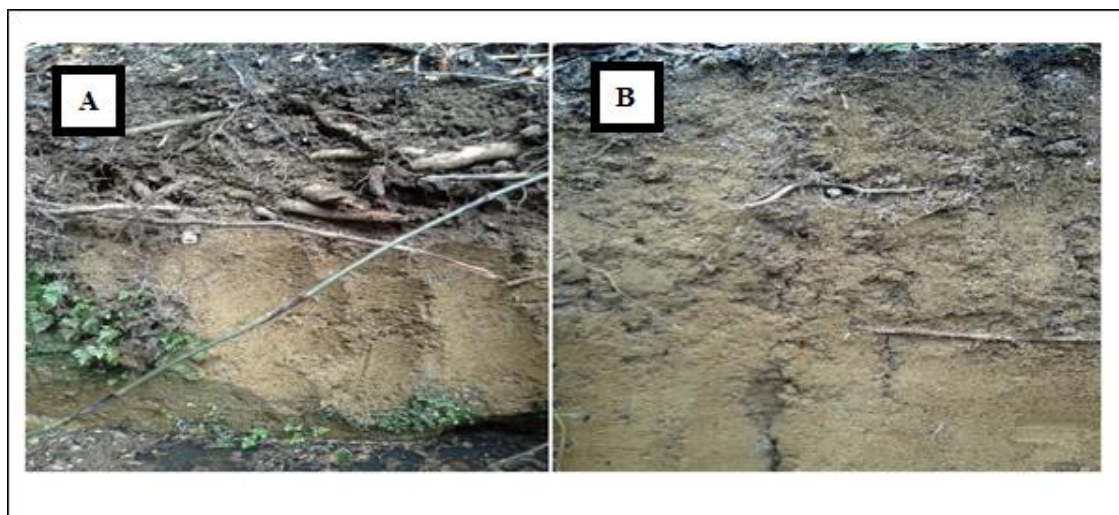


Figura 3.3 Comparación calicatas Bosque Nativo (A) y Eucaliptus (B).

4 METODOLOGÍA

Se implementa el modelo hidrológico “DHSVM” para la simulación de cuencas forestadas que son monitoreadas en detalle por la Universidad Austral. Los datos de entrada del modelo son facilitados por la Universidad Austral u obtenidos de la bibliografía. Dadas las características meteorológicas de la zona no se considera precipitación sólida, por lo que se eliminan los procesos relacionados con el derretimiento y almacenamiento de nieve.

Con los datos de entrada se procede a la construcción del modelo para las cuencas de estudio en la Reserva Costera Valdiviana en la comuna de Corral. Ya terminado el modelo se sigue con la calibración y validación del modelo para las cuencas en cuestión.

Para ejecutar el modelo DHSVM es necesario generar los siguientes archivos de entrada:

- Mapa de elevación digital (DEM) de la zona
- Mapa de coberturas vegetacionales y características de cada cobertura
- Mapa de tipos de suelo y caracterización de éstos
- Mapa de profundidades del suelo
- Mapa de dirección de Flujo
- Archivo con los registros meteorológicos

4.1 Mapa de elevación digital (DEM), dirección de flujo y red hidrométrica

El modelo de elevación digital se obtiene de imágenes ASTER GDEM¹ con una resolución aproximada de 30 metros por 30 metros por cada celda. Utilizando los softwares QGIS y la herramienta Watershed del módulo de GRASS, se obtiene la delimitación de las cuencas (Ver Figura 4.1). Esta delimitación difiere un poco de lo mostrado en Little (2011) dado lo gruesa de la resolución del DEM utilizado. La elevación promedio calculada de la cuenca RC12 es de 355 m.s.n.m y de la cuenca RC13 es de 354 m.s.n.m. Se observa que las elevaciones son similares dada la cercanía de ambas cuencas, por lo que a priori se puede considerar que poseen meteorologías similares.

Es necesario para la ejecución del modelo, generar archivos de dirección de flujo y la red hidrográfica, éstos se genera utilizando la herramienta “Watershed” del módulo GRASS del programa QGIS 2.2. Como resultado se obtiene la dirección de flujo y los cauces correspondientes (Ver Figura 4.1). En base a estos cursos de agua que pueden ser desde ramales a cauces superiores el modelo calcula a que red se le entrega el caudal respectivamente dependiendo de la ubicación de la celda y su respectivo drenaje.

¹ <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>

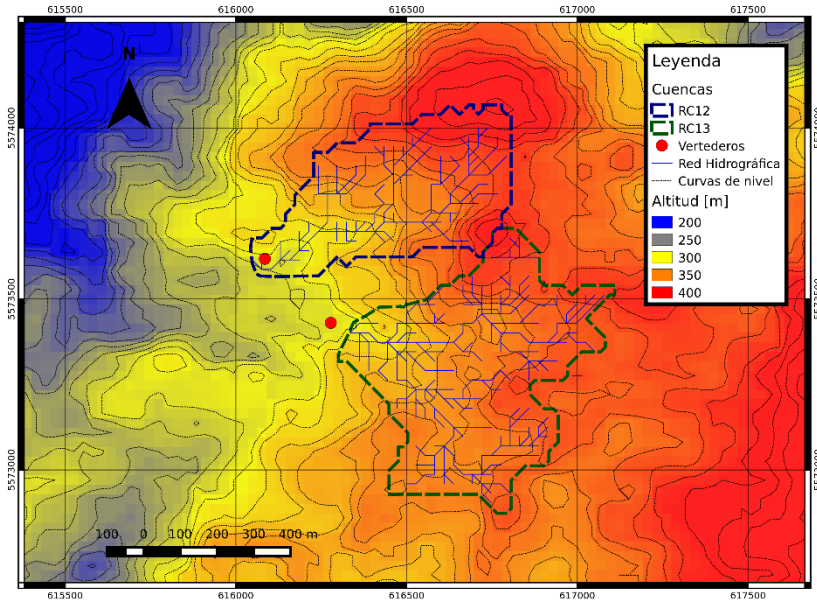


Figura 4.1 Modelo de elevación digital de la zona de estudio a partir de imágenes ASTER GDEM, ubicación de los vertederos y red hidrográfica.

4.2 Coberturas vegetacionales

Para el estudio se consideraron 2 tipos de cobertura vegetacionales: Plantación de Eucalipto y Bosque Nativo. La cuenca RC13 solo cuenta con bosque nativo, mientras que la RC12 tiene ambas coberturas (Ver Figura 4.4), pero predominan las plantaciones de Eucalipto. Las proporciones de cada cobertura vegetal (Ver Tabla 4.1) se determinaron de Little (2011).

Tabla 4.1: Cobertura vegetal de las cuencas.

Cuenca/Cobertura	Bosque Nativo [ha (%)]	Plantación Eucalipto [ha (%)]	Total [ha]
RC12	95,37 (38)	155,6 (62)	250,97
RC13	355,36	0	355,36

A cada cobertura vegetal se le asignaron las características necesarias para el modelo. Estas contemplan parámetros que influyen en los procesos de evapotranspiración, interceptación y en el balance radiativo (Ver Tabla 4.2). Los parámetros fueron obtenidos de mediciones en terreno y de bibliografía. El índice de área foliar se obtiene en terreno con un ceptómetro ojo de pez proporcionado por la Universidad Austral de Chile (Ver Figura 4.2), mientras que valores como la altura de la vegetación, distancia suelo dosel y la fracción cubierta por el dosel se estimaron en terreno. Es importante señalar que los parámetros más influyentes están definidos para cada cobertura en específico.

Tabla 4.2: Parámetros asociados al tipo de vegetación de las cuencas.

Descripción Cobertura	Plantación Eucaliptus	Bosque Nativo	Fuente
Fracción cubierta [%]	50	90	M.T. (Medición en terreno)
Distancia desde el suelo hasta el dosel [m]	10	10	M.T.
Altura Dosel [m]	18	20	M.T.
Altura Sotobosque [m]	2	2	M.T.
LAI Dosel [m ² /m ²]	1,6	5,9	M.T.
LAI Sotobosque [m ² /m ²]	0,4	0,4	M.T.
Resistencia estomática mínima a la ET Dosel [s/m]	24	150	Franks <i>et al.</i> (2009) y Dickinson <i>et al.</i> (1986)
Resistencia estomática mínima a la ET Sotobosque [s/m]	200	200	Dickinson <i>et al.</i> (1986)
Albedo Dosel	0,04	0,04	Dickinson <i>et al.</i> (1986)
Albedo Sotobosque	0,05	0,05	Dickinson <i>et al.</i> (1986)



Figura 4.2: Medición en terreno del índice de área foliar.

4.3 Caracterización del suelo

En terreno se constató que los horizontes profundos son similares entre diferentes coberturas vegetales, pero la primera capa (15 cm) muestra diferencias significativas en cuanto a la cantidad de materia orgánica y permeabilidad. Se clasificó el suelo siguiendo los procedimientos descritos en Schlatter *et al.* (2003) (Ver Tabla 4.3).

Las principales diferencias se encuentran en la conductividad hidráulica saturada vertical de la capa superior, ésta se mide en terreno con un permeámetro de Guelph. Es importante señalar que el día de las mediciones llovió, por lo que se conservaron sólo los valores del primer estrato de unos 15 cm. que se encontraba con poca humedad. Los valores asociados al tipo de suelo que representan capas más profundas fueron obtenidos de Meyer *et al.* (1997). La densidad aparente y porosidad se midió en laboratorio siguiendo con el método del cilindro descrito en el Michelana *et al.* (2010). Se observa una densidad aparente levemente superior bajo plantaciones de eucalipto, lo que nos indica a priori que estos suelos son menos permeables.

Para el resto de los parámetros se utilizó valores estándar encontrados en Meyer *et al.* (1997) asociados con el tipo de suelo franco arcilloso.

Tabla 4.3: Parámetros geomorfológicos y cobertura vegetal de las cuencas.

Cobertura Vegetal	Bosque Nativo	Plantación Eucalipto	Fuente
Tipo suelo	Franco Arcilloso	Franco Arcilloso	M.T.
Albedo superficial	0,1	0,1	Meyer <i>et al.</i> (1997)
Porosidad capa superior [0-1]	0,62	0,63	M.T.
Porosidad capa inferior [0-1]	0,45	0,44	M.T.
Distribución de poros [0-1]	0,3	0,3	Meyer <i>et al.</i> (1997)
Presión de burbuja [Pa]	0,88	0,88	Meyer <i>et al.</i> (1997)
Capacidad de campo [0-1]	0,3	0,3	Meyer <i>et al.</i> (1997)
Densidad aparente capa superior [gr/m³]	0,66	0,69	M.T.
Densidad aparente capa inferior [gr/m³]	1,17	1,3	M.T.
Conductividad vertical capa superior [m/s]	1,15E-05	1,87E-007	M.T.
Conductividad vertical capa inferior [m/s]	1E-06	1E-06	Meyer <i>et al.</i> (1997)

La profundidad del suelo es muy importante, porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar para las plantas. Con frecuencia a mayor profundidad mayor densidad aparente y menor porosidad. La profundidad de los suelos fue medida en diferentes puntos dentro de las cuencas o cercano a ellas con un bastón pedológico (Ver Figura 4.3) a diferentes cotas buscando caracterizar desde las zonas más altas hasta las zonas más bajas, siguiendo las

indicaciones descritas en Schlatter *et al.* (2003). Las mediciones varían dependiendo de la ubicación pero manteniéndose en un rango de 55 a 150 cm (Ver Tabla 4.4).



Figura 4.3: Bastón pedológico y muestra de suelo

Tabla 4.4: Profundidades de suelo

Profundidades de suelo	
Número de muestras	8
Profundidad promedio [cm]	94,5
Profundidad máxima [cm]	141
Profundidad mínima [cm]	55
Desviación estándar muestra [cm]	29,8

La profundidad de los suelos se calculó a partir de la topografía utilizada (Imágenes ASTER GDEM) y de los rangos medidos en terreno. Se empleó una rutina provista en la documentación del modelo donde se interpolan los valores máximos y mínimos medidos a partir de la topografía y pendientes. Las profundidades obtenidas son del orden de 1 metro. Para la creación de estos mapas se adoptó un máximo de 2 metros y un mínimo de 0,76 metros, bajo esta disposición se consiguió un ajuste adecuado en base a las mediciones en terreno.

4.4 Periodo de Modelación

El periodo de modelación se determina a partir tanto de la información meteorológica como del registro pluviométrico disponible. En base a esto se establece el periodo entre el 01 de Enero del 2008 hasta el 31 de Diciembre del 2010 sumando un total de 1096 días. Esto se define dado que los datos disponibles solo coinciden entre el 2009 hasta el 2010 en sus periodos de medición, optando por dejar el 2008 como año de calentamiento del modelo (spin up) para mitigar los efectos de posibles condiciones iniciales incorrectas. Dado que las cuencas poseen un régimen pluvial y dada la disponibilidad de mediciones se utilizan años cronológicos en vez de años hidrológicos, de lo contrario, se tendría un año menos de registro.

4.5 Registros Meteorológicos

Para el cálculo de los procesos hidrológicos es necesario proveer registros pluviométricos y meteorológicos. Además para comparar los caudales modelados se utiliza series fluviométricas. La única estación meteorológica cercana a la zona de estudio es la de Isla Teja, ésta cuenta con un registro diario de temperatura media, velocidad media del viento, humedad relativa y radiación incidente de onda corta. Además se tiene el registro de cuatro pluviógrafos lo que nos da un total de 5 pluviógrafos.

4.5.1 Pluviometría

El análisis pluviométrico se realiza en base a 5 pluviógrafos (Ver Figura 4.4). Los pluviógrafos utilizados son Las Garzas, Huiro, Cadillal, Oficinas e Isla Teja.

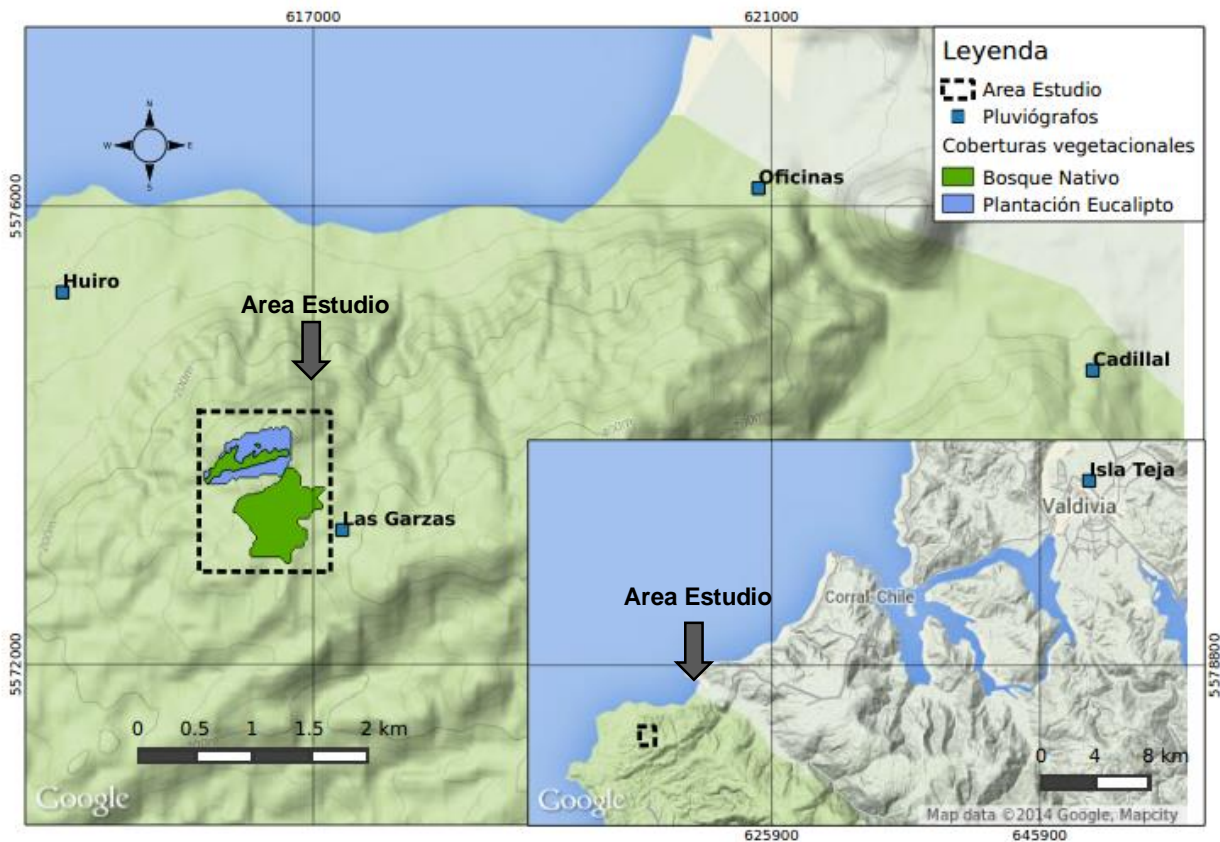


Figura 4.4: Mapa de coberturas vegetales y ubicación de las estaciones

Las estaciones pluviométricas más cercanas son Las Garzas a 1,1 km y Huiro a 2,1 km, éstas no poseen registros completos (Ver Tabla 4.5), pero la cercanía al área de estudio hace que sean más representativas.

Tabla 4.5: Características de los pluviógrafos.

Estación	Las Garzas	Oficinas	Huiro	Cadillal	Isla Teja
Coordenada Este U.T.M.[m]	617.253	621.442	614.806	623.804	649.598
Coordenada Norte U.T.M.[m]	5.573.164	5.576.371	5.575.243	5.574.559	5.592.562
Altitud [m.s.n.m]	382	5	52	76	11
Distancia al área de estudio [km]	1,1	6	2,1	7,8	38,6
Años de registro	2006-2013	2006-2013	2009-2013	2009-2013	1960-2010
Registro en periodo de modelación (%)	66	84	51	50	100

La estación elegida es Las Garzas, pero dado lo incompleto de su registro es necesario rellenar datos. Para el relleno de datos se realiza una regresión lineal, donde se comparan los registros de todas las estaciones con la estación Las Garzas. Sólo se consideran los datos coincidentes en los registros comparados (Ver Figura 4.5).

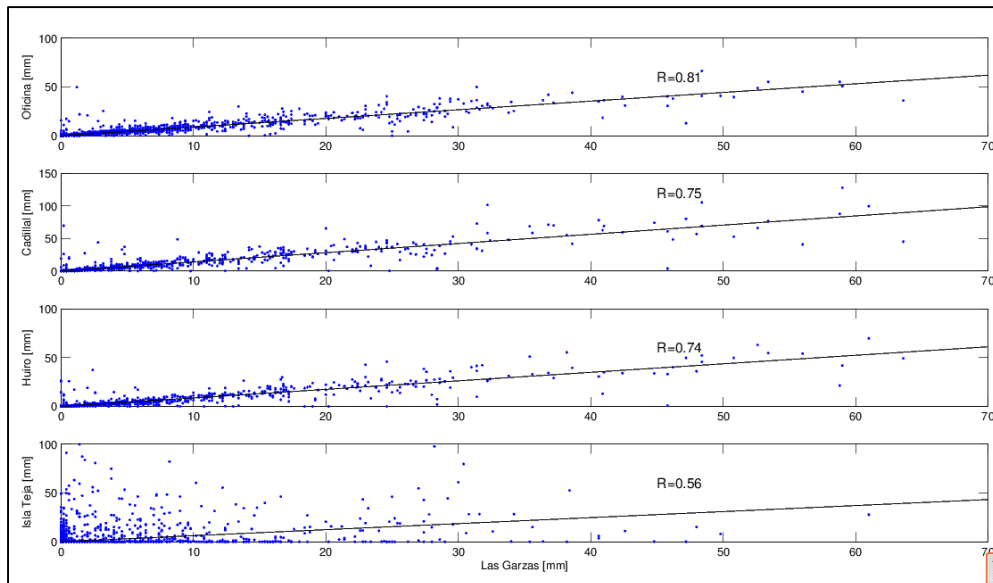


Figura 4.5: Regresiones lineales entre mediciones de precipitación diaria de los distintos pluviógrafos.

Se observa que el mejor ajuste es el de la estación Oficinas, sin embargo la regresión con las estaciones Cadillal y Huiro son aceptables. El ajuste con la estación Isla Teja difiere, sobre todo,

en los valores bajos y no se observa una buena correlación. Con los resultados mostrados queda en evidencia la variabilidad espacial de las precipitaciones en la zona abarcada por las estaciones.

Se rellena entonces la estación Las Garzas utilizando en primer lugar la estación Oficinas y en segundo y tercer lugar las estaciones Cadillal y Huiro; obteniendo en definitiva la serie completa para el periodo de modelación. Se obtiene un promedio de 1562 milímetros precipitados anualmente para el periodo 2008-2010, con un máximo de 66,5 milímetros en 24 horas el día 14 de Mayo del 2008 (Ver Figura 4.6).

Un efecto no considerado en las mediciones es la denominada precipitación oculta o precipitación horizontal, característica de las zonas costeras. Esta precipitación fue medida en Izaña, España (García R., 2010) y alcanzó en un año 1550 milímetros. En República Checa (Elias *et al.*, 2005) se estimó esta precipitación en 81 mm en un año de estudio a una altitud de 1.000 m.s.n.m. En Honduras (Perard, 2011) se estimó una precipitación horizontal promedio de 1409 milímetros a una altitud superior a los 1000 m.s.n.m.

El modelo utiliza un gradiente de precipitación por altitud para distribuir las precipitaciones espacialmente. Utilizando la información disponible se generó, una serie de gradientes de precipitación calculados a partir de mediciones de la estación Las Garzas y Huiro, y sus respectivas altitudes (Ver Ecuación (4)).

$$G^t = \frac{P_{LG}^t - P_H^t}{Z_{LG}^t - Z_H^t} \quad (4)$$

Donde G^t es el gradiente de precipitaciones en $[mm/m]$ para el tiempo t , P_{LG}^t , P_H^t , Z_{LG}^t , Z_H^t son las precipitaciones (P) y altitudes (Z) en las estaciones Las Garzas (LG) y Huiro (H) para el tiempo t . Como las estaciones tienen registros incompletos se rellenaron con los datos del resto de las estaciones con el mismo mecanismo mencionado anteriormente.

El gradiente calculado es en general positivo con el aumento de la altura, pero está lejos de tomar un valor constante, por lo que es una mejor aproximación utilizar un gradiente variable en el tiempo (Ver Figura 4.78d).

4.5.2 Temperatura

Se tiene registro de la temperatura media diaria para todo el periodo de estudio de la estación Isla Teja (Ver Figura 4.6). Estos valores pueden diferir dada la cota de la estación en comparación con la zona del proyecto, sin embargo es la única información cercana disponible. La temperatura promedio para el periodo de estudio es de 12,35° C, y se alcanzan temperaturas máximas y mínimas de 25,2 y 1,3 °C.

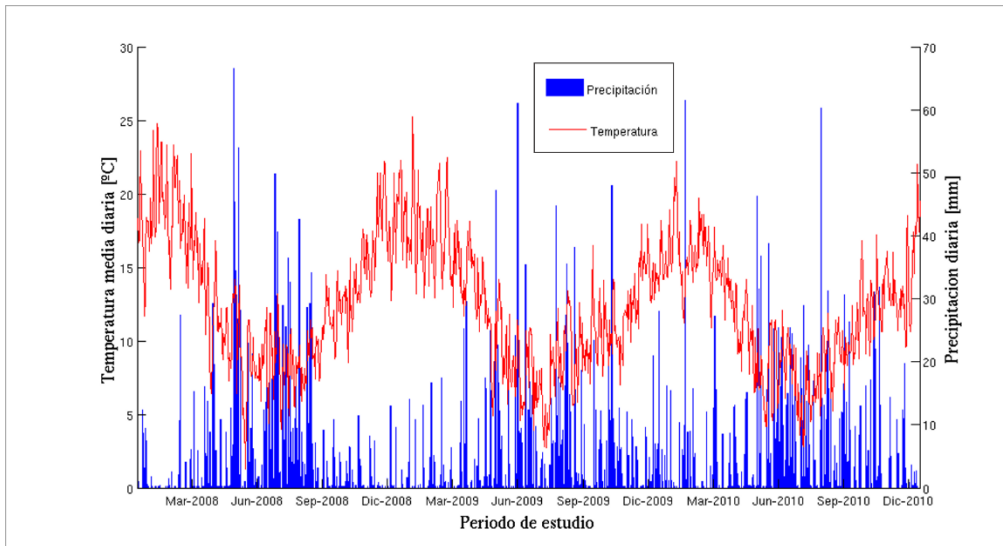


Figura 4.6: Serie de precipitaciones diarias estación Las Garzas para el periodo de estudio y temperatura de la estación Isla Teja.

4.5.3 Humedad relativa

La humedad relativa es una variable de mucha importancia para los procesos de evapotranspiración. En base a esta variable se obtienen la presión de vapor en el entorno la cual condiciona la transpiración de las plantas. Los datos se obtienen de la estación Isla Teja (Ver Figura 4.78c; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

4.5.4 Velocidad del viento

La velocidad media fue medida a 2 metros por sobre la cota del suelo en la estación Isla Teja, sin embargo es necesario extrapolar las mediciones a una altura superior para no alterar la estabilidad del modelo. Se utiliza una altura de 70 metros y se extrapolan los valores utilizando un perfil logarítmico a partir de Allen *et al.* (2006) para estimar velocidades de viento a diferentes alturas a partir de una medición estándar a 2m de altura (Ver Ecuación(5).

$$V(h) = \frac{V(2m)}{4,87} \log(67,8h - 5,42) \quad (5)$$

Donde $V(h)$ es la velocidad del viento a una altura h .

Las velocidades llegan a los 9 m/s aproximadamente (Ver a). El modelo recalcula esta velocidad a alturas inferiores utilizando también un perfil logarítmico (Ver Anexo A1).

4.5.5 Radiación incidente de onda corta

La radiación es una variable de suma importancia en el balance radiativo, en base a esta variable se calculan los flujos entre diferentes capas de vegetación, condicionando el derretimiento de nieve en el caso de cuencas con nieve y la evapotranspiración. Se considera que los valores obtenidos de la estación Isla Teja, dada la latitud, no debieran diferir mucho de la zona de estudio. El registro disponible data desde 1960 hasta 1995 y para completar los datos faltantes se realizó una regresión

lineal histórica entre esta variable y las demás variables meteorológicas obteniendo que existe una relación directa con la humedad relativa (Ver Figura 4.7).

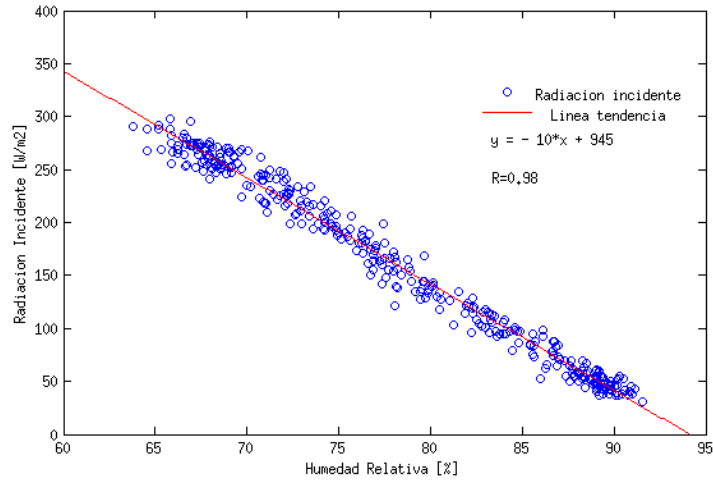


Figura 4.7: Radiación vs Humedad relativa Incidente de onda corta, estación Isla Teja

La serie de radiación incidente se calcula entonces en base a una regresión lineal con la humedad relativa.

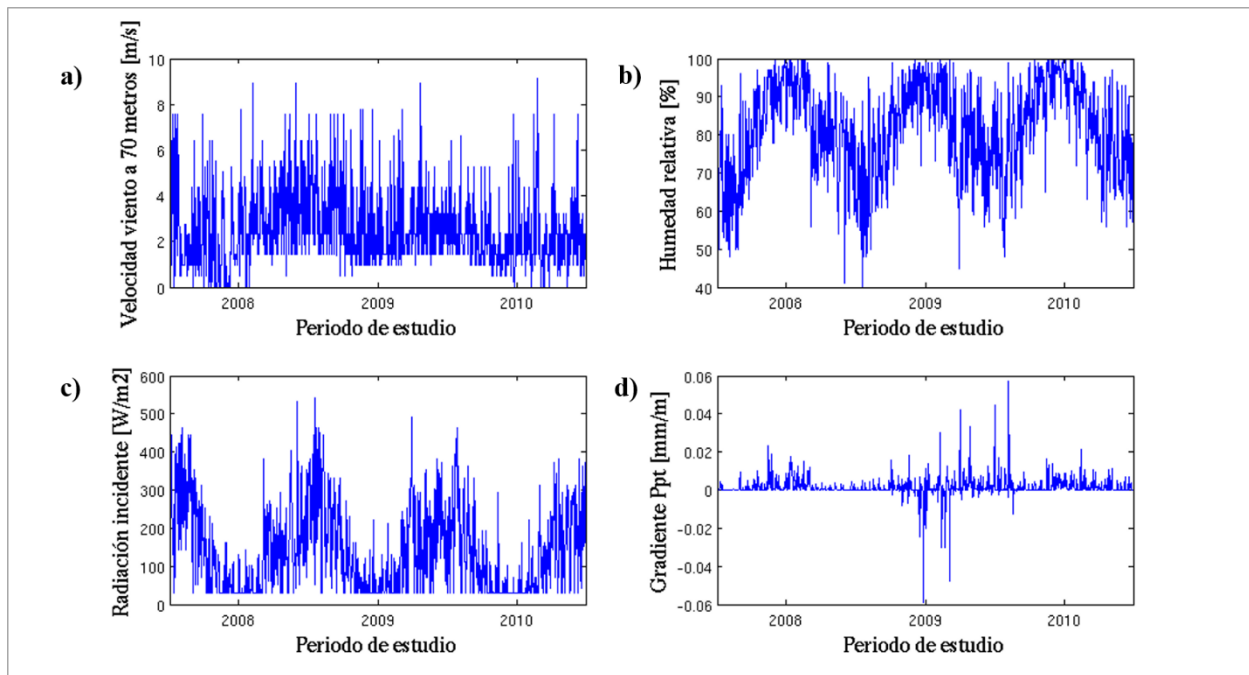


Figura 4.8: Velocidad del viento (a), humedad relativa (b) y radiación incidente (c) de estación Isla Teja. Gradiente de precipitaciones con la altitud (d).

Se observan valores elevados de humedad relativa, esto condiciona bastante la transpiración de las especies, puesto que a mayor humedad relativa disminuye el déficit de presión de vapor entre la hoja y el entorno.

4.6 Registros fluviométricos

Para el estudio se utiliza la información de 2 vertederos construidos y monitoreados por la Universidad Austral de Chile, estos se ubican a la salida de las cuencas RC12 y RC13 (Ver Figura 4.1). Los vertederos tienen un ángulo de apertura de 120° y 90° (Ver Figura 4.9), y fueron construidos por la Universidad Austral de Chile. Las instalaciones poseen 2 data logger, el primero es ubicado al aire libre para medir la presión atmosférica y el segundo se sumerge a la altura del vertedero. En base a las diferencias de presión se obtienen los caudales.



Figura 4.9: Fotografía vertedero cuenca aledaña a la zona de estudio.

El funcionamiento de los vertederos ha sido intermitente y la información obtenida data desde fines del 2008 (RC12) e inicios del 2009 (RC13) hasta Septiembre del 2013. Existe información en el periodo 2009-2010 correspondiente a un 91% y un 87% del registro en las cuencas RC12 y RC13 respectivamente (Ver Tabla 4.6). La relación escorrentía precipitación es mayor que uno en ambas cuencas, por lo que podría haber una subestimación sistemática de la precipitación. Ésta se explica por la falta de cuantificación de la precipitación horizontal que ocurre mayormente en zonas costeras.

Las escorrentías bases de ambas cuencas son similares, sin embargo hay una mayor producción por parte de la cuenca RC13 (Sólo bosque nativo) sobre todo en las escorrentías máximas (Ver Figura 4.10). Llama la atención que en los meses de verano los caudales bases sean similares, ya que se le asocian mayores escorrentías de verano a cuencas forestadas con bosque nativo (Lara *et al.*, 2003).

Tabla 4.6: Características de los vertederos y sus registros para el periodo 2009-2010.

Vertedero	RC12	RC13
Registro	2008(Dic)-2013	2009-2013
Cota [m.s.n.m]	300	309
Caudal medio diario [lt/s]	12,9	23,8
Escorrentía promedio [mm/día]	4,45	5,57
Porcentaje de registro [%]	91	87
Escorrentía/Precipitación² [mm/mm]	1.1	1.4

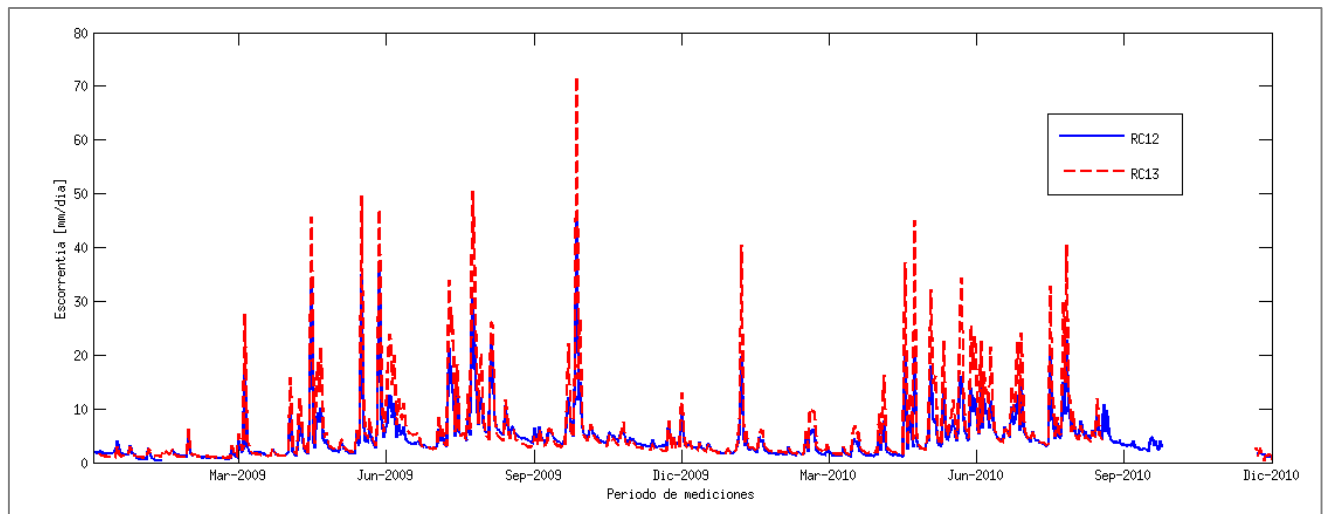


Figura 4.10: Escorrentías diarias observadas de las cuencas de estudio

4.7 Condiciones Iniciales

Se necesita definir las condiciones iniciales para la ejecución del modelo. La condición inicial del problema está asociada al primer día de modelación, esto es el 01 de Enero del 2008. Los valores de humedad de suelo se obtienen de Berrones *et al.* (2013) para el bosque nativo y se estima de Huber *et al.* (2010) para la plantación de Eucalipto (Ver Tabla 4.7); ambos en el mes de Enero para diferentes profundidades (z). Al no poseer valores de intercepción para la fechas se adoptaron valores nulos. Los efectos de los valores iniciales se amortiguan al dejar un año de “calentamiento del modelo”.

² Valores promedio para el periodo 2009-2010

Tabla 4.7: Condiciones iniciales para el modelo.

Cuenca	RC12	RC13
Intercepción	0	0
Humedad del suelo en la primera capa ($z < 10$ cm) [%]	0,12	0,3
Humedad del suelo en la segunda capa ($z < 1$ m) [%]	0,18	0,6
Humedad del subsuelo ($z > 1$m) [%]	0,2	0,9

4.8 Aplicación del modelo en las cuencas

Se implementa el modelo DHSVM siguiendo la siguiente metodología:

1. El modelo se ejecuta en primer lugar para la cuenca RC13 (100% bosque nativo) con los parámetros mencionados en este capítulo y se calibran parámetros de incertidumbre para obtener un mejor ajuste de las escorrentías simuladas.
2. En segundo lugar se utilizan los parámetros calibrados de la cuenca RC13 en la cuenca RC12 (Cobertura vegetal mixta).
3. Finalmente se ejecuta el modelo en la cuenca RC12 utilizando los parámetros mostrados en este capítulo y se calibran los parámetros de incertidumbre.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados cuenca RC13 (Bosque Nativo)

Se ejecuta el modelo para la cuenca RC13 utilizando los parámetros descritos en el capítulo anterior. Al existir un déficit de agua en el sistema (Ver Tabla 5.1) se utiliza un multiplicador de precipitaciones. Además se calibraron el déficit de presión de vapor (DPV) limitante de la transpiración y el factor de decaimiento exponencial por profundidad, de la conductividad lateral hidráulica saturada. El valor calibrado del DPV se encuentra dentro del orden según Wigmosta *et al.* (1994) y el decaimiento exponencial de la conductividad hidráulica lateral se calibró de modo de tener un valor similar de disponibilidad de agua en el suelo entre el comienzo y el final del periodo de modelación.

Tabla 5.1: Parámetros calibrados de la cuenca RC13

Parámetros	Valores
Multiplicador Precipitaciones	1,5
Decaimiento exponencial de la conductividad lateral hidráulica saturada con la profundidad	0
Déficit de presión de vapor limitante de la transpiración (DPV) [Pa]	1.000

La escorrentía modelada se ajusta bien según la calibración señalada, sobretodo en los caudales bases, sin embarlo los caudales máximos son subestimados (Ver Figura 5.1). A comienzos del 2009 se subestiman los caudales, esto puede ser causa que en dichos meses no había información en los pluviógrafos cercanos. La escorrentía total observada para el periodo Enero 2009-Diciembre 2010 fue de 3640 milímetros y la simulada fue de 3674 milímetros, correspondiente tan solo en un 1% de error, lo que se ve reflejado en un bajo índice BIAS (Ver Tabla 5.2). El índice Nash Sutcliffe (NS) y el coeficiente de determinación (R^2) alcanzan un 0,6; lo que indica que hay una buena correlación entre las escorrentías simuladas y las observadas.

Tabla 5.2: Índices de ajuste para la cuenca RC13

Cuenca	BIAS	NS	R^2
RC13	0,05	0,6	0,61

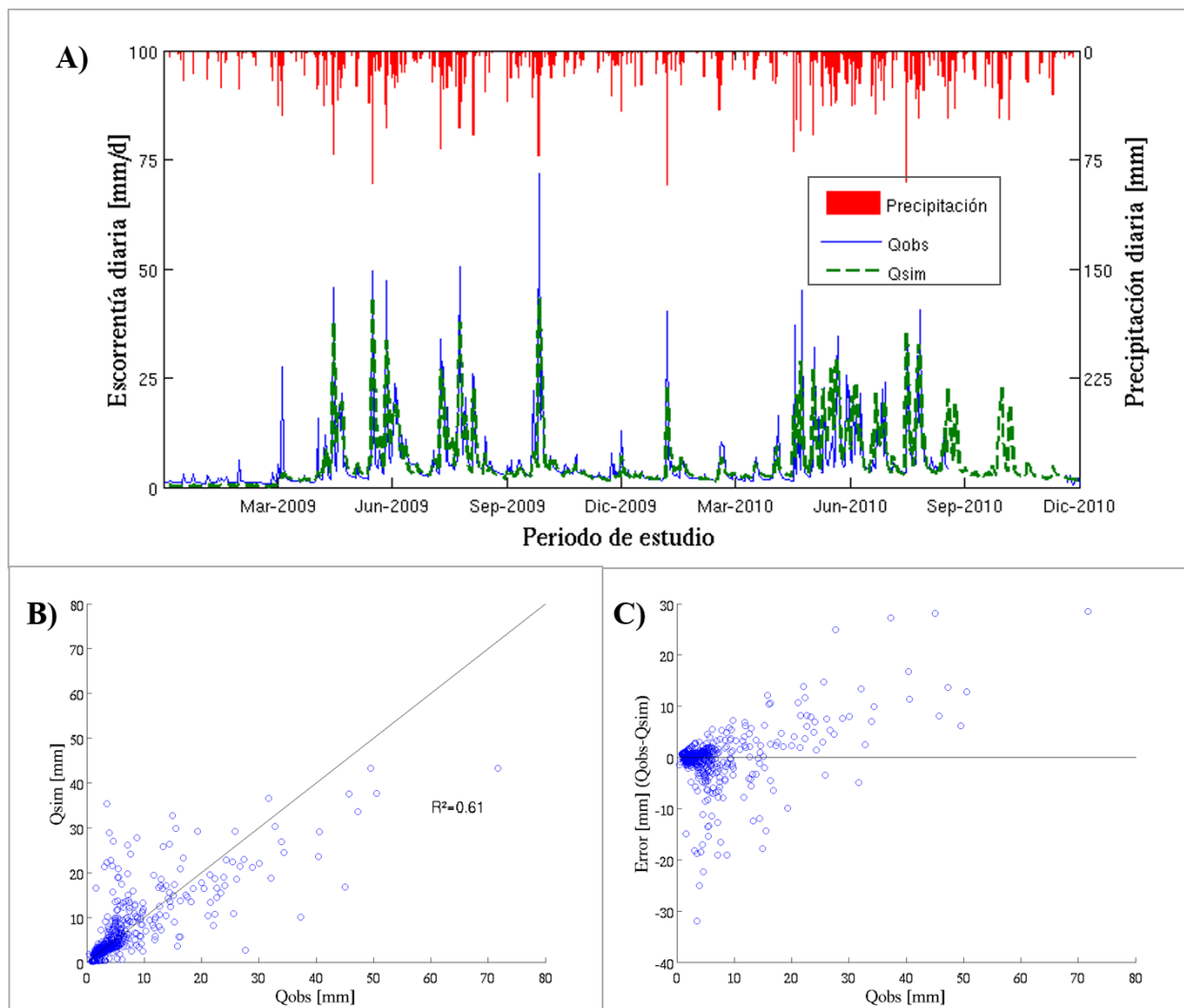


Figura 5.1: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Q_{sim}) y observadas (Q_{obs}) de la cuenca RC13 calibrada. (B) Q_{sim} vs. Q_{obs} (C) Error ($Q_{obs}-Q_{sim}$) vs Q_{obs} .

5.2 Resultados cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13

Se ejecuta el modelo para la cuenca RC12 utilizando los parámetros descritos en el capítulo anterior para la cobertura vegetal de bosque nativo y los parámetros calibrados para la cuenca RC13 anteriormente descritos. El objetivo de esta simulación es ver si el modelo es insensible a la cobertura vegetal.

Los resultados muestran que hay una correlación entre las escorrentías simuladas y las observadas, sin embargo hay un sobreestimación sistemática de las escorrentías a excepción de inicios del 2009 donde nuevamente hay una subestimación de las escorrentías (Ver Figura 5.2). La escorrentía total para el periodo Enero 2009-Diciembre 2010 simulada es de 3.922 milímetros, mientras que la observada es de 2.989 milímetros. Esta gran diferencia (31%) se ve reflejada en el índice de ajuste BIAS (Ver Tabla 5.3). El índice NS nos muestra que hay un mal ajuste producto de la sobreestimación sistemática, situación que no sucede con el coeficiente de determinación el cual es insensible a sobreestimaciones sistemáticas (Krause, 2005).

Tabla 5.3: Índices de ajuste cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13

Cuenca	BIAS	NS	R^2
RC13	1,38	0,02	0,58

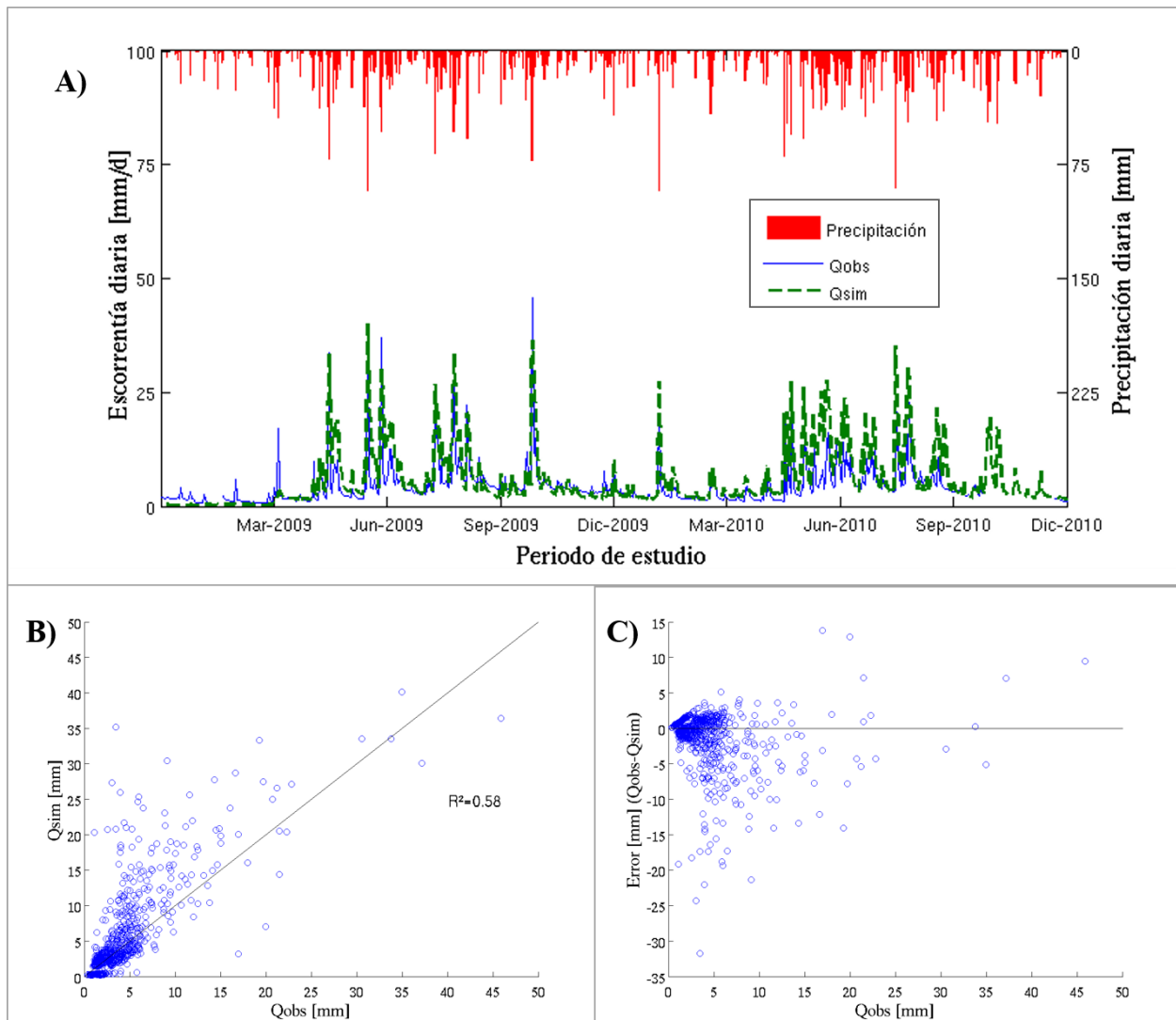


Figura 5.2: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Qsim) y observadas (Qobs) de la cuenca RC12 bajo parámetros de la cuenca RC13. (B) Qsim vs Qobs. (C) Error (Qobs-Qsim) vs Qobs.

De la simulación mostrada se obtiene que el modelo si es sensible al cambio de cobertura vegetal, y la existencia de plantaciones de eucalipto disminuiría la escorrentía total. Sobre esto sabemos que a diferencia del bosque nativo, la plantación de eucalipto tiene tasas de transpiración superiores, lo que a priori sería una justificación del exceso de caudal simulado.

5.3 Resultados cuenca RC12 calibrada

Finalmente se ejecuta el modelo en la cuenca RC12 con los parámetros asociados a cada tipo de cobertura vegetal descritos en el capítulo 4. Además se calibran parámetros para mejorar el ajuste y poder concluir sobre la influencia de estos en los resultados obtenidos. Los parámetros calibrados son la conductividad hidráulica lateral saturada, el déficit de presión de vapor límite que restringe la transpiración y la resistencia estomática mínima (Ver Tabla 5.4 Tabla 5.1). Se determinó un valor alto de DPV para que no restringiera la transpiración del eucalipto, la resistencia estomática está dentro del orden observado (Ver Wigmosta *et al.*, 1994) y la conductividad hidráulica se ubica por encima de la utilizada en la cobertura de bosque de eucalipto, pero en el mismo orden de magnitud.

Tabla 5.4: Parámetros calibrados de la cuenca RC12 para plantación de eucalipto

Parámetros	Valores
Multiplicador Precipitaciones	1,5
Déficit de presión de vapor limitante de la transpiración (DPV) [Pa]	8.000
Resistencia estomática mínima [s/m]	18
Conductividad hidráulica lateral saturada superior	3,15 E-5
Decaimiento exponencial de la conductividad lateral hidráulica saturada con la profundidad	0

Las escorrentías simuladas no se ajustan tan bien como la simulación de la cuenca RC13 (Ver Figura 5.3). En el 2009 los caudales máximos son cercanos a los observados, sin embargo los últimos meses hay una subestimación de las escorrentías base. En el 2010 hay una sobreestimación sistemática de los valores máximos, sin embargo no hay subestimación de las escorrentías bajas. El total de los caudales simulados para el periodo Enero 2009-Diciembre 2010 es de 3.281 milímetros y el total observado es de 2.989 milímetros, lo que significa una sobreestimación del 10%. Esta diferencia se ve reflejada en el índice BIAS que paso de 1,38 a 0,43; lo que muestra una mejora en la modelación de la escorrentía total en comparación a la simulación con los parámetros de la cuenca RC13. El índice NS mejoró y el coeficiente de determinación no tuvo grandes modificaciones.

Tabla 5.5: Índices de ajuste cuenca RC12 calibrada

Cuenca	BIAS	NS	R^2
RC13	0,43	0,32	0,57

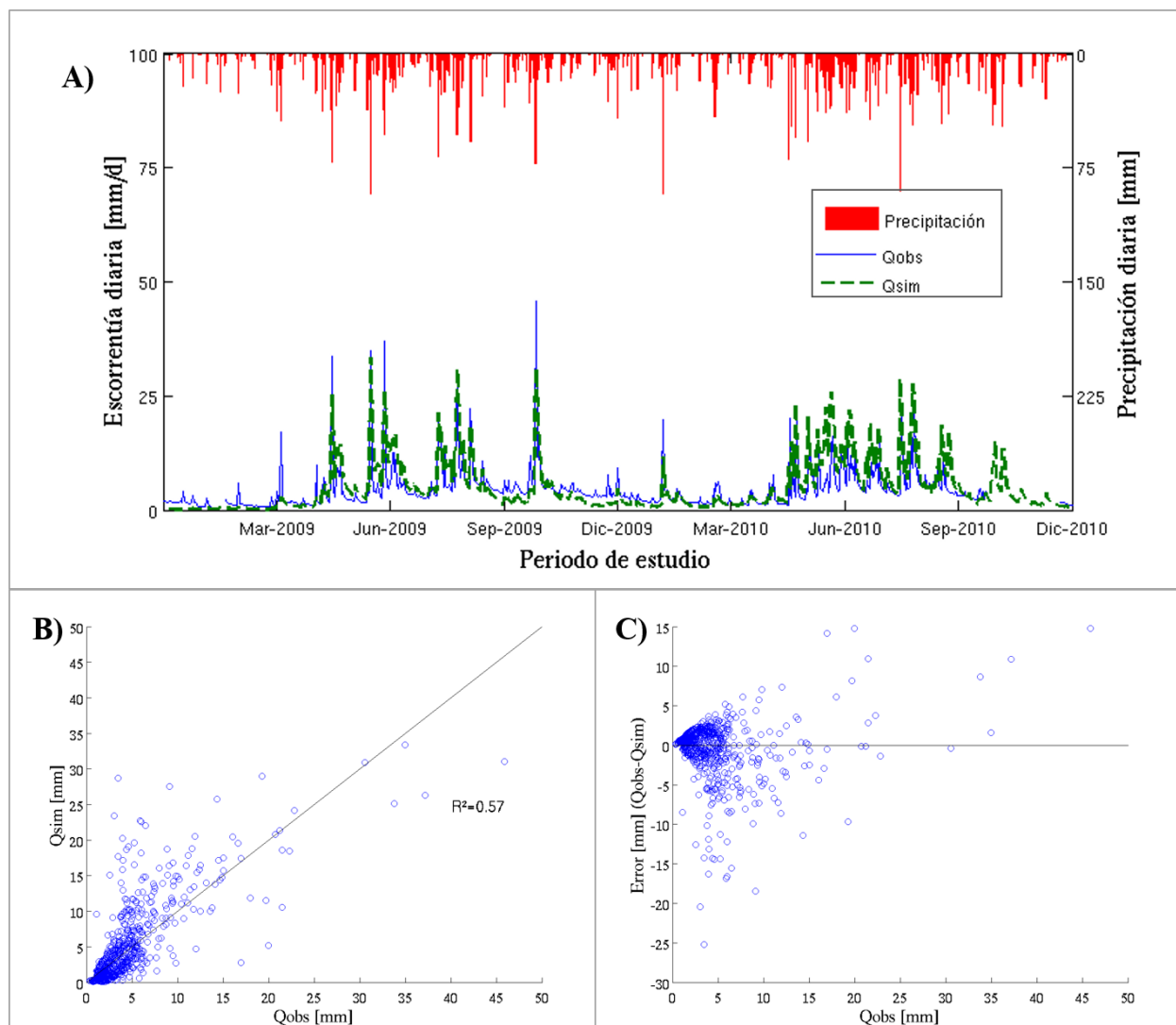


Figura 5.3: (A) Escorrentías simuladas por el modelo (Qsim) y observadas (Qobs) de la cuenca RC12 calibrada. (B) Qsim vs Qobs. (C) Error (Qobs-Qsim) vs Qobs.

En el proceso de calibración se concluye que la sobreestimación de la escorrentía provenía de la mayor evapotranspiración de la plantación de eucalipto. Al calibrar la conductividad hidráulica saturada lateral del suelo, se observó que esta influía de manera directa en los caudales base, determinándosele un valor superior al medido en terreno. Esta medición fue insuficiente, puesto

que al no tener una caracterización de la conductividad a diferentes profundidades y no se pudo calcular el decaimiento exponencial de este parámetro, teniendo que calibrarlo también.

La calibración involucró parámetros importantes en dos procesos hidrológicos distintos; la escorrentía subsuperficial y la evapotranspiración, por lo tanto no se puede concluir en detalle la influencia de cada proceso por separado en las diferentes respuestas que entregan las cuencas al poseer diferentes coberturas vegetacionales.

5.4 Análisis de los procesos

Los valores anuales muestran una mayor escorrentía en el año 2010 para ambas cuencas (Ver Tabla 5.6). La evapotranspiración total alcanzó un 20% de las precipitaciones en la cuenca RC13, mientras que la evapotranspiración cuenca RC12 alcanzó un 33% de las precipitaciones. Estos valores reflejan la influencia de la plantación de eucalipto en el balance hidrológico de la cuenca RC12, la cual con un 62% de plantación supera en un 13% los montos evapotranspirados. Producto de esto y de manera indirectamente proporcional, las escorrentías son mayores en la cuenca RC13 que solo posee bosque nativo. El almacenamiento promedio en el suelo fue un 47% superior en la cuenca RC13 al almacenamiento de la RC12.

Tabla 5.6: Balance anual de escorrentía, evapotranspiración y almacenamiento en el suelo.

Año	Escorrentía [mm/año]		Evapotranspiración [mm/año]		Almacenamiento en el suelo promedio diario[mm]	
	RC12	RC13	RC12	RC13	RC12	RC13
2008	1889,3	2285,9	728,5	528,6	376,6	534,2
2009	1565,8	1829,3	905	592	363,3	530,9
2010	1915	2311,7	969	499,2	367,7	564,3
Promedio	1790	2142,3	867,5	539,9	369,2	543,1

Se analiza a nivel mensual el almacenamiento promedio diario de agua interceptada en las hojas, la evapotranspiración total, y el almacenamiento de agua promedio diario en el suelo calculados por el modelo (Ver Figura 5.4). Se obtiene que el almacenamiento en las hojas, y por lo tanto la interceptación, es mayor en invierno producto del aumento de las precipitaciones. La cuenca RC13 (bosque nativo) intercepta más agua dada la alta densidad de hojas que posee, reflejada en un índice de área foliar de 6 metros cuadrados de hoja por metro cuadrado de superficie aproximadamente. La evapotranspiración por su parte es superior en la cuenca RC12 (cobertura vegetal mixta) por el aporte de la plantación de eucalipto y sus altas tasas de transpiración. El almacenamiento en el suelo se observa que fluctúa teniendo una mayor disponibilidad de agua la cuenca con bosque nativo, sobre todo en verano que llega a superar en un 90% el almacenamiento de la cuenca RC12; esto se explica por el alto consumo de la plantación de eucalipto, que se traduce en altas tasas de transpiración. Se observa no hay grandes cambios en el almacenamiento de agua del suelo entre el comienzo y el fin del periodo de modelación.

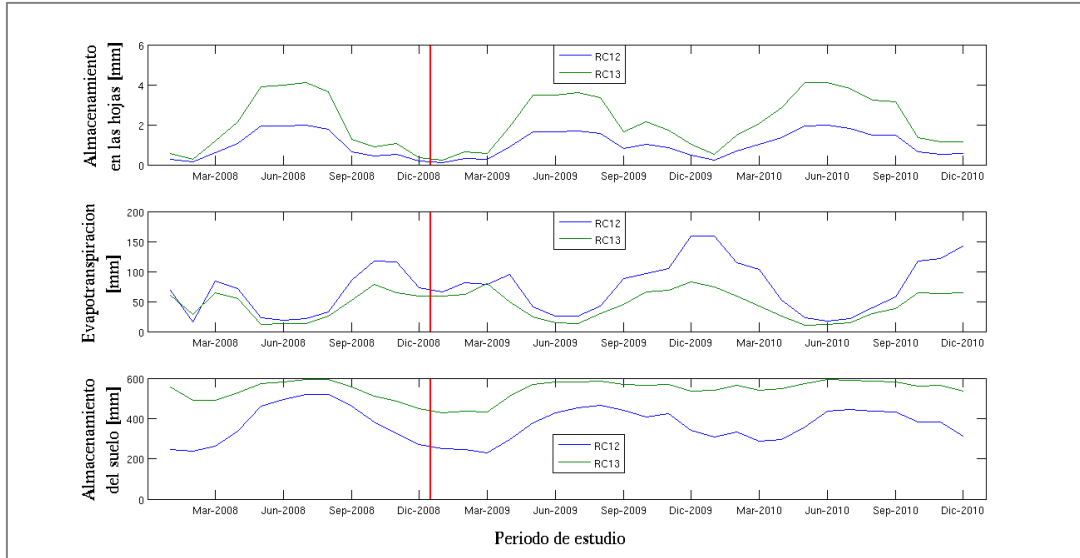


Figura 5.4: Almacenamiento en las hojas promedio diario, evapotranspiración mensual acumulada y almacenamiento de agua promedio mensual en el suelo para el periodo de simulación (2008 año de calentamiento del modelo).

5.5 Sensibilidad del índice de área foliar

Adicionalmente se simula la cuenca RC12 calibrada bajo diferentes índices de área foliar (LAI) desde el valor medido para plantación de eucalipto (1,6) hasta el valor medido para el bosque nativo (5,9). Se obtiene que el coeficiente de determinación y el índice NS se mantienen invariantes. Se rescata el índice BIAS para analizar la influencia del parámetro en el balance final total y el monto total evapotranspirado en los tres años de estudio.

Al aumentar el LAI aumenta la evapotranspiración total aproximadamente 100 milímetros y el índice BIAS pasa de 0,43 a 0,34. Los cambios observados son bajos si se considera que son tres años de modelación, por lo que se concluye que bajo la calibración mencionada, el parámetro LAI no es tan influyente en el balance hídrico total.

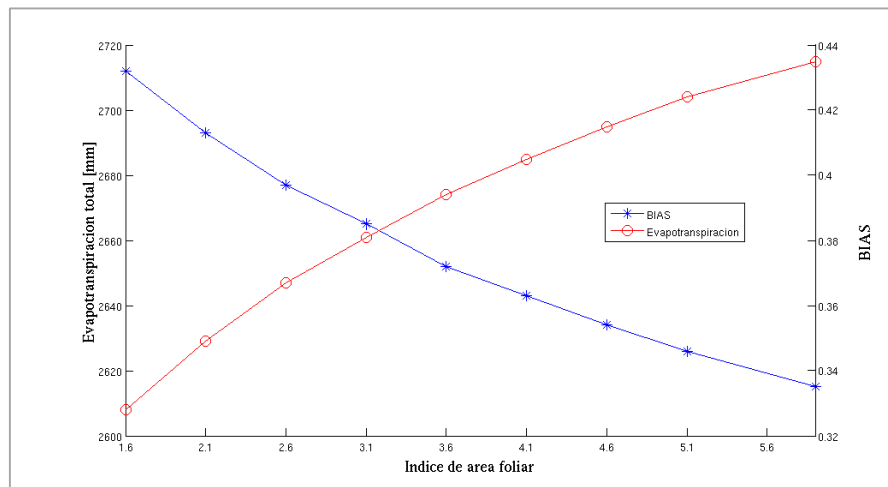


Figura 5.5: Índice BIAS y evapotranspiración total en los tres años de simulación para diferentes valores de LAI

6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El desempeño del modelo en la simulación de escorrentías fue exitoso en la cuenca RC13 (Bosque nativo) con un índice de ajuste Nash-Sutcliffe (NS) de 0,6 y una leve sobreestimación general reflejada en un índice BIAS de 0,05. Al calibrar la cuenca RC12 (Vegetación mixta) no se logró tan buen ajuste como en la RC13 obteniendo una sobreestimación general reflejada en un índice BIAS de 0,43 y un índice NS de 0,32. Se obtuvo que el modelo es sensible a las diferentes coberturas vegetacionales, influyendo éstas de manera determinante en los balances realizados.

Los índices de ajuste nos ayudaron a determinar las falencias en la modelación. El índice BIAS nos muestra la existencia de sobreestimaciones y subestimaciones sistemáticas, lo que a la vez dice si las escorrentías totales modeladas son similares a las observadas. El coeficiente de determinación informa si existe una correlación, pero como se comprobó en el capítulo 6, es insensible a las subestimaciones y sobreestimaciones sistemáticas. El índice de Nash-Sutcliffe fue más representativo de la bondad del ajuste, al compararlo con la apreciación visual en el gráfico.

Los resultados del modelo muestran que la evapotranspiración significó un 33% y un 20% de las precipitaciones para las cuencas RC12 y RC13 respectivamente. La cuenca RC12 al poseer un 62% de eucalipto eleva la evapotranspiración total, superando en un 13% a la cuenca forestada con bosque nativo. La interceptación fue superior para la cuenca RC13, dado el alto follaje del bosque nativo, y alcanza su máximo en invierno, producto del aumento de precipitaciones.

Los resultados muestran que bajo coberturas de bosque nativo los tres años de estudio, existe una disponibilidad de agua en el suelo un 47% mayor que con plantaciones de eucalipto, sobre todo en los meses de verano. Este resultado se explica por el alto consumo de la plantación de eucalipto y es consistente con lo revisado en estudios anteriores (Oyarzún *et al.*, 1999, Berrones *et al.*, 2013).

Se aplicaron los parámetros de la cuenca RC13 en la cuenca RC12, dando como resultado una sobreestimación de las escorrentías. Al calibrar la cuenca RC12 se determina que la sobreestimación provenía de la mayor evapotranspiración de la plantación de eucalipto reflejada en su menor resistencia estomática.

La conductividad hidráulica saturada lateral del suelo influía de manera directa en las escorrentías base, y la calibración de ésta entregó un valor superior al medido en terreno. La medición de este parámetro fue insuficiente, puesto que al no tener una caracterización de la conductividad a diferentes profundidades no se puede desarrollar un perfil de conductividades dentro del suelo, teniendo que calibrar el decaimiento exponencial con la profundidad de este parámetro.

La calibración involucró parámetros importantes en dos procesos hidrológicos distintos: la escorrentía subsuperficial y la evapotranspiración, por lo tanto no se puede concluir en detalle la influencia de cada proceso en las diferentes respuestas que entregan las cuencas al poseer diferentes coberturas vegetacionales. Sin embargo los balances anuales muestran consistencia con los estudios revisados demostrando que las tasas de transpiración de la plantación de eucalipto genera diferencias importantes en el balance hídrico general disminuyendo las escorrentías (Lara *et al.*, 2009, Little *et al.*, 2009, Berrones *et al.*, 2013).

El modelo DHSVM representa bajo ecuaciones físicas, los balances de masa y energía, considerando las influencias de las propiedades del suelo, las coberturas vegetacionales, la meteorología y las variables topográficas. Para la ejecución del modelo se obtuvieron parámetros a partir de mediciones en terreno y de fuentes bibliográficas, sin embargo este trabajo consiste en una primera aproximación, dado que no todas las variables pudieron ser obtenidas, lo que generó incertidumbre en los resultados.

Dentro de las incertezas en la ejecución del modelo se encuentran las variables meteorológicas, que fueron obtenidas de la estación Isla Teja ubicada a 39 kilómetros de la zona de estudio y a una cota inferior. Por otra parte la topografía obtenida de imágenes satelitales posee una resolución de 27 metros de ancho, lo que genera diferencias en las cotas promedio y pendientes. Al modelar el terreno con la resolución mencionada, se asume homogeneidad de las coberturas vegetacionales como aproximación, sin embargo el bosque nativo es muy heterogéneo en cuanto a la distribución de las especies.

Se recomienda, en futuros estudios, medir de mejor forma las conductividades saturadas hidráulicas laterales de los suelos a diferentes profundidades y las conductancias estomáticas de las especies arbóreas. Se recomienda también; medir los parámetros meteorológicos en las cuencas y cuantificar la lluvia oculta (lluvia horizontal); analizar la topografía y profundidades de suelo en mayor detalle, y finalmente, tener registro de las evapotranspiraciones de las cuencas, para poder calibrar basándose en tales mediciones.

Con información utilizada, se obtiene que a nivel anual las diferencias en los caudales provistos por cuencas bajo coberturas vegetacionales de eucalipto y bosque nativo, son producidas principalmente por las diferentes las tasas evapotranspirativas.

Se concluye finalmente, que el modelo es una herramienta eficaz para la predicción de procesos hidrológicos, sin embargo no es posible cuantificar en detalle la influencia de los diferentes procesos hidrológicos por la gran cantidad de incertezas asociadas a la información requerida por el modelo por lo que los objetivos de este estudio se cumplen en el análisis del balance anual.

7 BIBLIOGRAFÍA

Alila, Y. y Beckers, J. 2001. Using numerical modelling to address hydrologic forest management issues in British Columbia. *Hydrological processes* 15: 3371-3387.

Armesto, J.; León-Lobos, P.; y M. Kalin 1996. Los bosques templados del sur de Chile y Argentina: una isla biogeográfica. EN: J. Armesto, C. Villagrán y M. Kalin. *Ecología de los Bosques Nativos de Chile*. Santiago, Editorial Universitaria. pp. 23-28.

Armesto, J.; Rozzi, R.; Smith-Ramírez, C. y Arroyo, M. 1998. Conservation targets in South American temperate forests. *Science*. 282(5392): 1271 - 1272.

Berrones, G. y Oyarzún, C., 2013. Efecto de la transpiración sobre la escorrentía en dos tipos de bosque de la cordillera de la costa, sur de Chile. *Enfoque UTE* 4(2): 18-34.

Braojos, J. y Garcia, E. 2009. Aproximación al cálculo de la lluvia horizontal y a su incidencia en la recarga del sistema acuífero de Tenerife. EN: I Jornadas de Ingeniería de Agua 2009. Madrid 27 y 28 de octubre de 2009.

Bowling, L. y Lettenmaier D. 2001. The effects of forest roads and harvest on catchment hydrology in a mountainous maritime environment. EN: Wigmosta, M. y Burges, S. *Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*. [en línea] *Water Science and Application*. <<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1029/WS002>>.

Buckley, T. K. y Mott, K.A. 2002. Dynamics of stomatal water relations during the humidity response: implications of two hypothetical mechanisms. *Plant Cell Environ* 25(3):407-19.

Burges, S.; Fellow, ASCE, Wigmosta, M. y Meena, J. 1998. Hydrological effects of land-use change in a zero-order catchment. *Journal of hydrologic engineering* 3: 86-97.

Calder, I. R. 1992. The hydrological impact of land-use change with special reference to afforestation and deforestation". EN: *Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineers Advisers Conference*. Southampton, July 1992, Overseas Development Administration, pp. 91-101.

CONAF, CONAMA, BIRF 1999. *Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile*. Santiago.

Instituto Nacional De Investigación De Recursos Naturales, UACH 1978. *Estudio de suelos de la Provincia de Valdivia*. Santiago.

Cuevas, J.; Calvo, M.; Little, C.; Pino, M.; Dassori, P. 2010. Are diurnal fluctuation in streamflow real?. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 58(3): 149-162

Cuo, L.; Lettenmaier D.; Alberti, M. y Richey, J. 2009. Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin. *Hydrological processes* 23: 907-933.

Dickinson, R.E.; Henderson-Sellers, A.; Kennedy, P.J. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. Colorado, NCAR Technical Note, NCAR/TN-387+STR.

Donoso, S.; Ruiz, F.; Herrera, M. 2001-2002. Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus Globulus*. *Ciencias Forestales* 16(1-2): 3-10.

Ellies, A.; Ramírez, C. y Figueroa, H. S. 1993. Modificaciones estructurales de un suelo sometido a distintos usos forestales. *Bosque* 14(2): 25-30.

Eisenbies, M.H.; Aust, W.M.; Burger, J.A.; Adams, M.B. 2007. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians—A review. *Forest Ecology and Management*. 242: 77–98.

Elias, V. y Tesar, B. 1995. Occult precipitation: sampling, chemical analysis and process modelling in the Sumava Mts. (Czech Republic) and in the Taunus Mts. (Germany). *Journal of hydrology* 166: 409-420.

Farías A., Tecklin D. y WWF Chile 2003. Caracterización preliminar de los predios Chaihuín-Venecia, cordillera de la Costa décima región. Valdivia, WWF Chile Documento N°6 (Serie de Publicaciones).

Farquhar. G. D; Sharkey. T. D, (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 317 -345.

Fetene, M.; Beck, E. H. 2004. Water relations of indigenous versus exotic tree species, growing at the same site in a tropical montane forest in southern Ethiopia. *Trees*. 18(4): 428-435.

Gao, Q.; Zhao, P.; Zeng, X.; Cai, X. y Shen, W. 2002. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell and Environment* 25: 1373–1381.

García L.R. 2010. La niebla “alimenta” al Teide. [en línea] La opinión de Tenerife. 10 de Diciembre 2010. <<http://www.laopinion.es/sociedad/2010/12/10/niebla-alimenta-teide/319059.html>> [Consulta 11 Agosto 2014.]

Gerosa, G.; Mereu, S.; Finco, A. y Marzuoli, R. 2012. Stomatal Conductance Modeling to Estimate the Evapotranspiration of Natural and Agricultural Ecosystems. EN: Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling, AYSE IRMAK, INTECH. pp. 403-420.

Hantush. M.M y Kalin. L. Modeling Uncertainty of Runoff and Sediment Yield Using a Distributed Hydrologic Model. EN: The First Interagency Conference on Research in the Watersheds, 27-30 October 2003, Benson.

Huber, A.; Oyarzún, C. y Oñate, M.M. 1986. Factores reguladores de la transpiración potencial de algunas especies arbóreas del bosque siempre verde del sur de Chile. *Turrialba* 36 (3): 329-336.

Huber, A.; Iroumé, A.; Mohr, C. y; Frêne C. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque* 31(3): 219-230.

Hunt, E.R.; Running, W.S. y Federer, C.A. 1991. Extrapolating plant water flow resistances and capacitances to regional scales. *Agricultural and Forest Meteorology* 54: 169-195.

INTA 2010. Manual de Procedimientos de Análisis Físico de Suelos [en línea] <http://inta.gob.ar/documentos/manual-de-procedimientos-de-analisis-fisicos-de-los-suelos/at_multi_download/file/Protocolo_de_Analisis_Fisicos.pdf ar>

Iroumé, A. y Huber, A. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Gouglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Processes* 16(12): 2347-2361.

Iroume, A. y Huber, A. 2000. Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1): 45-56.

James, S. A. y BELL, D.T. 2000. Leaf orientation, light interception and stomatal conductance of *Eucalyptus globulus* ssp. *Globulus* leaves. *Tree Physiology* 20: 815–823.

Jarvis, P. G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 273(927): 593-610.

Kaufmann, M. R. 1982. Leaf Conductance as a Function of Photosynthetic Photon Fl Density and Absolute Humidity Difference from Leaf to Air. *Plant Physiol.* 69: 1018-1022.

Lara, A.; Soto, D.; Armesto, J.; Donoso, P.; Wernli, C.; Nahuelhual, L., y Squeo F. 2003. Componentes Científicos Claves para una Política Nacional Sobre Usos, Servicios y Conservación de los Bosques Nativos Chilenos. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

Lara, A.; Little, C.; Urrutia R.; Mcphee, J.; Álvarez-Garretón, C.; Oyarzún, C.; Soto, D.; Donoso, P.; Nahuelhual L.; Pino, M. y Arismendi, I. 2009. Assesment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forest in Chile. *Forest Ecology and Management* 258: 415-424.

Lara, A.; Reyes, R y Urrutia, R. 2009. Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile 2008. Santiago, Chile. Universidad de Chile pp 126-171.

Leung, R. y Wigmosta, M. 1999. Potential climate change impacts on mountain watersheds in the pacific northwest. *Journal of the american water resources association* 35(6): 1463-1471.

La Marche, J y Lettenmaier D. 2001. Effects of forest roads on flood flows in the deschutes river, washington. *Earth Surface Processes and Landforms* 26:115-134.

- Lara, A.; Latorra, P.; Manson, R. y Barrante G. 2013. Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y el Caribe. Valdivia, Chile. Red ProAgua CYTED, Imprenta América. 312 p.
- Little, C.; Lara, A.; McPhee, J. y Urrutia, R. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology* 374: 162–170.
- Little, C. 2011. Rol de los bosques nativos en la oferta del servicio ecosistémico provisión de agua en cuencas forestales del centro-sur de Chile. Tesis doctoral. Valdivia, Universidad Austral de Chile.
- Meyer. P.D; Rockhold. M.L; Gee .G.W, 1997. Uncertainty Analyses of Infiltration and Subsurface Flow and Transport for SDMP Sites. Washington, DC. U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington.
- Nizinski, J. J.; Morand, D.; Loumeto, J. J.; Luong-Galat, A. y Galat, G. 2008. Bilan hydrique compare d'une savane et d'une plantation d'eucalyptus dans le basin du kouilou (Republique Populaire du congo). *Climatologie* 5: 99-112.
- Oren, R.; Sperry, J. S.; Katul, G. G.; Pataki, D. E.; Ewers, B. E.; Phillips, N. y Schäfer, K. V. R. 1999. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant, Cell and Environment* 22(12) : 1515–1526.
- Oyarzún, C.; Godoy, R.; Schrijver, A.; Staelens, J. y Lust, N. 2004. Water chemistry and nutrient budgets in an undisturbed evergreen rainforest of Southern Chile. *Biogeochemistry* 71: 107-123.
- Oyarzún, C. E.; Frêne, C.; Lacrampe, G.; Huber, A. y Hervé, P. 2011. Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos micros cuencas de la cordillera de la costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque* 32(1): 10-19.
- Pérard, S. 2011. Cuantificación de la precipitación horizontal en el bosque latifoliado maduro del Cerro Uyuca. Proyecto de título de Ingeniero en desarrollo socioeconómico y ambiente. Honduras, Universidad Zamorano.
- Richard, H.; Zachary, K. y Gillian C. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* 11(6): 597–602.
- Roberts, J. (2000) The influence of physical and physiological characteristics of vegetation on their hydrological response. *Hydrological Processes* 14: 2885 – 2901
- Santelices .R, (2005). Desarrollo de una plantación de *Eucalyptus globulus* establecida en primavera con diferentes tratamientos de riego. *Bosque* 26(3): 105-112.
- Schlatter, J. E. 1977. La relación entre el suelo y plantaciones de *Pinus radiata* en Chile Central: análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo. *Bosque* 2(1). 12-31.

Schlatter, J.; Grez, R.; Gerding, V. 2003. Manual para el reconocimiento de Suelos. Valdivia, U. Austral de Chile.

Sheeran K. 2006. Forest conservation in the Philippines: A cost-effective approach to mitigating climate change? *Ecological Economics* 58(2): 338- 349.

Streck, N. A. 2003. Stomatal response to water vapor pressure deficit: An unsolved issue. *Current Agricultural Science and Technology* 9(4): 317-322.

Torres, C.; Etchevers, J.; Fuentes, M.; Govaerts, B.; De León, F. y Herrera, J. M. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana* 31(1):71-84.

VanShaar, J.R.; Haddeland, I.; Lettenmaier, D.P. 2002. Effects of land-cover changes on the hydrological response of interior Columbia River basin forested catchments. *Hydrological Processes* 16: 2499– 2520.

Waichler, S.; Wemple, B. y Wigmosta, M. 2005. Simulation of water balance and forest treatment effects at the H.J. Andrews experimental forest. *Hydrological Processes* 19: 3177-3199.

Wigmosta, M.S.; Vail, L.W.; Lettenmaier, D.P. 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water resources research* 30(6): 1665-1679.

ANEXO

A1. Ecuaciones del modelo

El balance global de agua de cada celda es el siguiente:

$$\Delta S_{S1} + \Delta S_{S2} + \Delta S_{io} + \Delta S_{iu} + \Delta W = P - E_{io} - E_{iu} - E_s - E_{to} - E_{tu} - P_2 \quad (6)$$

Donde ΔS es el cambio en el almacenamiento de las distintas capas de suelo ($S1$ y $S2$) y de las distintas capas de vegetación (dosel “ o ” o sotobosque “ u ”) producto de la interceptación i . ΔW es la variación en el almacenamiento de nieve, P es la precipitación (líquida o sólida), P_2 es el agua percolada hacia estratos inferiores, E_s es la evaporación del suelo, E_{io} , E_{iu} , E_{to} y E_{tu} son los flujos de vapor de agua desde las diferentes capas vegetales (dosel “ o ” o sotobosque “ u ”) producto de la transpiración (t) o de la evaporación (i).

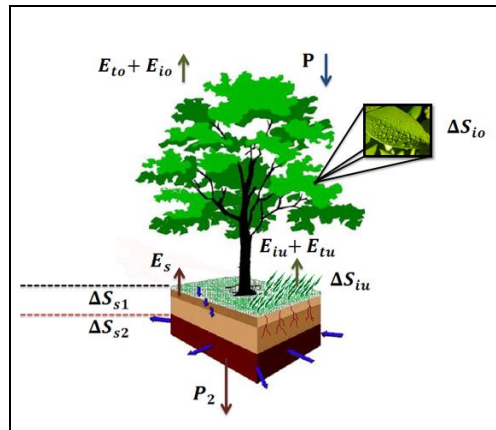


Figura A1.1: Esquema de interacción Suelo-Vegetación, modelo DHSVM (Fuente: Wigmosta et al., 1994).

A continuación se muestran los procesos calculados:

Evapotranspiración

Se considera que la precipitación queda interceptada en la superficie de las capas vegetales (dosel y sotobosque) en función de la capacidad de almacenamiento (I_{co} para el dosel y I_{cu} para el sotobosque).

$$I_{co} = 10^{-4} LAI_o F \quad (7)$$

$$I_{cu} = 10^{-4} LAI_u \quad (8)$$

Donde LAI es el índice de área foliar asociada al tipo de vegetación y F es la fracción de área superficial cubierta del dosel. El exceso de agua pasa al suelo directamente, además el modelo no distingue diferencias entre almacenamiento de nieve o agua.

El modelo diferencia la evapotranspiración de superficies mojadas y secas. Para el caso de superficie seca se usa la relación de Penman-monteith para calcular la transpiración.

$$E_{tj} = \frac{\Delta R_{nj} + \frac{\rho c_p (e_s - e)}{r_{aj}}}{\lambda_v \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cj}}{r_{aj}} \right) \right]} dt \quad (9)$$

Donde E_{tj} es la transpiración en el tiempo t para la capa de vegetación j (sotobosque u o dosel o), Δ es la pendiente de la curva temperatura-presión de vapor saturado, R_{nj} es la densidad de radiación, ρ es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire a presión constante, e y e_s son las presiones de vapor y de vapor saturado, r_{aj} es la resistencia aerodinámica al transporte de vapor, λ_v es el calor latente de vaporización del agua, γ es la constante psicométrica, r_{cj} es la resistencia de las hojas al transporte de vapor y el paso de tiempo es dt . Se calculan por separado las variables R_{nj} , r_{aj} y r_{cj} .

La evaporación en las hojas mojadas (E_{pj}) se calcula anulando la resistencia de las hojas al transporte de vapor.

$$E_{pj} = \frac{\Delta R_{nj} + \frac{\rho c_p (e_s - e)}{r_{aj}}}{\lambda_v [\Delta + \gamma]} dt \quad (10)$$

El modelo calcula la evaporación y transpiración de forma independiente para el dosel y el sotobosque. Primero el agua interceptada es evaporada y luego si la hoja está seca se calcula la transpiración, esto se calcula con una aproximación intermedia, permitiendo el cambio de estado dentro del mismo paso de tiempo.

La evaporación del suelo (Ver ecuación 11) se calcula tomando el mínimo entre la evapotranspiración potencial para el suelo E_{ps} calculada con la ecuación (10) y el volumen de agua ascendente F_e se calcula utilizando el método presentado en Entekhabi et al. (1989).

$$E_s = \min(E_{ps}, F_e) \quad (11)$$

La resistencia aerodinámica r_a se calcula independientemente para el dosel y el sotobosque. Se utiliza un perfil logarítmico para evaluar el viento a diferentes alturas.

La resistencia de las hojas al transporte de agua r_c se calcula separadamente entre el dosel y el sotobosque y depende de las características de la vegetación. Este parámetro se representa como la suma de la resistencia estomática (r_s) proyectada de las hojas. La resistencia estomática depende de cuatro factores limitantes: la temperatura del aire, el déficit de presión de vapor, la radiación PAR y la humedad del suelo.

Radiación de onda corta

El balance radiativo incorpora el albedo de cada vegetación calculando las interacciones entre la radiación solar, la de las diferentes capas de vegetación de manera independiente y a la vez relaciones entre estas últimas con el suelo. Se consideran, dadas las condiciones de este estudio las ecuaciones sin presencia de nieve.

El balance para el dosel es el siguiente:

$$R_{so} = R_s[(1 - a_o) - \tau_o(1 - a_u)]F \quad (12)$$

Donde R_{so} es la radiación de onda corta absorbida por el dosel, R_s es la radiación de onda corta incidente, a_o es el albedo del dosel, τ_o es la transmisividades del dosel hacia abajo y F es la fracción cubierta por el dosel.

$$\tau_o = \exp(-kLAI_0) \quad (13)$$

Donde k es el coeficiente de atenuación del dosel.

Para el sotobosque la relación es atenuada:

$$R_{su} = R_s[(1 - a_u) - \tau_u(1 - a_g)][\tau_o F + [1 - F]] \quad (14)$$

Donde R_{su} es la radiación de onda corta absorbida por el sotobosque, a_u es el albedo del sotobosque, τ_u es la transmisividades del sotobosque al suelo y a_g es el albedo del suelo.

Para el suelo se tiene lo siguiente:

$$R_{sg} = R_s \tau_u (1 - a_g) [[1 - F] + \tau_o F] \quad (15)$$

Escurrimiento no saturado y saturado subterráneo

El modelo hace diferencia entre el escurrimiento no saturado y saturado. El supuesto es que el agua fluye superficialmente solo cuando el suelo está saturado.

a) Escurrimiento no saturado

Se hace un balance de masa entre capas d_1 y d_2 que son la capa superficial y la profunda respectivamente asociadas a las zonas de raíces superiores y profundas con la humedad respectiva θ . La percolación P_1 y P_2 asociada a dichas capas se calcula usando la relación de Darcy.

$$d_1 \cdot (\theta_1^{t+\Delta t} - \theta_1^t) = P_0 - P_1(\theta_1) - E_{to} - E_{tu} - E_s - V_{sat} - V_r \quad (16)$$

$$d_2 \cdot (\theta_2^{t+\Delta t} - \theta_2^t) = P_1(\theta_1) - P_2(\theta_2) - E_{to} + V_{sat} \quad (17)$$

Donde $\theta_i^{t+\Delta t} - \theta_i^t$ es la diferencia de humedad con el paso de tiempo para la capa de suelo i , P_0 es el agua proveniente de la lluvia, E_s es la evaporación del suelo, V_{sat} es el volumen de agua

proveniente de un nivel freático superior a la profundidad de la capa de suelo, V es el exceso de agua ante una subida del nivel freático por sobre la superficie.

b) Escurrimiento saturado

Todo exceso de agua se convierte en flujo en una de las 8 direcciones. Para una celda i, j se tiene que el caudal la dirección k se calcula como se muestra en la ecuación (18).

$$q(t)_{i,j,k} = T(t)_{i,j} \beta_{i,j,k} w_k \quad (18)$$

Donde T_{ij} es la transmisividad de la celda i, j y $\beta_{i,j,k}$ es la pendiente de la celda i, j en dirección k y w_k es el ancho del flujo en la dirección k .

La transmisividad $T_{i,j}$ se calcula utilizando la relación presentada en Beven (1982).

A2. Mapas de profundidad de suelo

Mapas de profundidad de suelo

Se muestran en esta sección los mapas de profundidad de suelo generados por el programa createstreamnetwork.aml provisto con los archivos del modelo DHSVM.

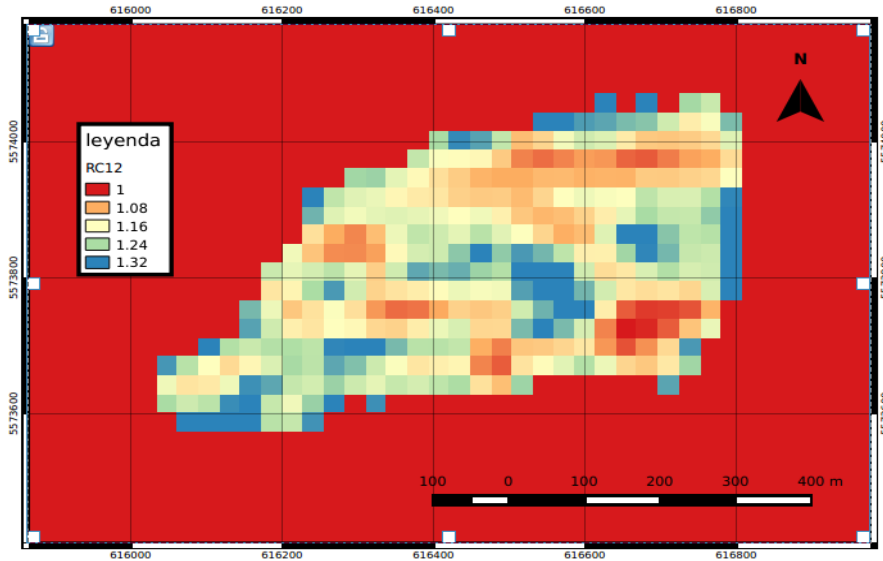


Figura A2.1: Mapa de profundidad de suelos cuenca RC12.

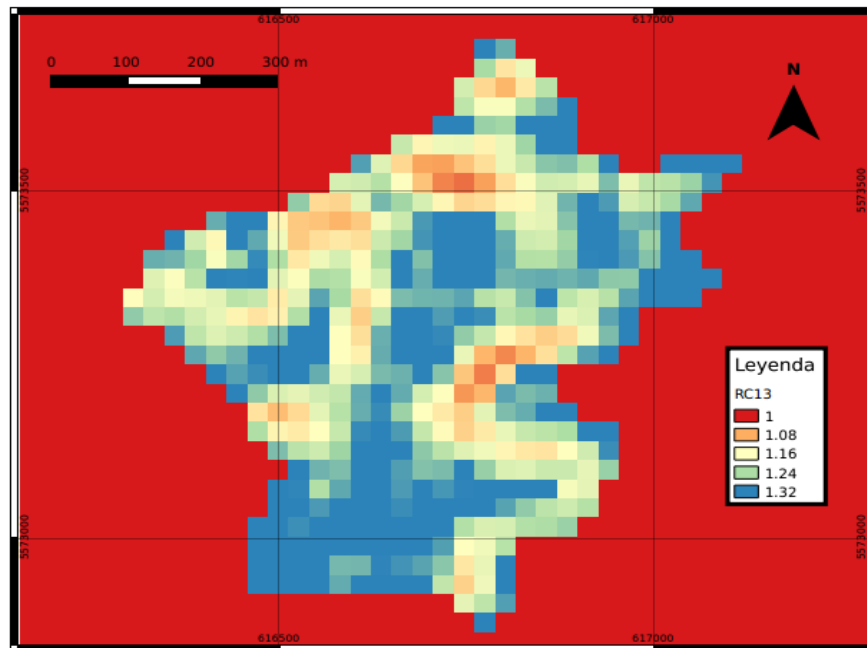


Figura A2.2: Mapa de profundidad de suelos cuenca RC13 .

Dirección de flujo

Se muestra en esta sección el mapa de direcciones de flujo generados en QGIS con el módulo GRASS y su herramienta r.watershed.

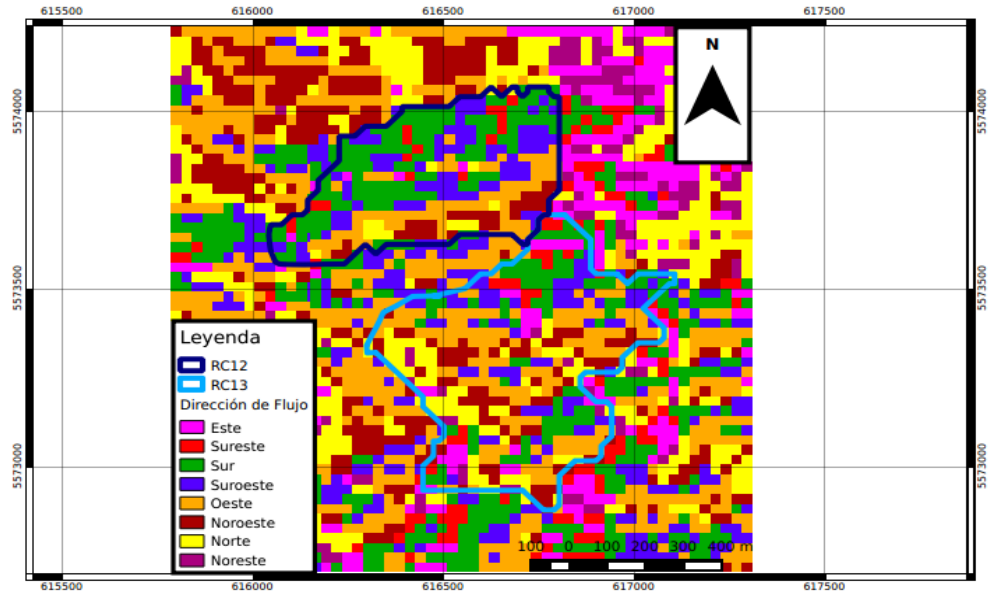


Figura A2.3: Mapa de dirección de flujo de las cuencas.