

Proyecto ALI_1_2011_1_2349

“Red de microcuencas
experimentales para la
obtención de indicadores
hidrológicos y edáficos en
plantaciones forestales”



Alianzas

Informe Final

Marzo 2016

EQUIPO TÉCNICO

Facultad de Ingeniería

Ing. Luis Silveira, Ph.D.
Ing. M.Sc. Jimena Alonso
Dr. Ing. Christian Chreties

Facultad de Agronomía

Ing. Agr. Carlos Mantero
Ing. Agr. M.Sc Leticia Martinez
Ing. Agr. M.Sc Carolina Munka
Ing. Agr. M.Sc Guillermo Morás

Facultad de Ciencias (CURE)

Lic. Mariana Meerhoff, Ph.D.
Dr. Franco Teixeira de Mello
Lic. Claudia Simón
Lic. Claudia Fosalba

Regional Norte - Departamento del Agua

Dr. Ing. Pablo Gamazo

Fundación Julio Ricaldoni

Lic. Gabriel Perazza
Ing. Agustín Menta
Bach. Gonzalo Rodriguez

FORESTAL ORIENTAL S.A

Ing. Agr. Ricardo Methol
Ing. Agr. M.Sc Iván Grela
Ing. Agr. Ana de Armas

MONTES DEL PLATA

Ing. Agr. Martim Terra
Ing. Agr. María Noel Fadel
Ing. Agr. Rosario Moreira

Índice General

PREFACIO.....	13
AGRADECIMIENTOS.....	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
1.INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 MARCO TEÓRICO.....	17
1.2 ANTECEDENTES	19
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.4 ÁREA DE ESTUDIO	22
1.4.1 <i>Microcuencas Don Tomás y La Cantera</i>	22
1.4.2 <i>Microcuencas La Nueva Esperanza</i>	25
2.CANTIDAD DE AGUA – METODOLOGÍA.....	27
2.1 PROTOCOLOS DE MONITOREO.....	27
2.1.1 <i>Precipitación y variables meteorológicas</i>	27
2.1.2 <i>Escurrimiento</i>	28
2.1.3 <i>Intercepción</i>	30
2.1.4 <i>Agua en el suelo</i>	32
2.1.5 <i>Propiedades hidráulicas del suelo</i>	33
2.1.6 <i>Niveles piezométricos</i>	33
2.2 INDICADORES HIDROLÓGICOS.....	34
2.3 MONITOREO Y RELEVAMIENTO DE DATOS	37
2.3.1 <i>Información de campo disponible</i>	37
2.4 DINÁMICA DEL AGUA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA	41
2.4.1 <i>Caracterización de la cobertura vegetal</i>	41
2.4.2 <i>Contenido de agua en el suelo</i>	42
2.4.3 <i>Balance hídrico de Thornthwaite y Mather</i>	44
2.5 BALANCE HÍDRICO Y RECARGA DE ACUÍFEROS.....	45
2.6 MODELOS HIDROLÓGICOS SIMPLES	47
2.6.1 <i>INTERCEPCIÓN DEL DOSEL FORESTAL</i>	47
2.6.2 <i>Modelo de Zhang</i>	48
2.6.3 <i>MODELO DE TEMEZ</i>	49
2.6.4 <i>Modificación de parámetros hidrológicos</i>	50
2.7 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA	54
3.CANTIDAD DE AGUA - RESULTADOS.....	56
3.1 BALANCE HÍDRICO Y RECARGA.....	56
3.1.1 <i>Balance Hídrico Don Tomás y La Cantera</i>	56
3.1.2 <i>Balance Hídrico La Nueva Esperanza</i>	68
3.2 DINÁMICA DEL AGUA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA ATMÓSFERA	77
3.2.1 <i>Caracterización de la cobertura vegetal</i>	77
3.2.2 <i>Determinación de índice de área foliar (IAF) mediante ceptómetro</i>	79
3.2.3 <i>Contenido de agua en el suelo</i>	80
3.2.4 <i>Balance hídrico de Thornthwaite y Mather</i>	87
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS SIMPLES.....	90
3.3.1 <i>Intercepción del dosel forestal</i>	90

3.3.2	<i>Modelo de Zhang</i>	97
3.3.3	<i>Modelo de Temez</i>	98
3.3.4	<i>Variación del número de curva (NRCS) debido al cambio de uso de suelo entre pasturas naturales y monte forestal.</i>	102
3.3.5	<i>Modelo hidrológico SWAT</i>	111
3.4	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA	117
4.	CALIDAD DE AGUA	118
4.1	RESUMEN DE ACTIVIDADES.....	118
4.2	METODOLOGÍA (ABREVIADA).....	119
4.2.1	<i>Calidad del agua y características del sedimento</i>	119
4.2.2	<i>Macroinvertebrados “potenciales”</i>	120
4.2.3	<i>Descomposición de materia orgánica (hojarasca)</i>	121
4.3	PRINCIPALES RESULTADOS.....	122
4.3.1	<i>Características del agua y del sedimento</i>	122
4.3.2	<i>Comunidad potencial de macroinvertebrados acuáticos</i>	125
4.3.3	<i>Descomposición de Materia Orgánica</i>	128
4.4	CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	132
4.5	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA.....	133
5.	PÉRDIDAS DE SUELOS Y NUTRIENTES	134
5.1	EROSIÓN	134
5.1.1	<i>Estimación con indicador 137Cs</i>	134
5.1.2	<i>Carga de sedimentos en suspensión</i>	141
5.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO	146
5.2.1	<i>Metodología</i>	146
5.2.2	<i>Resultados Preliminares</i>	147
5.3	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA.....	150
6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	151
6.1	DISCUSIÓN	151
6.2	CONCLUSIONES.....	152
6.2.1	<i>Balance hídrico y recarga de acuíferos</i>	152
6.2.2	<i>Dinámica del agua en el sistema suelo-planta atmósfera</i>	153
6.2.3	<i>Intercepción</i>	153
6.2.4	<i>Calidad de aguas</i>	153
6.2.5	<i>Pérdidas de suelos y nutrientes</i>	154
6.2.6	<i>Modelos hidrológicos</i>	154
6.3	FACTORES DE ÉXITO	156
6.4	LECCIONES APRENDIDAS.....	156
ANEXO I:	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN INSTALADOS EN LAS MICROCUENCAS	157
ANEXO II:	INFORMACIÓN MONITOREADA EN LAS MICROCUENCAS	159
ANEXO III:	SALIDAS DE CAMPO 08/2012 – 12/2014	164
ANEXO IV:	TABLAS DE DATOS DE SEDIMENTO Y AGUA	165
ANEXO V:	PUBLICACIONES EN EL MARCO DE LOS PROYECTOS DESARROLLADOS EN ESTA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Efectos de las plantaciones forestales sobre el recurso agua, según el tamaño de la cuenca. Fuente: FAO (2001).....	18
Tabla 1.2 Características físicas de las microcuencas Don Tomás y La Cantera.....	23
Tabla 1.3 Características físicas de las microcuencas de La Nueva Esperanza	25
Tabla 2.1 Información meteorológica e hidrológica disponible en la microcuenca Don Tomás	38
Tabla 2.2 Información meteorológica e hidrológica disponible en la microcuenca La Cantera	39
Tabla 2.3 Información meteorológica e hidrológica disponible en las microcuencas La Nueva Esperanza	40
Tabla 2.4 Parámetros y formulación del modelo de Gash para dosel ralo [adaptado de Gash et al., 1995]	47
Tabla 3.1 Balance hídrico anual (en mm) calculado en las microcuencas DT y LC en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I... 57	57
Tabla 3.2 Balance hídrico estacional (en mm) calculado en las microcuencas DT y LC en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.....	58
Tabla 3.3 Valores del parámetro del filtro digital para la separación del hidrograma, rendimiento específico, y flujo base y descarga media estacional.....	65
Tabla 3.4 Balance anual (en mm) calculado en la microcuenca LC sin considerar aportes externos, donde P es la precipitación incidente, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento del acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, $Q_{s,base}$ el flujo base medido, GW_{lat} el aporte externo, ET la evapotranspiración, y Q_s el caudal específico a la salida de la microcuenca.....	67
Tabla 3.5 Balance hídrico anual (en mm) calculado en las microcuencas LNE en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de evaporación del suelo y transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.....	69

Tabla 3.6 Balance hídrico estacional (en mm) calculado en las microcuencas LNE en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rech} la recarga de aguas subterráneas y GW_{disch} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I... 70

Tabla 3.7 Índice de área foliar (IAF) promedio para el sitio experimental Nueva Esperanza del período diciembre 2013 – setiembre 2015. Se presenta el valor medio \pm desviación estándar..... 79

Tabla 3.8 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 31 mm 85

Tabla 3.9 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 33,2 mm 85

Tabla 3.10 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 18 mm 86

Tabla 3.11 Balance hídrico (T&M): sitio Don Tomás, período enero 2012-setiembre 2015. Resultados de almacenaje de agua en el suelo (Alm), evapotranspiración real (ETR), deficiencias hídricas (D) y excesos hídricos (E). 87

Tabla 3.12 Balance hídrico (T&M): sitio Nueva Esperanza, período enero 2012-setiembre 2015. Resultados de almacenaje de agua en el suelo (Alm), evapotranspiración real (ETR), deficiencias hídricas (D) y excesos hídricos (E). 88

Tabla 3.13 Deficiencia de evapotranspiración relativa: sitios Don Tomás y Nueva Esperanza, período enero 2012-a setiembre 2015. 88

Tabla 3.14 Redistribución de la precipitación según edad en Don Tomás 90

Tabla 3.15 Tasas medias de precipitación para la aplicación del modelo de Gash 95

Tabla 3.16 Tasas medias de evapotranspiración de agua libre para la aplicación del modelo de Gash 95

Tabla 3.17 Interceptación mensual simulada con el modelo de Gash..... 96

Tabla 3.18 Valores de los parámetros calibrados del modelo de Temez (tomados de (MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011)..... 98

Tabla 3.19 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros regionales..... 98

Tabla 3.20 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros locales en cuencas de pastura 98

Tabla 3.21 Parámetros locales del modelo de Temez en cuencas de pastura 98

Tabla 3.22 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros regionales en cuencas forestadas 100

Tabla 3.23 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca La Cantera (pasturas naturales).....	102
Tabla 3.24 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca Don Tomás (monte forestal)	103
Tabla 3.25 Parámetros estadísticos básicos de los resultados del CN para La Cantera y Don Tomás.	104
Tabla 3.26 Resumen de CN característicos obtenidos mediante NRCS y el método asintótico Hawkins.....	106
Tabla 3.27 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca con cobertura pasturas naturales- (La Nueva Esperanza)	107
Tabla 3.28 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca con cobertura monte forestal- (La Nueva Esperanza)	108
Tabla 3.29 Parámetros estadísticos básicos de los resultados del CN para las cuencas de La Nueva Esperanza.	108
Tabla 3.30 Información de base y resultados para generación de los HRUs de las cuencas.....	111
Tabla 3.31 Descripción de los parámetros de ajuste del modelo SWAT junto con los rangos de variación inicial para cada uno, y el rango absoluto válido para el modelo.....	113
Tabla 3.32 Ajuste de simulación diaria del modelo SWAT	114
Tabla 3.33 Ajuste de simulación mensual del modelo SWAT.....	115
Tabla 4.1 Valores promedio de concentración de nutrientes totales y disueltos, características físico-químicas, y concentraciones de cationes, sulfatos y cloruros en los cuatro arroyos estudiados (medias de cada muestreo por arroyo, promediadas posteriormente a lo largo del período julio 2013-octubre 2015).	123
Tabla 4.2 Ocurrencia de distintos grupos taxonómicos de invertebrados eclosionados de los sedimentos a lo largo del experimento (días 4, 12 y 18 posteriores a la re inmersión en agua). ...	127
Tabla 4.3 Macroinvertebrados encontrados a lo largo de los experimentos de descomposición de materia orgánica y por lo tanto, presentes en los arroyos respectivos.	130
Tabla 5.1 Medidas resumen de las 106 muestras relevadas de actividad de Cesio-137 (en Becquerels) para los tres grupos, muestras pertenecientes a la fila, entre fila y tomadas en zonas de campo despejadas.....	137
Tabla 5.2 Valores de Kg de suelo/ha para cada año utilizando intervalos de confianza al 95%....	144
Tabla 5.3 Caracterización química pre y pos cosecha del suelo, bajo cobertura forestal, a diferentes profundidades en el horizonte superficial para los Sitios 1 (ladera alta) y 3 (ladera baja).....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución de la superficie forestada en el Uruguay (1975-2010).....	17
Figura 1.3 Localización de las subcuencas Don Tomás y La Cantera	22
Figura 1.4 Localización de los instrumentos de medida en las microcuencas Don Tomás y La Cantera	24
Figura 1.5 Fotografías de algunos equipos e instalaciones en las microcuencas Don Tomás y La Cantera.....	24
Figura 1.6 Localización de las subcuencas de La Nueva Esperanza	25
Figura 1.7 Fotografías de algunos equipos e instalaciones en las microcuencas de LNE	26
Figura 2.1 Ejemplo de canaleta para recolección de precipitación directa	30
Figura 2.2 Detalle de canaleta de sección parabólica	30
Figura 2.3 Ejemplo de collarín para recolección del escurrimiento fustal.	31
Figura 2.4 Ejemplo de tanques para recolección y registro del volumen escurrido.	31
Figura 2.5 Ejemplo de collarín para recolección del escurrimiento fustal	31
Figura 2.6 Ejemplo de registrador (logger) independiente.....	31
Figura 2.7 Mapa de Ubicación de parcelas La Nueva Esperanza	41
Figura 2.8 Detalle de la instalación de los sensores de humedad en el suelo en la microcuenca forestada Don Tomas	43
Figura 2.9 Sensores de registro continuo de humedad de suelo.....	43
Figura 2.10 Esquema matemático del modelo de Temez.	50
Figura 3.1 Correlación entre datos mensuales de precipitación medida en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)	56
Figura 3.2 Correlación entre datos mensuales de precipitación y caudal específico medidos en la microcuenca La Cantera (LC).....	59
Figura 3.3 Correlación entre datos mensuales de caudales específicos medidos en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)	59
Figura 3.4 Relación entre la precipitación estacional (primavera y verano) y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la interceptación (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales).....	60
Figura 3.5 Relación entre la precipitación estacional (otoño e invierno) y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la interceptación (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales).....	61
Figura 3.6 Relación entre la precipitación anual y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la interceptación (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales).....	62

Figura 3.7 Diferencia estacional entre la evapotranspiración real entre plantación forestal y pasturas naturales, expresada como porcentaje de la precipitación estacional	63
Figura 3.8 Diferencia anual entre la evapotranspiración real entre plantación forestal y pasturas naturales, expresada como porcentaje de la precipitación anual	63
Figura 3.9 Comparación entre las curvas de Zhang et al. (1999, 2001) y los valores de evapotranspiración real anual registrados entre Oct 2006 y Set 2014 en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)	64
Figura 3.10 Separación del hidrograma aplicando el filtro digital de un parámetro.....	65
Figura 3.11 Flujo base estacional y descarga del acuífero. El coeficiente de almacenamiento específico, S_y , se calibra para obtener el mismo valor medio para el flujo base y la descarga del acuífero.	66
Figura 3.12 Correlación entre datos mensuales de precipitación registrados en, arriba DT y LNE, abajo LC y LNE.....	71
Figura 3.13 Correlación caudal – caudal en el período pre-plantación, Ene 2008 – Mar 2011, en LNE. La denominación $Q_{forestal}$ refiere a la microcuenca que fue plantada a partir de Abr 2011	72
Figura 3.14 Correlación caudal – caudal en el período pos-plantación, Abr 2011 – Set 2015, en LNE, y comparación con la relación pre-plantación	72
Figura 3.15 Correlación precipitación – caudal en la microcuenca cubierta por pasturas naturales, correspondiente al período Abr 2008 – Set 2015.....	73
Figura 3.16 Reducción del caudal específico expresada como porcentaje de la lluvia acumulada estacionalmente.....	74
Figura 3.17 Reducción del caudal específico expresada como porcentaje de la lluvia acumulada estacionalmente, distinguiendo entre meses de otoño-invierno (arriba) y primavera-verano (abajo)	75
Figura 3.18 Reducción del caudal específico anual, expresado como porcentaje de la correspondiente lluvia anual	75
Figura 3.19 Diferencia en la evapotranspiración real entre forestación y pasturas en LNE, expresada como % de la precipitación estacional	76
Figura 3.20 Comparación entre las curvas de Zhang et al. (1999, 2001) y los valores de evapotranspiración real anual registrados entre Oct 2012 y Set 2015 en las microcuencas LNE ...	76
Figura 3.21 Evolución de la densidad promedio en LNE.....	77
Figura 3.22 Evolución de diámetro y altura promedio en LNE.....	77
Figura 3.23 Evolución del volumen en LNE	78
Figura 3.24 Curvas de calibración para cada una de las profundidades del suelo tipo en el establecimiento La Nueva Esperanza.....	81

Figura 3.25 Contenido de agua en el suelo (en 80 cm de profundidad) y precipitaciones diarias registradas en la microcuenca Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura) durante el período 21/9/2013 – 30/9/2015. CC (Capacidad de Campo) y PMP (Punto de Marchitez Permanente) en mm/80 cm.....	82
Figura 3.26 Contenido de agua disponible promedio mensual en el suelo (en 80 cm de profundidad) y precipitaciones mensuales registradas en la microcuenca Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura) durante el período octubre 2013 – setiembre/2015.....	83
Figura 3.27 Contenido de agua en el suelo (en 65 cm de profundidad) y precipitaciones registradas en la microcuencas forestal y de pastura en el predio La Nueva Esperanza 20/9/2013 – 30/9/2015. CC (Capacidad de Campo) y PMP (Punto de Marchitez Permanente) en mm/80 cm.	84
Figura 3.28 Contenido de agua disponible promedio mensual en el suelo (en 65 cm de profundidad) y precipitaciones mensuales registradas en las microcuencas forestal y de pasturas en La Nueva Esperanza durante el período octubre 2013 – setiembre/2015.	84
Figura 3.29 Distribución de frecuencia de las eventos de precipitación en DT	90
Figura 3.30 Variación de la intercepción con la precipitación incidente a nivel diario (Don Tomás).	91
Figura 3.31 Relación Intercepción – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE	92
Figura 3.32 Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios en DT....	92
Figura 3.33 Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE .	93
Figura 3.34 Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios en DT .	93
Figura 3.35 Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE	94
Figura 3.36 Intercepción observada e intercepción simulada acumuladas en el período de validación	96
Figura 3.37 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca La Cantera.....	99
Figura 3.38 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE pastura.....	99
Figura 3.39 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE forestal (pre plantación)	100
Figura 3.40 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca DT	101
Figura 3.41 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE forestal (posplantación).....	101
Figura 3.42 Relación $CN=f(P)$, ajuste potencial (línea llena), cuenca La Cantera (pasturas naturales)	104
Figura 3.43 Relación $CN=f(P)$, ajuste exponencial (línea llena), cuenca La Cantera (pasturas naturales).....	105
Figura 3.44 Relación $CN=f(P)$, ajuste potencial (línea llena), cuenca Don Tomás (monte forestal)	105

Figura 3.45 Relación $CN=f(P)$, ajuste exponencial (línea llena), cuenca Don Tomás (monte forestal)	105
Figura 3.46 Variación del número de curva con el porcentaje de cobertura forestal para diferentes especies reportadas en Estados Unidos (NRCS). Se agrega el resultado obtenido en las cuencas La Cantera (cobertura forestal 0%) y Don Tomás (cobertura forestal 60%) como “Eucaliptus”.	107
Figura 3.47 Relación $CN=f(P)$, cuenca pasturas naturales (LNE)	109
Figura 3.48 Relación $CN=f(P)$, cuenca monte forestal (LNE). Círculos blancos período pre-forestación, cuadrados negros período forestado.	109
Figura 3.49 Subcuencas del modelo SWAT para La Cantera	112
Figura 3.50 Subcuencas del modelo SWAT para Don Tomás	112
Figura 3.51 Subcuencas del modelo SWAT para LNE_pasturas	112
Figura 3.52 Subcuencas del modelo SWAT para LNE_forestal	112
Figura 3.53 Ajuste del modelo SWAT en la microcuenca La Cantera	114
Figura 3.54 Ajuste del modelo SWAT en la microcuenca Don Tomás	115
Figura 4.1 Diseño de la colecta de muestras de sedimentos en zona aldeaña (zona inundable) a los arroyos para análisis de características de los sedimentos y realización de los experimentos de eclosión de estructuras de resistencia de macroinvertebrados bentónicos.	119
Figura 4.2 Experimentos de laboratorio, eclosión de estructuras de resistencia de organismos macroinvertebrados a partir de sedimentos de las zonas inundables aldeañas a los cauces de los arroyos estudiados.	120
Figura 4.3 Fotografía de los experimentos de descomposición de materia orgánica.	121
Figura 4.4 Concentración de Fósforo Total en agua en ambos pares de microcuencas, a lo largo del período de estudio (julio 2013-julio 2015). Los datos representan el promedio de las tres estaciones de muestreo por fecha y su correspondiente desvío estándar.	122
Figura 4.5 Concentración de Nitrógeno Total en el agua en ambos pares de microcuencas, a lo largo del período de estudio (julio 2013-julio 2015). Los datos representan el promedio de las tres estaciones de muestreo por fecha y su correspondiente desvío estándar.	123
Figura 4.6 Características de los sedimentos en la planicie de inundación de los cuatro arroyos estudiados (indicando en verde los forestados). Los datos muestran la media (punto), mediana (línea horizontal) y rango de 10 réplicas para cada arroyo.	124
Figura 4.7 Abundancia de organismos de los distintos grupos taxonómicos eclosionados durante las distintas etapas del experimento de laboratorio, en los cuatro arroyos.	126
Figura 4.8 Pérdida de biomasa (descomposición de segmentos) de <i>Schoenoplectus californicus</i> a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.	128

Figura 4.9 Pérdida de biomasa (descomposición de hojas) de Eucaliptus globulus a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.	129
Figura 4.10 Variación temporal de la composición taxonómica relativa de la comunidad de macroinvertebrados asociados al proceso de descomposición de S. californicus a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.	130
Figura 5.1 Grillas para el muestreo de 137Cs en la cuenca Don Tomás.....	135
Figura 5.2 Gráfico de burbujas para Cesio-137(Bq) según la posición espacial del sitio de muestreo. La burbuja es proporcional a la actividad de cesio medida en Bq registrada en el punto menos el valor de referencia.....	138
Figura 5.3 Semivariograma empírico para Cesio-137 utilizando puntos de ambas grillas para el ajuste.....	139
Figura 5.4 Gráfico de burbujas para Cesio-137(Bq) menos el valor de referencia en la grilla grande. A la izquierda tenemos lugares con cobertura solo de pastura o campo, al centro solo valores de la entrefila, y a la derecha valores para la fila.	139
Figura 5.5 Muestreador automático de agua modelo ISCO 6712 ubicado en Don Tomas.	142
Figura 5.6 Muestreador automático de agua modelo ISCO 6712 ubicado en LNE-forestal.	142
Figura 5.7 Gráfico de sólidos suspendidos totales en función de los caudales medidos con un ajuste lineal, arriba en la cuenca de Don Tomás.....	143
Figura 5.8 Gráfico de sólidos suspendidos totales en función de los caudales medidos con un ajuste lineal, arriba en la cuenca de LNE_forestal.....	143
Figura 5.9 Ajuste potencial para la relación SST-Q indicado con los puntos rojos. En negro se encuentran los valores observados para Don Tomás	145
Figura 5.10 Ajuste potencial para la relación SST-Q indicado con los puntos rojos. En negro se encuentran los valores observados para LNE_forestal	145
Figura 5.11 Ubicación de los sitios de muestreo de suelos pre y pos cosecha en la microcuenca forestada (Don Tomás).....	146

PREFACIO

El proyecto ANII ALI_1_2011_1_2349 “Red de microcuencas experimentales para la obtención de indicadores hidrológicos y edáficos en plantaciones forestales”, ejecutado entre el 7/Ago/2012 y el 31/Dic/2015, ha sido cofinanciado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), en el marco del programa Alianzas para la Innovación, y las empresas forestales Montes del Plata (MdP) y UPM Forestal Oriental (UPM FO). La ejecución científica ha estado a cargo del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), de la Facultad de Ingeniería, y el Departamento de Suelos y Aguas, de la Facultad de Agronomía, de la Universidad de la República. Posteriormente a su aprobación por parte de la ANII, se incorporó al proyecto el Departamento de Ecología y Rehabilitación de Sistemas Acuáticos, del Centro Universitario Regional Este (CURE), de la Facultad de Ciencias, aportando nuevos indicadores no considerados en la formulación inicial.

El proyecto es parte de una línea de investigación de la Universidad de la República, que tiene por objetivo crear conocimiento nacional en relación a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos, con el apoyo de las instituciones estatales y de las propias empresas forestales. Los estudios específicos tienen por objetivo cuantificar los impactos de la actividad forestal sobre el ciclo hidrológico y los suelos dominantes en que se ubican las plantaciones, tomando como patrón de comparación el campo natural para uso ganadero.

En estos tres años se ha avanzado en la conformación de una red nacional de microcuencas experimentales en la zona litoral del país, en el desarrollo de protocolos de monitoreo y la definición de indicadores hidrológicos y edáficos, como herramienta para la gestión forestal sustentable y la toma de decisiones por parte de las empresas y las autoridades nacionales competentes.

El Informe Final consta de un capítulo introductorio, seguido de los avances tecnológicos, estructurados en tres capítulos: 2. Aguas – Cantidad, 3. Aguas – Calidad y 4. Pérdida de suelos y nutrientes. El capítulo 5 resume los principales resultados, plasmados en los indicadores hidrológicos y edáficos, y sus rangos de variación. El informe concluye con una discusión y conclusiones producto de 10 años de monitoreo en estas microcuencas y plantea líneas de trabajo futuras atendiendo a las inquietudes de las autoridades nacionales responsables del contralor de los recursos naturales. En los anexos se incluyen publicaciones generadas, reportes de salidas de campo e información de interés no volcada en el texto principal.

Luis Silveira
Responsable Científico

AGRADECIMIENTOS

La línea de investigación vinculada a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos, comenzó a fines del año 1998, por iniciativa de la Dirección General Forestal, del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Posteriormente, se mantuvo con el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República. El monitoreo de las microcuencas, que constituyen la base para el presente estudio, se inició en el año 2006, con financiamiento del Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), se continuó con el apoyo del programa FPTA del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y en estos tres últimos años con el cofinanciamiento del Programa Alianzas para Innovación de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y las empresas forestales Montes del Plata (Mdp) y UPM Forestal Oriental. Los autores agradecen a las autoridades y funcionarios de las instituciones mencionadas por su apoyo y colaboración durante estos diecisiete años.

Nuestro agradecimiento también a los productores y empresas forestales que a lo largo de este tiempo han colaborado con esta investigación cediendo sus predios para la instalación del instrumental e infraestructura necesarios y adaptando sus planes de cosecha y plantación de acuerdo a las necesidades de éste programa, y cofinanciando los estudios.

Finalmente agradecemos la participación y constante colaboración en esta línea de investigación de los colegas de la Universidad Austral de Chile.

RESUMEN

Uruguay ha estimulado el desarrollo del sector forestal desde la promulgación de la Ley Forestal Nº 15.939, en diciembre de 1987. Sin embargo, la sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales para uso industrial ha causado preocupación en la sociedad, principalmente en relación a procesos hidrológicos, como el consumo de agua a través de la evapotranspiración y la recarga de las aguas subterráneas, y sus efectos sobre la calidad de las aguas, pérdida de suelos y nutrientes. El propósito de este estudio es evaluar los efectos de este cambio de uso de los suelos sobre los recursos naturales aguas, en cantidad y calidad, y suelos. Los datos de entrada fueron monitoreados en dos pares de microcuencas experimentales de 100-200 ha (Don Tomas, DT, y La Cantera, LC) y 10-20 ha (La Nueva Esperanza, LNE) ubicadas en la zona litoral oeste de Uruguay. Las microcuencas forestales constan de plantaciones de *Eucalyptus Globulus ssp. maidenii* y en las microcuencas de referencia la vegetación predominante se caracteriza por pastizales naturales para uso ganadero. Los principales datos medidos fueron precipitación incidente, variables meteorológicas, caudal, redistribución de lluvias, contenido de humedad del suelo, niveles freáticos, parámetros físico-químicos (iones mayoritarios, nutrientes, sólidos), comunidades de macroinvertebrados potenciales, tasa de descomposición de materia orgánica, erosión de suelo con base en el indicador Cs137 y carga de sedimentos en suspensión. El balance hídrico estacional y anual se calculó en DT y LC desde octubre de 2006 a septiembre de 2014, para evaluar los cambios en los procesos hidrológicos. La recarga de acuíferos se estimó a partir de la contribución de las fluctuaciones del nivel freático y de la contribución de las aguas subterráneas al flujo base. Los datos muestran una disminución del caudal específico anual de alrededor del 17% en los años hidrológicos medios y ningún efecto concluyente sobre la recarga anual de las aguas subterráneas en la microcuenca forestal, tomando como patrón de comparación la microcuenca cubierta por pastizales naturales. La reducción del caudal específico anual es equivalente a la interceptación media anual. La evapotranspiración anual real es consistente con los resultados basados en monitoreo de cuencas a escala mundial. Las tasas de reducción son variables según la temporada, la precipitación acumulada y su distribución temporal. La reducción del caudal específico fue particularmente alta en otoños e inviernos secos - 32 a 28% - en que la precipitación estacional varió entre 275 y 400 mm, respectivamente. Estos resultados son relevantes para la gestión de los recursos hídricos, ya que puede afectar los usos del agua aguas abajo. La medición del balance hídrico en LNE se inició en 2008, con un período de calibración hasta 2011, abarcando un período relativamente corto pos-plantación, 7 semestres después del primer año pos-plantación, en que comienza a observarse una afectación del recurso hídrico. La reducción del caudal específico varió entre 10 a 25 % de la precipitación acumulada estacionalmente, correspondiendo el porcentaje más elevado a estaciones con déficit hídrico. Tratándose de una plantación joven, parte de esta reducción probablemente se deba a efectos de laboreo en la fase de plantación. La evapotranspiración real muestra un ajuste aceptable con las curvas desarrolladas por Zhang para pasturas naturales, mientras que en la microcuenca forestal es próxima, pero inferior a dicha curva, debido a similares razones (plantación joven, con un dosel en desarrollo). En cuanto a la calidad del agua de los arroyos estudiados no se encontraron patrones evidentes asociables al uso del suelo. No obstante, se observó una tendencia hacia una mayor conductividad, concentración de sólidos totales en suspensión y pH en los arroyos con cuencas forestadas. Por otra parte, el sedimento aledaño a los arroyos no forestados tuvo un porcentaje de humedad levemente mayor que en los arroyos forestados. En la plantación de monte adulto se estimó una producción de sedimentos de entre 358 y 672 Kg/ha.año, mientras que en la plantación joven se cuantificaron entre 211 y 470 Kg/ha.año, ambos rangos se encuentran muy por debajo de la pérdida de suelo tolerable para los suelos de la zona y también son inferiores a las estimaciones realizadas previamente de acuerdo al modelo USLE/RUSLE. La situación de déficit hídrico ocurrida en el país luego de la cosecha del monte adulto no permitió establecer una relación confiable para la estimación de la carga de sedimentos exportada luego de la cosecha y por lo tanto las variaciones no pudieron ser evaluadas. En general, estos hallazgos, basados en un período de estudio dominado por años anómalos, caracterizados por primaveras y veranos húmedos y otoños e inviernos secos, ponen de manifiesto la necesidad de mantener el programa de monitoreo para obtener indicadores que reflejen la variabilidad y/o cambio climático.

ABSTRACT

Uruguay has stimulated the development of the forestry sector since the promulgation of the Forestry Law No. 15,939 in December 1987. However, the substitution of natural pastures for forest plantations for industrial use has caused concern in society, particularly in relation to hydrological processes such as water consumption through evapotranspiration and groundwater recharge, and its effects on the water quality, soil and nutrient loss. The purpose of this study was to evaluate the effects of this land use change on natural resources regarding water quantity and quality, and soil loss. Input data were monitored in two pairs of experimental watersheds of 100-200 ha (Don Tomas, DT, and La Cantera, LC) and 10-20 ha (La Nueva Esperanza, LNE), located in the west of Uruguay. Forest watersheds consist of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* and the predominant vegetation in the reference watershed is natural grasslands for livestock use. The main measured data were incident rainfall, meteorological variables, streamflow, rainfall redistribution, soil moisture content, groundwater levels, physico-chemical water analysis (major ions, nutrients and solids), communities of potential macroinvertebrates, rate of organic matter decomposition, estimation of soil erosion based on the Cs137 indicator and suspended sediment load. The seasonal and annual water balance were computed from October 2006 to September 2014 at DT and LC, to evaluate changes in hydrological processes. Groundwater recharge was estimated from the water table fluctuations and groundwater contribution to base flow. The data shows a decrease of the annual specific discharge of about 17% in mean hydrological years and no conclusive effect on annual groundwater recharge in the forested watershed, compared to the reference pasture watershed. Reduced annual specific discharge is equivalent to the mean annual interception. Computed actual annual evapotranspiration is consistent with the findings based on catchment measurements worldwide. The reduction rates are variable according to the season, the accumulated rainfall and its temporary distribution. The specific discharge reduction is particularly high for dry autumns and winters -32 to 28 %- when the corresponding rainfall varies between 275 and 400 mm. These results are relevant for water resources management, since water uses downstream might be affected. The water balance in LNE was computed since 2008, starting with a calibration period until 2011. Thus, it covers a relatively short post-planting period, 7 semesters after the first year post-planting, in which an affectation of water resources was measured. Specific discharge reduction ranged from 10 to 25% of the seasonally cumulative rainfall, the highest percentage corresponding to seasons characterized by water deficit. Being a young plantation, part of this reduction is probably due to effects of tillage in the planting phase. The actual evapotranspiration shows an acceptable fit with the curves developed by Zhang for natural pastures, while in the forested watershed is close but below the curve, due to similar reasons (young plantation with a canopy in a development phase). Regarding the water quality of the studied streams no evident patterns associate to land use changes were found. However, a trend towards greater conductivity, concentration of total suspended solids and pH were observed in the main streams of forested watersheds. Moreover, the sediment adjacent to pasture streams showed a moisture level slightly higher than in forested streams. The production of sediments in the adult plantation ranged between 358 and 672 Kg / ha.year, while for the young plantation it was quantified to 211 and 470 Kg / ha.year. Both ranges are well below the tolerable soil loss for the study area and they are also lower than previously estimates made according to the USLE / RUSLE model. The water shortage occurred in the country just after harvesting the adult plantation did not allow establishing a reliable relationship for estimating the exported sediment load and therefore changes could not be assessed. These findings based on a study period dominated by anomalous years, characterized by wet springs and summers and dry autumns and winters, show the need to maintain the monitoring program in order to compute forest management indicators that reflect the variability and / or climate change.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MARCO TEÓRICO

Durante los últimos veinte años, el Uruguay experimentó un significativo incremento de la superficie territorial afectada a la forestación industrial, en el marco de la política forestal amparada por la Ley N° 15.939. En este período, la superficie de bosques plantados con especies de rápido desarrollo pasó de 45.000 ha en 1990 a aproximadamente 1.150.000 ha en 2015. La Figura 1.1 muestra esta evolución, distinguiendo entre las grandes especies, Pinus y Eucalyptus.

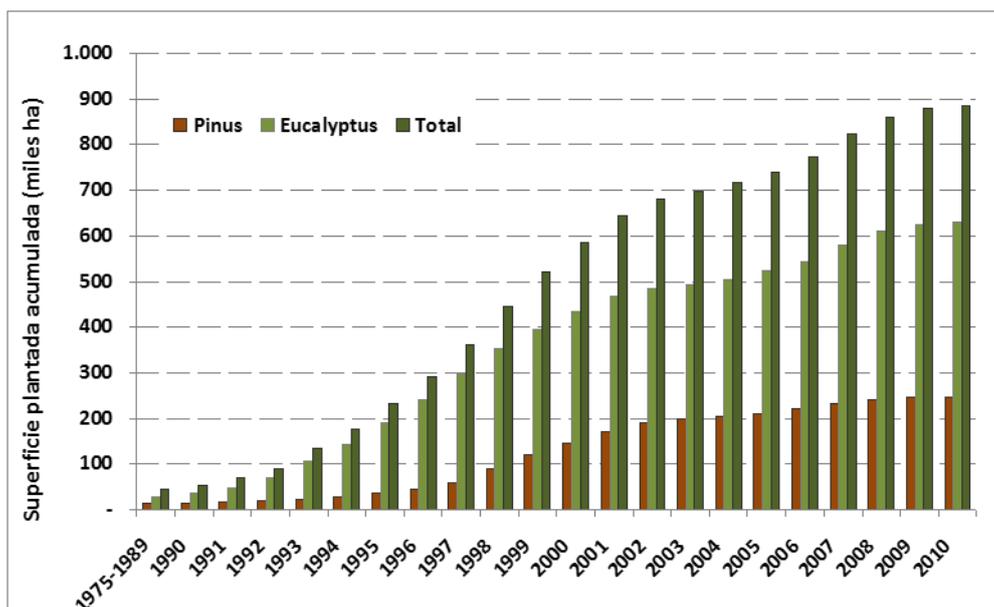


Figura 1.1 Evolución de la superficie forestada en el Uruguay (1975-2010)

Los procesos de deforestación y reforestación representan, a escala mundial, la modificación del uso de la tierra más significativa, tanto por la superficie afectada como por la incidencia sobre los procesos hidrológicos y edafológicos (Bosch, J.M. and Hewlett, J.D., 1982; Calder, 1992, 2005; Huber & Iroumé, 2001; Lima, 1992; Andréassian and Vazken, 2004; Lima e Sakia, 2006). Asimismo, FAO (2011) señala que los efectos de la sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales sobre el recurso agua están asociados al tamaño de la cuenca, según se reproduce en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Efectos de las plantaciones forestales sobre el recurso agua, según el tamaño de la cuenca. Fuente: FAO (2001)

Parámetro	Dimensión de la cuenca (km ²)						
	0,1	1	10	100	1 000	10 000	100 000
Caudal medio	x	x	x	x	o	o	o
Caudal máximo	x	x	x	x	o	o	o
Caudal básico	x	x	x	x	o	o	o
Recarga de aguas subterráneas	x	x	x	x	o	o	o
Carga sólida	x	x	x	x	o	o	o
Nutrientes	x	x	x	x	x	o	o
Materia orgánica	x	x	x	x	o	o	o
Patógenos	x	x	x	o	o	o	o
Salinidad	x	x	x	x	x	x	x
Plaguicidas	x	x	x	x	x	x	x
Metales pesados	x	x	x	x	x	x	x
Régimen térmico	x	x	o	o	o	o	o

x = efecto observable; o = x efecto no observable.
Fuente: FAO, 2001.

Hamilton (1985) afirma que “...la sociedad humana se preocupa por los efectos benéficos y dañinos de los bosques en la cantidad del agua, porque a veces sobra (inundaciones) y en ocasiones no es suficiente. Esta preocupación surge de muchos mitos, ideas, interpretaciones e información erróneas, que este autor denomina los cuatro errores”. En el Uruguay, los grandes emprendimientos de empresas forestales, modificando el uso agrícola – ganadero tradicional del suelo, han creado preocupación en la sociedad, que se han visto reflejadas en la prensa, en las instituciones nacionales, la justicia, la academia y en las propias empresas forestales, respecto a su impacto sobre los recursos naturales, en particular cantidad y calidad de los recursos hídricos y erodabilidad de los suelos.

Estas inquietudes justifican la necesidad de un programa de monitoreo para generar información que sirva de base para la toma de decisiones para una gestión integral de los recursos naturales del país. Por otra parte, estudios sobre la sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales y sus efectos sobre los recursos naturales aguas y suelos, ejecutados por diferentes instituciones y/o empresas, hacen imprescindible la necesidad de obtener consenso sobre la metodología a emplear en los programas de monitoreo y el posterior procesamiento de la información, de modo de garantizar que los resultados sean comparables entre sí. De este modo, diferentes proyectos o programas podrán integrarse en una red nacional de monitoreo para generar indicadores para la conservación y el Manejo Forestal Sustentable (MFS), en concordancia con el Proceso de Montreal (1993), del que Uruguay participa conjuntamente con 12 naciones, que representan el 90% de la superficie total de bosques templados y boreales del mundo.

1.2 ANTECEDENTES

Con el propósito de estudiar los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos y tomando como patrón de comparación el campo natural para uso ganadero, es que desde fines del año 1998 a la fecha se han ejecutado, a nivel nacional, los siguientes proyectos de investigación:

- “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con Eucalyptus en el Uruguay”. Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Ejecutado por las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República a través de un convenio entre la Universidad de la República (UDELAR) y la Unidad Ejecutora del Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER), con financiamiento del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Préstamo BIRF 3697-UR. La ejecución tuvo lugar entre el 4.12.1998 y 31.5.2001. Los resultados más relevantes se sintetizan en Silveira et al. (2006) y Delgado et al. (2006).
- “Proyecto INIA FPTA 102 Efectos del establecimiento de áreas forestadas en el comportamiento hidrológico de una cuenca en Tacuarembó, Uruguay.”. Ejecutado por la empresa Colonvade S.A. y Weyerhaeuser Company Foundation (Chescheir et al., 2008).
- “Impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos. ¿Cómo extender la información de microcuencas experimentales a grandes cuencas?”. Este proyecto, financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República, en el marco del programa de Investigación y Desarrollo, se ejecutó entre el 1.10.2002 y el 30.09.2004 por las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República, contando con el apoyo de DGF, DNH y UTE. Sus principales resultados se encuentran documentados en un par de publicaciones presentadas en el XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Silveira et al., 2004; Silveira & Alonso, 2004).
- Proyecto de cooperación bilateral entre la Universidad de la República (Uruguay) y la Universidad Austral (Chile): “Impacto de las Plantaciones Forestales sobre los Recursos Hídricos”. Financiación: Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), Dirección Nacional de Ciencia y Tecnología (DINACYT). Ejecución: Noviembre 2004 – Abril 2006.
- Proyecto CSIC I+D Llamado 2004: “Monitoreo y modelación hidrológica de la redistribución de la precipitación en plantaciones forestales”. Ejecución: Marzo 2005 – Febrero 2007. Los principales datos de redistribución de lluvias están documentados en De Izaguirre & Alonso (2006), Silveira & Alonso (2008).
- Proyecto PDT 3203: “Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de Eucalyptus en el Uruguay”. Financiación: Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), Dirección Nacional de Ciencia y Tecnología (DINACYT). Ejecución: Setiembre 2005 - Agosto 2007. Los principales resultados están documentados en tres publicaciones presentadas en el XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Amorín & Silveira, 2008; Silveira et al., 2008; Alonso & Silveira, 2008).

- Proyecto INIA FPTA-210: “Efecto de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”. Financiación: Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Ejecución: Marzo 2007 – Junio 2010. Los principales resultados del proyecto FPTA-210 están documentados en la publicación nro. 32 de la Serie FPTA-INIA y en cinco publicaciones presentadas en el XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Silveira et al., 2010^a; Silveira et al., 2010^b; Martínez et al., 2010; Alonso et al., 2010 y Bentancor y Silveira, 2010).
- Convenio Forestal Oriental S.A. / Facultad de Agronomía-UdelaR: “Dinámica del agua en plantaciones de eucaliptos en establecimiento La Nueva Esperanza. Ejecución 2009-2012. Actividades desarrolladas: Caracterización hidrológica de las dos microcuencas del establecimiento, relevamiento en campo de perfiles longitudinales y secciones transversales de los cauces principales, levantamiento mensual de información de campo y su posterior procesamiento. Modelación física de los vertederos (combinados triangular-rectangular) instalados en campo, para la determinación de las curvas H-Q. Realizada en el laboratorio del IMFIA. Análisis de la información disponible, con el objetivo de caracterizar el comportamiento hidrológico en cada microcuenca, durante el período de calibración y a partir de la forestación con Eucalyptus en una de ellas. Este convenio financió el mantenimiento del programa de monitoreo (visitas periódicas, servicio de la infraestructura e instrumental), con un procesamiento básico de la información recolectada.
- Convenio FJR – MdP Este convenio tuvo como propósito mantener el programa de monitoreo, en el período comprendido entre la finalización del proyecto INIA-FPTA y el inicio del proyecto ANII-Alianzas.
- Proyecto CSIC I+D: “Evaluación de la producción de sedimentos pos-cosecha en cuencas forestadas”. Ejecución 2011 – 2013. En este proyecto se profundizó en el estudio de la producción de sedimentos durante la cosecha, mediante el uso del radionucleido Cs137 y la implementación del modelo hidrológico SHETRAN. Los resultados alcanzados están documentados en el informe final presentado a CSIC y en los artículos publicados en la revista Agrocienza (Alonso et al., 2012) y en las XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM (Scavone y Alonso, 2011).

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Crear una red de microcuencas experimentales para evaluar los efectos de la actividad forestal sobre los recursos naturales aguas y suelos y obtener indicadores hidrológicos y edáficos comparables, medidos como impacto relativo a la situación natural bajo pastura para uso ganadero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Crear protocolos para la implementación de programas de monitoreo en plantaciones forestales.
2. Crear protocolos para la obtención de indicadores hidrológicos y edáficos comparables.
3. Generar una base de datos hidrológicos (cantidad y calidad), climatológicos y edáficos.
4. Caracterizar la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, asociada a sitios, clima, etapa de crecimiento e indicadores biofísicos (IAF, potencial hídrico en hoja, estimación de conductancia estomática).
5. Cuantificar las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión en plantaciones forestales tomando como patrón de comparación el uso del suelo en pastoreo.
6. Obtener indicadores para los componentes del ciclo hidrológico con dos diferentes usos del suelo en comparación con plantaciones forestales y en las zonas de influencia de ambas empresas.
7. Establecer la línea de base de la calidad físico-química de las aguas y evolución de parámetros hidroquímicos, en particular frente a distintos manejos (por ej., pos cosecha).
8. Implementar modelos simples de cuantificación de variables hidrológicas.
9. Obtener información cuantitativa que permita desarrollar y/o modificar procedimientos para las operaciones forestales propendiendo a un uso eficiente del agua.
10. Evaluar el efecto de las plantaciones forestales sobre la recarga de los acuíferos superficiales en las zonas de influencia de las empresas.

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la zona litoral del país, en los departamentos de Río Negro y Paysandú.

En el departamento de Paysandú se localizan dos microcuencas, ubicadas en los establecimientos Don Tomas (forestal) y La Cantera (pasturas naturales), que fueran instrumentadas en el año 2006. En el departamento de Río Negro se encuentran las

1.4.1 MICROCUENCAS DON TOMÁS Y LA CANTERA

La microcuenca Don Tomás (DT) está situada sobre la Cañada Baigorria mientras que la microcuenca La Cantera (LC) está situada sobre la cañada de la Quinta. Ambos cauces son afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda (Figura 1.2).

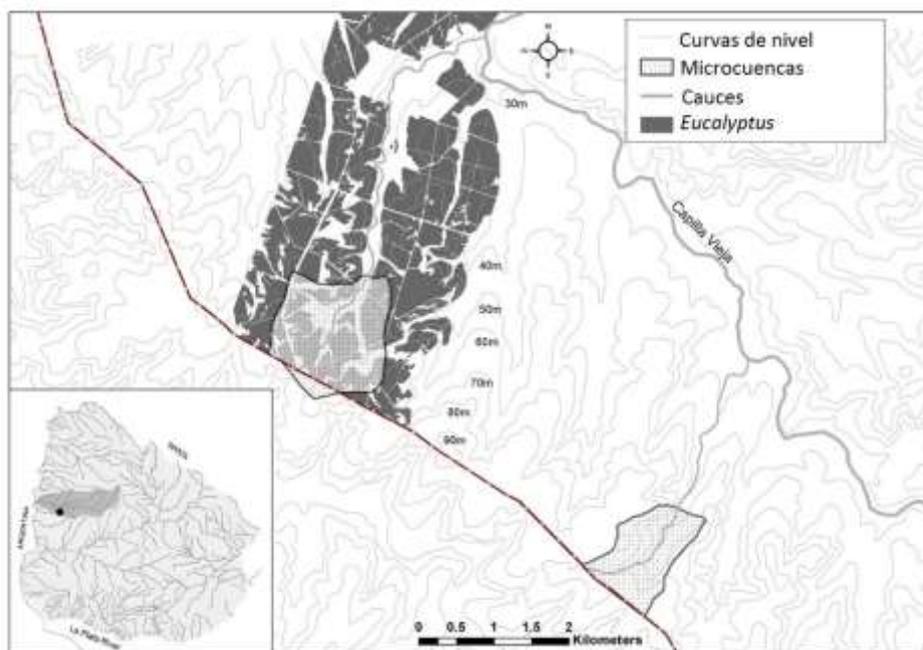


Figura 1.2 Localización de las subcuencas Don Tomás y La Cantera

Las principales características físicas de las microcuencas se presentan en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Características físicas de las microcuencas Don Tomás y La Cantera

Característica	Don Tomás	La Cantera
Área (km ²)	2.12	1.20
Perímetro (km)	5.81	4.58
Long. Cauce (m)	1783	2168
Pend cauce principal (%)	0.90	1.58
Pend media cuenca (%)	4.68	5.92
Tc (min)	39.0	36.5

La vegetación de la microcuenca La Cantera es de parque de algarrobos (*Prosopis* sp) con gramíneas de ciclo invernal, mientras que en Don Tomas existe una plantación de *Eucalyptus* del tipo *globulus ssp. maidenni* implantada en el otoño-primavera del año 1998, con una densidad de 895 árboles/ha.

Las características geomorfológicas y edáficas en ambas cuencas son muy semejantes, lo cual aporta validez a la metodología de estudio seleccionada, en la cual éstas serán utilizadas como elementos de comparación frente diferentes usos del suelo.

Los materiales generadores son sedimentos cretácicos con relieve escarpado y valles disectados, formando lomadas fuertes y suaves. Se visualizan varios niveles de escarpas, un nivel superior con alto contenido de material calcáreo que actúa como generador de los suelos de la superficie aplanada del interfluvio en la cabecera de ambas cuencas. Los suelos dominantes son vérticos, de profundidad variable, desarrollados sobre la escarpa calcárea. Por debajo de esta primera escarpa se encuentran suelos arenosos pardos de profundidad variable con gran diferenciación textural entre los horizontes superficiales y los subsuperficiales, que se clasifican como Brunosoles Subeutricos (dísticos) lúvicos, En las lomadas más suaves asociadas a las vías de drenaje se encuentran también suelos arenosos pero de color oscuro, más profundos y de menor diferenciación textural.

Las variables monitoreadas son: precipitación (pluviógrafo) y variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión y velocidad del viento), escorrentía (vertedero y limnógrafo), contenido de humedad del suelo (tubos para acceso de sonda de neutrones y posteriormente sensores de monitoreo continuo), nivel freático (piezómetros y limnógrafos) redistribución de la precipitación y calidad de aguas en cauce.

En las Figura 1.3 se ubica en planta la instrumentación por microcuenca de estudio, y en las Figura 1.4 se presentan algunas imágenes del instrumental e instalaciones existentes.

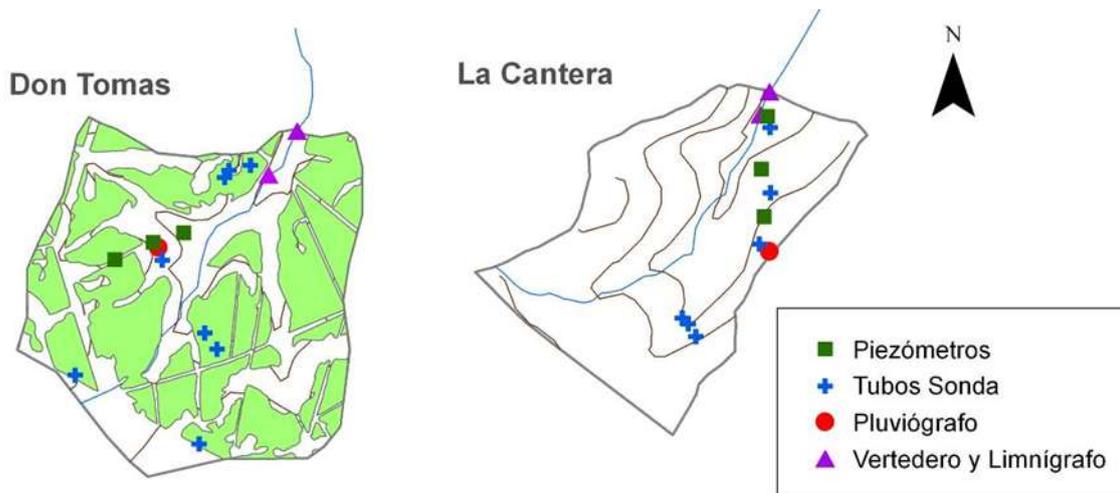


Figura 1.3 Localización de los instrumentos de medida en las microcuencas Don Tomás y La Cantera



Estación meteorológica – Don Tomás



Vertedero desde aguas arriba – La Cantera

Figura 1.4 Fotografías de algunos equipos e instalaciones en las microcuencas Don Tomás y La Cantera

1.4.2 MICROCUENCAS LA NUEVA ESPERANZA

Las microcuencas del establecimiento La nueva Esperanza LNE1 y LNE2, se localizan a unos XX km del la localidad de Mellizos, en el departamento de Río Negro, sus cauces principales son pequeñas cañadas sin nombre que confluyen aguas abajo en otra cañada afluente al Arroyo Grande en su margen derecha (Figura 1.5).

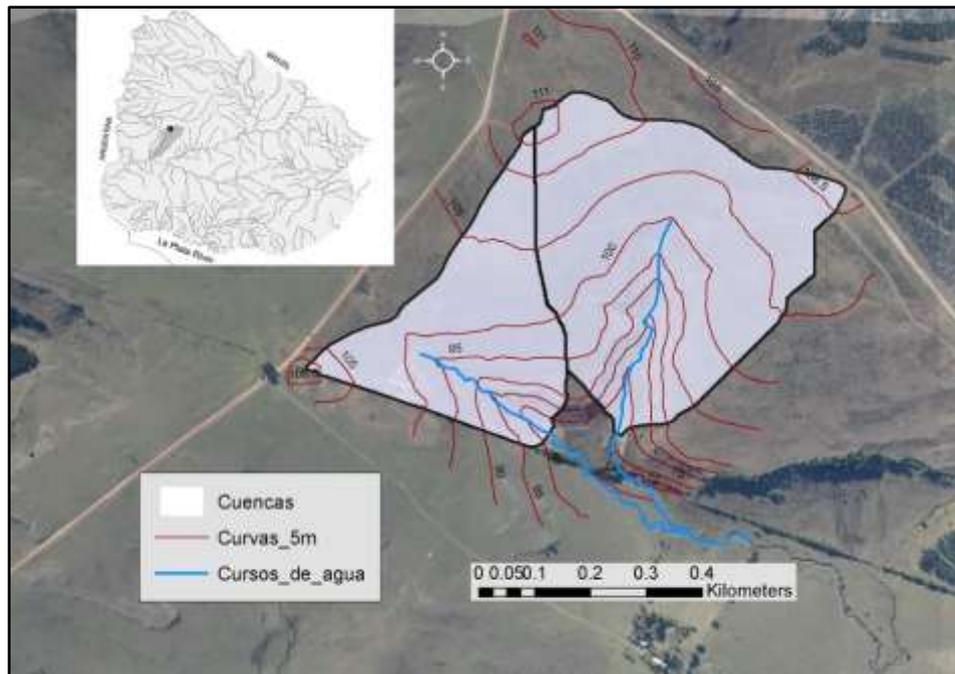


Figura 1.5 Localización de las subcuencas de La Nueva Esperanza

Las principales características físicas de las microcuencas se presentan en la Tabla 1.3:

Tabla 1.3 Características físicas de las microcuencas de La Nueva Esperanza

Característica	LNE1 (pastura)	LNE2 (forestal)
Área (km ²)	0.116	0.22
Perímetro (km)	1.76	2.21
Long. Cauce (m)	635	770
Pend cauce principal (%)	5.2	4.3
Pend media cuenca (%)	7.2	7.6
Tc (min)	9	11

La vegetación predominante en el sitio es de pastizales, aunque con notorias variantes florísticas y fisonómicas. De acuerdo a las variantes microambientales: cornisas de rocas de arenisca, cañada, campos pedregosos, campos, pueden encontrarse distintas especies aunque predomina la vegetación herbácea de gramíneas, graminoides y otras herbáceas (mono o “dicotiledóneas” s.l.), aunque es notoria la presencia de otros grupos funcionales tales como: arrosetadas, sufrútices o caméfitos (plantas subleñosas bajas), arbustos,

árboles. La vegetación leñosa arbórea es escasa y se restringe a algunos sectores de afloramientos de areniscas, con algunas partes relativamente densas configurando un pequeño bosque. En las zonas bajas se destacan Gramíneas y Ciperáceas (Grela, 2007).

En abril del 2011 la microcuenca LNE2 se foresta con una plantación de *Eucalyptus* del tipo *globulus ssp. maidenni*, con una densidad de 1080 árboles/ha.

La unidad de suelo dominante es un brunosol dístico lúvico arenoso, fase pseudolítica (DSA/MGAP). Presenta un horizonte superficial de 15 a 25 cm, color pardo grisáceo muy oscuro a gris muy oscuro y textura franco arenosa, consistencia muy friable y estructura de bloques pequeños y débiles. Mediante una transición clara o abrupta se pasa a un horizonte de 20 a 25 cm de espesor, color similar al anterior y textura franco arenosa gravilosa o muy gravilosa; la existencia de una discontinuidad litológica entre los dos horizontes descritos es evidente (Durán, 2007).

Dentro del establecimiento se identifican tres materiales geológicos diferentes (Schipilov, 2006). En la mayor parte de las zonas altas el material generador de los suelos está constituido por rocas sedimentarias de edad cretácica superior; se trata de areniscas en general bien litificadas y a veces muy duras que afloran puntualmente. Estos sedimentos corresponden a la formación Mercedes. El segundo material geológico está constituido por una arenisca de color pardo rojizo, algo arcillosa, con arena fina y sin clastos gruesos, perteneciente a la formación Guichón. Finalmente se identifica un sedimento de naturaleza coluvial que ocurre inmediatamente por debajo de las escarpas de la arenisca de Mercedes, constituido por removilizaciones de los productos de la alteración de dicha arenisca.

Las variables monitoreadas son: precipitación (pluviógrafo) y variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión, radiación par y velocidad del viento), escorrentía (vertedero y limnógrafo), contenido de humedad del suelo (sensores de monitoreo continuo), nivel freático (piezómetros y limnógrafos), redistribución de la precipitación y calidad de aguas en cauce.

En la Figura 1.6 se presentan algunas imágenes del instrumental e instalaciones existentes.



Estación meteorológica



Vertedero desde aguas abajo – LNE1

Figura 1.6 Fotografías de algunos equipos e instalaciones en las microcuencas de LNE

2. CANTIDAD DE AGUA - METODOLOGÍA

2.1 PROTOCOLOS DE MONITOREO

2.1.1 Precipitación y variables meteorológicas

La precipitación incidente sobre cada microcuenca debe registrarse de forma continua con un pluviógrafo digital, o eventualmente en forma horaria con un pluviómetro digital, siendo recomendable que posea una autonomía superior al mes para el almacenamiento de datos.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), así como algunos autores (Corbet, Holtan, Paula Lima, etc.) establecen diversas recomendaciones respecto a la instalación de dichos instrumentos de medición, dentro de las cuales pueden mencionarse:

La boca del pluviógrafo se debe exponer con su boca en posición horizontal sobre el nivel del suelo.

La altura de la boca debe hallarse lo más baja posible con relación al suelo (la velocidad del viento aumenta con la altura) pero lo suficientemente alta para evitar salpicaduras. Las alturas más comúnmente utilizadas varían entre 0.5 y 1.5 m.

El terreno circundante puede estar cubierto de césped, grava o ripio, ya que una superficie plana y dura como el hormigón origina salpicaduras excesivas.

- No deben instalarse próximos a otros objetos (árboles, construcciones, etc.). Como regla general, deben estar al menos a una distancia igual al doble de su propia altura (medida desde la boca del pluviógrafo).
- En microcuencas forestadas, debe instalarse en un claro cercano al baricentro de la misma, de tamaño tal que un observador pueda visualizar un ángulo radial de 30-45º, o sobre una torre o sobre una torre elevada por sobre las copas de los árboles

Debido a que el viento es uno de los factores que introducen mayor error en la medición de la precipitación, se colocará muy próximo al pluviógrafo un anemómetro. Se recomienda una distancia entre los dos sensores como máximo de 5 metros en la horizontal y 1.5 m en la vertical (el anemómetro colocado en posición superior) y no deben existir obstáculos entre ambos sensores.

Por otro lado, es deseable contar con una medida de la evapotranspiración potencial, que pueda ser utilizada para comparar la evapotranspiración real resultante del balance hídrico. La misma puede estimarse a partir de datos medidos en una estación meteorológica, que registre en forma continua: precipitación, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura, presión atmosférica y registros de heliofanía (horas de brillo solar) transformables en radiación neta utilizando la metodología descrita en la publicación No. 56 de FAO (Allen et al, 1998). En este caso la instalación del pluviógrafo digital y del anemómetro podrá ser sustituido por la instalación de dicha estación meteorológica. La evapotranspiración potencial se calcula para ambos cultivos (pastura y plantación forestal) utilizando la ecuación combinada de Penman-Monteith (Monteith, 1965), teniendo en cuenta la resistencia aerodinámica y la resistencia estomática según metodología propuesta por Allen et al (1998).

Más allá de las consideraciones generales aquí presentadas, deberán seguirse las recomendaciones de la OMM establecidas en la "Guía de Prácticas Hidrológicas. Adquisición y proceso de datos. Análisis, predicción y otras aplicaciones" y en la "Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológica".

En cuanto a las frecuencias de monitoreo de las medidas relacionadas a la precipitación esta será como mínimo horaria, pero dependiendo del objetivo específico podrán efectuarse los registros con mayor frecuencia.

2.1.2 Esguerrimiento

El esguerrimiento constituye la respuesta de una cuenca frente a la ocurrencia de precipitaciones. La geomorfología de la cuenca, el tipo, uso y cobertura del suelo, el tipo y forma de la precipitación, así como la evapotranspiración que ocurren en la cuenca, son los factores que gobiernan principalmente la magnitud y evolución temporal del esguerrimiento.

La escala espacial y temporal de los procesos de precipitación, evapotranspiración e infiltración influyen directamente la magnitud y variación del esguerrimiento en el tiempo. Estos aspectos condicionan el tipo de instrumento requerido para la medición así como las características del registro (frecuencia de medida, almacenamiento, precisión, etc).

Los programas de monitoreo de plantaciones forestales habituales, se basan en la instrumentación de dos microcuencas apareadas experimentales (una con cobertura forestal y la otra pasturas naturales). En estos caso, las cuencas ocupan superficies del orden de las 100 ha y sus tiempos de concentración son inferiores a los 30 minutos, requiriéndose instrumentación que permita registrar las variables hidráulicas con una frecuencia de un minuto.

En contraposición a la variable precipitación, cuya instrumentación fue presentada en el punto anterior, el esguerrimiento generado en una cuenca, no puede ser medido de forma directa. En efecto, se sugiere, la estimación del esguerrimiento en base a la construcción de un vertedero tipo en el cierre de la cuenca y el registro automático de nivel aguas arriba del vertedero. El esguerrimiento se estimará utilizando la ecuación conocida que relaciona el nivel aguas arriba del vertedero con el caudal circulante por esta estructura.

El vertedero es una estructura de aforo consistente en una pared delgada (escaso espesor), usualmente de material metálico, colocada de manera transversal al flujo del cauce principal de la cuenca en el punto de interés. Esta chapa metálica se ancla en el fondo del cauce utilizando hormigón de manera de asegurar condiciones de estabilidad estructural.

Se desaconseja su instalación en una sección curva del curso (meandro), así como en secciones controladas hidráulicamente aguas abajo. (Por ejemplo, existencia del remanso de un curso mayor, obra de alcantarillado, o embalse de un tajarar o represa existente aguas abajo). En estos casos deja de ser válida la relación caudal-nivel asociada al vertedero tipo.

Se sugiere su instalación en una sección transversal estable en el tiempo y especialmente contraída del curso. La instalación en secciones con importante planicie de inundación genera elevados costos, ya que el caudal circulante en la sección debe captarse completamente por el vertedero. En caso de cursos de planicie, una alternativa es ocupar la mayor parte de la longitud de cierre con un terraplén, cuyo material debe resistir el paso de las crecidas extraordinarias sobre el coronamiento. En estos casos, el mantenimiento frecuente se considera imprescindible a efectos de asegurar la operatividad de la estructura.

Las dimensiones y forma del vertedero se determinarán en cada caso, en función del área y tiempo de concentración de la cuenca. Se sugiere utilizar vertederos de tipo triangular para caudales bajos, mientras que caudales superiores se sugiere rectangulares. Alternativamente, cuando el rango de caudales a ser registrados incluye caudales bajos, medios y altos, se recomienda utilizar vertederos combinados: rectangular-triangular, cuya ley de descarga requiere modelación física. La apertura del vertedero triangular, longitud en vertedero rectangular y altura de la zona muerta, son función del rango de caudales a registrar; aspectos que pueden consultarse en la norma ISO 1438/1-1980(E), específica de vertederos.

A efectos de viabilizar los costos, se recomienda considerar como caudal máximo a registrar el correspondiente a un evento de un año de período de retorno para la cuenca. Para su determinación, se sugiere utilizar las Curvas I-D-F de precipitaciones máximas de Uruguay (Genta et. al, 1998). Los caudales mayores, pasarán sobre el vertedero y por medio de modelación numérica hidráulica serán estimados.

Medición de escurrimiento hasta 1 año de recurrencia

En esta alternativa puede implementarse un vertedero de pared delgada en la sección transversal del curso principal. La relación Caudal-Altura aguas arriba del vertedero es fija y conocida (ISO 1438/1-1980) y depende del rango de mediciones a ser registrado.

El escurrimiento se estimará a partir del nivel aguas arriba del vertedero. Este nivel se deberá medir con una frecuencia de un minuto. Para ello, se sugiere registrar mediante limnógrafo automático preferentemente con sensor de presión. Este instrumento se instalará de manera permanente en el curso de agua, aguas arriba del vertedero, almacenando los datos que posteriormente serán descargados. La frecuencia de descarga de datos depende de la cantidad de datos al día almacenados. Usualmente, para un clima como el uruguayo, si se toma una medida cada vez que cambia 1 mm el nivel de agua, la autonomía suele ser de algunos meses.

Conocido la evolución temporal de niveles, puede estimarse la evolución temporal de caudales en base a la relación Caudal-Altura conocida para los vertederos tipo (ISO 1438/1-1980).

Estimación del escurrimiento para caudales superiores a 1 año de recurrencia

El vertedero permitirá medir de manera confiable mientras el nivel de agua aguas arriba no alcance su cota superior. En ese caso, cambian las condiciones de descarga y la relación Caudal-Altura no es válida, pasando la misma a depender de la sección transversal topográfica del cauce. Debido a esta dependencia, la nueva relación caudal-altura, se obtendrá mediante modelación numérica hidrodinámica.

Para ello, será necesario contar con otro limnógrafo a ser instalado en el cauce principal aguas arriba del limnógrafo asociado al vertedero. La frecuencia y características de la medición, serán iguales entre ambos limnógrafos.

La modelación hidrodinámica deberá incluir la resolución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant que representan el flujo unidimensional a superficie libre en estado no estacionario. Existe software libre que resuelven estas ecuaciones en forma numérica con diversos esquemas, permitiendo la incorporación de estructuras de vertido transversales al flujo de cualquier geometría. Las características de la modelación son fuertemente dependientes de cada caso específico: longitud del tramo a modelar, ubicación del vertedero, las condiciones de borde, calibración del coeficiente de rugosidad, incertidumbres, etc.

Una vez implementado en campo el vertedero y los dos limnógrafos, la estimación de caudales bajos, medios y altos inferiores a 1 año de período de retorno, se efectúa directamente con la relación caudal-altura del vertedero. Luego de procesar los primeros eventos superiores a 1 año, se implementa y calibra el modelo numérico hidrodinámico del tramo. Se obtiene así la curva caudal-altura para caudales superiores a 1 año de recurrencia. A partir de ese punto, se transforman todos los niveles registrados a caudal circulante. La curva obtenida del modelo deberá ser validada y reajustada en la medida que se disponga información de nuevas crecidas en el cauce.

2.1.3 Intercepción

La estimación de la intercepción del dosel forestal, por diferencia entre las componentes de la redistribución de la precipitación, requiere medidas de la precipitación total incidente, así como la implementación de medidas de precipitación directa y escurrimiento fustal.

Los dispositivos e instrumental para medición de la precipitación total incidente fueron presentados en la sección 2.1.1.

Dispositivos e instrumental para medición de la precipitación directa:

Según la metodología internacionalmente aceptada, la precipitación directa puede ser recogida en una canaleta de acero galvanizado, de sección parabólica, de 15 cm de ancho y 30 a 35 m de longitud (Iroumé y Huber, 2000) colocada en el sentido de la pendiente natural del terreno y dispuesta en diagonal entre dos filas de árboles, de forma que en su recorrido cubra tanto las zonas de entrefila como las cercanas a los troncos, asegurando así la representatividad de los registros para un ecosistema o estructura del dosel heterogénea.

Para el registro del volumen recogido por la canaleta se pueden considerar al menos estas dos opciones:

Que dicha canaleta drene hacia un tanque de entre 500 y 1000 l de capacidad donde las variaciones de nivel sean registradas utilizando un limnígrafo. El tanque puede ser vaciado por una bomba que se activa mediante un sensor de nivel.

Que el área de captación de la canaleta se divida en dos receptores de lluvia de aproximadamente 3.5 m², cada uno con sensores de volumen de tipo cangilones y registradores electrónicos independientes, lo que permite ubicar ambos receptores en zonas diferentes, obteniendo datos individualizados.



Figura 2.1 Ejemplo de canaleta para recolección de precipitación directa



Figura 2.2 Detalle de canaleta de sección parabólica

La alternativa tradicional a la recolección de la precipitación directa por medio de una canaleta es la colocación de entre 30 y 40 pluviógrafos bajo el dosel forestal, distribuidos de forma de asegurar la representatividad de las medidas. Esta alternativa supera ampliamente en costos la planteada anteriormente.

Dispositivos e instrumental para medición del escurrimiento fustal:

El escurrimiento de cada fuste se recoge mediante collarines de goma adheridos al tronco en forma de espiral ascendente (Likens & Eaton, 1970; Ford & Deans, 1978, Huber & Iroumé, 2001). Los collarines podrán estar

construidos con un perfil de goma de 50x4 mm que oficia de pared exterior unido a otro perfil de goma o poliuretano expandido de 20x30 mm los cuales luego de unidos entre sí con pegamento, se fijan al tronco mediante un clavo colocado en cada extremo, sellando las uniones con silicona para evitar pérdidas entre el tronco y la goma. La instrumentación de al menos 10 árboles dentro de la parcela seleccionada asegura la representatividad de la medida.



Figura 2.3 Ejemplo de collarín para recolección del escurrimiento fustal.



Figura 2.4 Ejemplo de tanques para recolección y registro del volumen escurrido.

Para el registro del volumen recogido por los collarines, se pueden considerar al menos estas dos opciones:

Que dicho escurrimiento se conduzca mediante caños de PVC de 50mm de diámetro hacia un tanque de entre 500 y 1000 litros de capacidad, donde las variaciones de nivel sean registradas utilizando un limnígrafo. El tanque puede ser vaciado por una bomba que se activa mediante un sensor de nivel.

Que el escurrimiento fustal se derive hacia dos módulos de registro de caudal, cada uno compuesto de receptores de lluvia para 5 árboles con sensores de volumen de tipo cangilones y registradores electrónicos independientes (Figura 2.6), lo que permite ubicar ambos receptores en zonas diferentes obteniendo datos individualizados.



Figura 2.5 Ejemplo de collarín para recolección del escurrimiento fustal



Figura 2.6 Ejemplo de registrador (logger) independiente

2.1.4 AGUA EN EL SUELO

La metodología para está componente del balance hídrico comprende las siguientes tareas específicas:

Registrar el contenido de agua en el suelo, y determinar su variación espacial y temporal.

Determinar las propiedades hidráulicas del suelo: velocidad de infiltración, conductividad hidráulica y curva tensión – humedad.

Estimar la evolución estacional del consumo de agua de la plantación forestal.

Numerosos trabajos de investigación señalan la importancia que tiene la evaluación del impacto sobre el contenido de agua en el suelo al modificarse la cobertura vegetal; éstos indicadores se basan principalmente en determinar el contenido de agua en el suelo y su variación espacial y temporal. De acuerdo a estos trabajos, la variación temporal de la reserva de agua edáfica se manifiesta más intensamente en los primeros 50 cm. de profundidad donde se concentran la mayor cantidad de raíces. Esta oscilación temporal disminuye con la profundidad pero generalmente se puede observar en todo el perfil.

La evaluación del agua en el suelo y sus variaciones en la zona no saturada se efectúa a partir de mediciones del contenido de agua del suelo, por método gravimétrico o termalización de neutrones (Bell y Mc Culloch, 1966; Cope y Trickett, 1965; Toebes y Ouryvaev, 1970).

La termalización de neutrones es el procedimiento más usado actualmente y se basa en el hecho de que los átomos de hidrógenos tienen una capacidad mayor para reducir la energía de neutrones rápidos, que la mayoría de los demás átomos, de modo que contar neutrones lentos en la proximidad de una fuente de neutrones rápidos proporciona un medio para calcular el contenido de hidrógeno. Puesto que la fuente más variable y significativa de hidrógeno en el suelo es el agua, la técnica proporciona un medio conveniente para calcular el contenido hídrico del suelo. Para usar esta metodología es necesario colocar en el suelo una cantidad determinada de tubos de acceso para la sonda de neutrones, en todas las posiciones relativas respecto a los árboles, con el objetivo de representar de mejor forma las variaciones temporales y espaciales del contenido de humedad (Huber, Oyarzún y Ellies, 1985).

La sonda de neutrones es una de las metodologías más empleadas en éste tipo de estudios, puesto que permite tomar un gran número de datos en forma rápida tanto en área como en profundidad, y saber en forma inmediata el contenido de humedad del suelo para los distintos puntos de estudio.

La calibración de la sonda debe realizarse mediante mediciones gravimétricas de contenido de agua en el suelo, con los cuales se obtiene el modelo de regresión para cada horizonte, el que luego se utilizarán para estimar el contenido de agua volumétrico a las distintas profundidades de suelo.

Esta metodología permite la medición no destructiva del contenido del agua del suelo en el campo. Presenta como ventaja la posibilidad de mediciones rápidas y periódicamente repetidas en la misma ubicación y profundidad del suelo, pero tiene como desventaja el riesgo de contaminación radiactiva y que las medidas obtenidas no son continuas en el tiempo.

Para sortear las desventajas mencionadas, para la determinación del contenido de agua en el suelo se instrumentará cada parcela con sensores de monitoreo continuo, colocados a diferentes profundidades. La metodología consiste en sensores que obtienen el valor del contenido volumétrico de agua a partir de la medición de la constante dieléctrica del suelo a través de la utilización del concepto de capacitancia y la técnica FDR, creando un campo eléctrico mediante una frecuencia que es alterada por el contenido de agua en el suelo. Mediante calibración permiten medir el contenido de agua en el suelo en un amplio volumen de muestreo.

El contenido de agua en el suelo se determinará hasta la profundidad que el desarrollo del suelo permita (1-1.2 m), en los casos en que sea factible las medidas se realizarán a mayores profundidades con el objetivo de obtener datos que permitan determinar hasta que profundidad las raíces pueden extraer agua.

El total de puntos de medida deberá determinarse de acuerdo a las características del área de estudio, al ser áreas pequeñas la variabilidad de suelos no sería significativa por lo que se propone la colocación de 2 a 3 conjunto de sensores por microcuenca, distribuidos en profundidad hasta lo que permita el desarrollo del perfil del suelo.

Los valores obtenidos por cada sensor, para cada una de las profundidades establecidas, son almacenados en un registrador a partir del cual pueden obtenerse los mismos mediante un computador portátil.

2.1.5 PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO

a. Infiltración

Los ensayos de infiltración deben llevarse a cabo mediante el método de inundación de un infiltrómetro de doble anillo, registrándose la variación del descenso del agua en un determinado tiempo.

Dada la variabilidad espacial que presenta la determinación de éste parámetro se deben realizar 3 repeticiones por cada tipo de suelos.

b. Conductividad hidráulica

Se debe extraer muestras imperturbadas de suelo, a efectos de determinar la conductividad en flujo saturado, en base a muestras de 100 cm² de los diferentes horizontes que componen los perfiles de suelo bajo estudio.

c. Densidad aparente y curva característica de retención de agua

Se deben extraer muestras imperturbadas de 68.5 cm³ para las distintas profundidades, de acuerdo a los perfiles de suelo, determinar su peso luego de saturadas y equilibradas a 0.1; 0.33; 1,0 y 5,0 atm. con un extractor de presión, para finalmente obtener su peso seco (Blake y Hartge, 1986; Klute, 1986). Este método permite determinar el contenido de agua presente en el suelo para distintas tensiones y verificar el efecto debido al cambio en la cobertura en cuanto a diferencias en el contenido de agua para similar tensión entre los diferentes manejos.

2.1.6 NIVELES PIEZOMÉTRICOS

El monitoreo de niveles piezométricos permitirá caracterizar la relación recarga – descarga entre el medio superficial y subterráneo.

Instrumentar y monitorear las variaciones del nivel freático para alcanzar estos objetivos, requiere aplicar una metodología que comprende un conjunto de etapas previas:

Cartografía geológica regional a escala 1:50.000: elaboración de la cartografía geológica regional a escala 1/50.000 de la microcuenca seleccionada como unidad de estudio.

Análisis de la superficie piezométrica local: Sobre la base geológica regional se deben incluir los datos de eventuales perforaciones existentes en la región y los piezómetros a construir en el marco del programa de monitoreo. La profundidad de estos piezómetros será tal que permita relacionar el agua almacenada en el suelo y el acuífero libre. Esta red de piezómetros debe instrumentarse con limnógrafos, para efectuar un

seguimiento continuo de la variación de niveles, a efectos de determinar la sensibilidad de los acuíferos a las precipitaciones y a las plantaciones forestales.

2.2 INDICADORES HIDROLÓGICOS

El Proceso de Montreal estableció 7 “*criterios e indicadores para la conservación y el manejo sustentable de los bosques templados y boreales*”, que son utilizados por los países miembros, entre ellos Uruguay, para la preparación de los informes nacionales. El Criterio 4 refiere a “*la conservación y el mantenimiento de los recursos Suelo y Agua*”, estando el subcriterio 4.3 referido al agua y que se subdivide en 4.3.a, que se enumera a continuación y refiere a la cantidad, en tanto 4.3.b refiere a la calidad y se desarrolla en el capítulo 3 de este informe.

El criterio 4.3.a establece como indicador la “*proporción de actividades de manejo forestal que cumplen con las mejores prácticas de manejo u otra legislación relevante para proteger los recursos asociados con el agua*”, que se fundamenta indicando que “*Este indicador proporciona información sobre la medida en la que los recursos asociados al agua se han identificado y salvaguardado durante el manejo forestal. Este indicador se refiere fundamentalmente a las actividades que pueden afectar las zonas ribereñas, al igual que la calidad, la cantidad y el flujo de agua. La protección de los recursos hídricos y del ecosistemas forestales y acuáticos asociados es fundamental para las poblaciones humanas que dependen de ellos*”.

Uruguay no tiene identificado este indicador. No obstante, en la línea de investigación en que se enmarca este proyecto, se han implementado pares de microcuencas experimentales (entre 15 a 100 ha de superficie), en que se monitorean las variables del ciclo hidrológico, comparando la cobertura forestal con el uso tradicional del suelo consistente en pasturas naturales para uso ganadero. En ese contexto, para facilitar la interpretación del balance hídrico, se han implementado algunos indicadores que se describen a continuación.

- **Caudal específico.** Indicador que relaciona la reducción del caudal específico con la precipitación acumulada estacionalmente (meses de otoño-invierno y meses de primavera-verano) o anualmente, expresado en porcentaje.

$$RQ_{especifico} = \left(\frac{Q_p}{P_p} - \frac{Q_f}{P_f} \right) \times 100 (\%)$$

donde: RQespecífico = reducción del escurrimiento específico, expresado como porcentaje de la precipitación incidente.

Qp= escurrimiento estacional o anual, medido a la salida de la microcuenca cubierta por pasturas naturales para uso ganadero.

Pp= precipitación acumulada, estacional o anual, sobre la microcuenca cubierta por pasturas naturales para uso ganadero.

Qf= escurrimiento estacional o anual, medido a la salida de la microcuenca forestal.

Pf= precipitación acumulada, estacional o anual, sobre la microcuenca forestal.

- **Intercepción.** Indicador de la cantidad de agua que retiene la cubierta forestal y retorna a la atmósfera por evaporación, expresado en porcentaje.

$$I = \frac{I_c}{P_f} \times 100(\%)$$

siendo:

$$I_c = P_f - (P_d - E_f)$$

donde: I=porcentaje de agua precipitada retenida por el dosel (%).

I_c = intercepción estacional o anual (mm).

P_f = precipitación estacional o anual sobre la microcuenca forestal (mm).

P_d = precipitación directa o fracción de la precipitación (P_f) que atraviesa el dosel y llega al suelo (mm).

E_f = escurrimiento fustal o fracción de la precipitación (P_f) que escurre por el tronco y llega al suelo.

- **Evapotranspiración real**

La diferencia en la evapotranspiración real (ETR) se calcula como porcentaje de la precipitación anual o estacional, según:

$$\Delta ETR = \left(\frac{ETR_f}{P_f} - \frac{ETR_p}{P_p} \right) \times 100 (\%)$$

donde: ΔETR =la diferencia en la evapotranspiración, expresada en porcentaje

ETR_f =evapotranspiración real, estacional o anual, medida en una cuenca forestal.

P_f =precipitación estacional o anual, medida en la cuenca forestal.

ETR_p =evapotranspiración real, estacional o anual, medida en la cuenca con cobertura de campo natural.

P_p =precipitación estacional o anual, medida en la cuenca con cobertura de campo natural.

Este indicador hidrológico explica la relación entre la precipitación, el uso del suelo y la evapotranspiración real (Zhang et al., 1999, 2001).

- **Recarga.** Indicador que mide la fracción de la precipitación incidente que recarga el acuífero libre próximo a la superficie del terreno. Este indicador se mide para ambas coberturas (forestal y pasturas naturales para uso ganadero). A efectos de estimar la recarga, se considera el balance de aguas subterráneas como:

$$GW_{rech} - GW_{disch} = \pm \Delta GW$$

donde: GW_{rech} = recarga de aguas subterráneas

GW_{disch} = descarga de aguas subterráneas.

Los cambios del almacenamiento de aguas subterráneas se estiman a partir de las fluctuaciones del nivel freático, y se considera que las descargas de aguas subterráneas son iguales al flujo base del cauce principal.

- **Balance hídrico.** Indicador que sintetiza la relación entre los principales componentes del ciclo hidrológico en las microcuencas experimentales.

2.3 MONITOREO Y RELEVAMIENTO DE DATOS

En el marco de esta línea de investigación fueron instalados diversos equipos de medición de variables meteorológicas y del ciclo hidrológico en las microcuencas de estudio, desde el año 2006 en las microcuencas Don Tomás y La Cantera y desde el año 2007 en La Nueva Esperanza. La ejecución del Proyecto FJR-ANII Alianzas contempló la incorporación de nuevo instrumental de medición en campo, con el propósito de mejorar la toma de medidas realizada anteriormente y contemplar nuevas variables, además de la conservación y mantenimiento de las instalaciones e instrumental existentes. En el Anexo I se listan los instrumentos disponibles al momento de finalización del proyecto.

Originalmente los datos estaban almacenados en planillas de excel con múltiples formatos, dificultando la creación de nuevas herramientas y el uso de los mismos por herramientas existentes. Con el objetivo de un correcto almacenamiento y la mejora de la gestión de la información se elaboró en el marco del presente Proyecto una base de datos, eligiendo como sistema de gestión el MySQL. Esta herramienta permite tener una única copia de los datos facilitando el acceso a los mismos por múltiples personas simultáneamente, evitando tener distintas versiones de los mismos y definiendo un formato único ayudando en su uso. Además se facilitó la carga de los datos y la consulta de los mismos, mediante la creación de scripts en código Matlab con lo que se logró automatizar los procedimientos rutinarios de transformación a partir de los archivos crudos de las estaciones.

La base de datos está compuesta por múltiples tablas de los distintos tipos de estaciones, meteorológicas, hidrométricas, pluviométricas, piezométrica y de humedad en el suelo. En cada tabla se almacenan los datos en bruto de los distintos sensores de las estaciones, esto permite realizar distintas calibraciones de los instrumentos sin la necesidad de volver a recurrir a los archivos originales de cada estación, facilitando el trabajo ya que cada estación tiene un formato de archivo distinto lo cual dificulta su uso.

2.3.1 INFORMACIÓN DE CAMPO DISPONIBLE

En la Tabla 2.1, Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se resumen los datos recolectados durante la ejecución del Proyecto ANII Alianzas, entre agosto 2012 y noviembre 2015. En amarillo meses en que se dispone de mediciones y en blanco meses con faltantes de datos.

2.4 DINÁMICA DEL AGUA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL

Variables de estado de los rodales

En la plantación del establecimiento La Nueva Esperanza se realizó la medición de parcelas permanentes instaladas en un marco sistemático durante el período 2012 a 2015, monitoreando los principales parámetros de los árboles para caracterizar el bosque plantado en la cuenca.

Se instalaron parcelas permanentes cada 100 metros cubriendo en forma de cuadrícula la superficie de la cuenca forestada, como se observa en la Figura 2.7

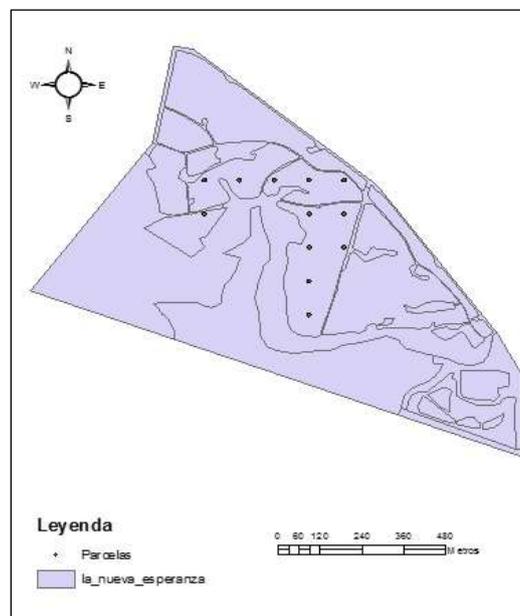


Figura 2.7 Mapa de Ubicación de parcelas La Nueva Esperanza

Las parcelas permanentes instaladas son de forma circular y con una superficie de 300 m². En cada una de ellas se marcó el centro con una estaca de madera y los árboles límite con cintas plásticas para una fácil individualización. A su vez, se numeraron; marcándose el árbol inicial y el final con pintura.

Dentro de cada parcela se censaron los individuos, determinándose a cada uno de ellos el diámetro a la altura del pecho (d) y la altura total (h).

Con dichos parámetros se fue monitoreando la evolución a través del tiempo de la densidad de árboles, el crecimiento del diámetro a la altura del pecho, la altura y el volumen.

Determinación de índice de área foliar (IAF)

La determinación del IAF se realizó según procedimiento indirecto de estimación de IAF basado en la transmisión de luz a través del dosel. Las medidas de IAF en las parcelas experimentales se realizaron mediante ceptómetro AccuPAR LP-80 (Decagon Devices, Inc., USA) siguiendo el procedimiento de campo en función del

arreglo de plantación de árboles y condiciones de luminosidad (Manual AccuPAR Model LP-80, Decagon Devices, Inc. USA, 2010). Las mediciones de campo se realizaron en el mes de diciembre de 2013, mayo y setiembre de 2014 y marzo y setiembre de 2015 en el sitio experimental Nueva Esperanza y en el mes de mayo de 2014 en el sitio experimental Don Tomás.

2.4.2 CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Monitoreo del contenido del agua en el suelo

Para el sitio de evaluación Don Tomás (cobertura forestal) y La Cantera (cobertura de pasturas) se evaluó el contenido de agua en el suelo a nivel mensual, hasta los 80 – 100 cm de profundidad, mediante la metodología de termalización de neutrones durante el período octubre 2006-setiembre 2009, a partir de esa fecha se tomaron medidas esporádicas hasta agosto de 2013, momento en que fueron instalados 3 registradores continuos de agua en el suelo en la microcuenca forestal y 2 en la de pastura. En ambas microcuencas se contemplaron los suelos más representativos al momento de seleccionar los lugares donde fueron instalados. La metodología empleada durante el primer período de mediciones, si es utilizada adecuadamente y con una buena calibración, da resultados satisfactorios pero al realizarse las medidas en un momento dado se pierde mucha calidad en la información en cuanto a poder analizar la evolución del comportamiento del agua del suelo entre medidas sucesivas.

Para el sitio La Nueva Esperanza las medidas de agua en el suelo comenzaron en agosto de 2013 directamente a partir de la instalación de registradores automáticos, anteriormente no se evaluó dicho parámetro en las microcuencas que comprende dicho sitio de evaluación. En este caso se instalaron 2 registradores en la microcuenca forestada y uno en la de pasturas, la escasa área de ambas microcuencas hace que solo se tenga un tipo de suelo representativo, lo que determinó una menor cantidad de sitios de muestreo. Esto permitió disponer de más registradores para el sitio de Don Tomás y La Cantera los cuales dada su extensión ameritaban una mayor número de puntos de observación.

La instalación de registradores continuos permitió obtener valores diarios del contenido de agua en el suelo (y hasta horario si se considerara necesario), información a partir de la cual se puede analizar el comportamiento del agua del suelo y su relación con el consumo por parte de la vegetación.

Para la colocación de los mismos se realizaron calicatas (pozos de aproximadamente 1 m x 1 m x 1,2 m de profundidad) en una de cuyas caras se colocaron 5 sensores a una distancia aproximada entre ellos de 0,2 m en profundidad para el caso de Don Tomás (Figura 2.8) y La Cantera y de 0,1 a 0,15 m en La Nueva Esperanza debido a que los suelos son menos profundos. En la Figura 2.9 se pueden observar en detalle los sensores, los cuales van unidos a un registrador mediante un cable. El registrador permite almacenar una gran cantidad de datos lo cual favorece la calidad de la información obtenida así como también la posibilidad de no perder información si el período entre visitas de campo se ve incremento.

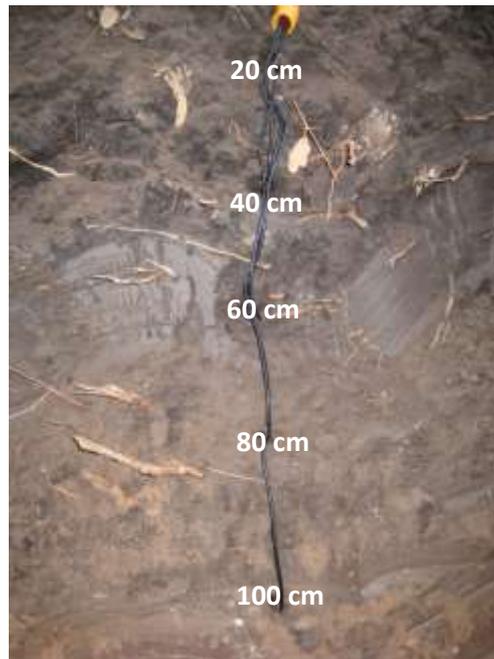


Figura 2.8 Detalle de la instalación de los sensores de humedad en el suelo en la microcuenca forestada Don Tomas



Figura 2.9 Sensores de registro continuo de humedad de suelo

2.4.3 BALANCE HÍDRICO DE THORNTHWAITE Y MATHER

Para los sitios experimentales Don Tomás y Nueva Esperanza se realizó el balance hídrico mensual de suelos siguiendo la metodología de Thornthwaite y Mather (1957) (T&M) para el período enero 2012-setiembre 2015.

El balance hídrico de T&M permite una caracterización de la dinámica del agua en el suelo en base a la oferta de agua (precipitación), a la demanda hídrica (evapotranspiración potencial o de referencia) y a la capacidad de almacenaje de agua del suelo. El modelo asume como supuestos que el primer destino de la precipitación (P) es la evapotranspiración de referencia (ETP), que la precipitación es efectiva y que los excesos hídricos no son acumulables de un mes al otro. Considera que los excedentes se disipan de un período al siguiente.

El primer paso del procedimiento discrimina si hay P que excede o no a la ETP. Si P supera la ETP se incrementará el agua almacenada en el suelo hasta su máxima capacidad de almacenaje de agua disponible (caad), sucesivas diferencias positivas entre P y ETP -superiores a la caad- representarán excesos hídricos. Si ETP es superior a P, representa mm de ETP no cubiertos por la P, se considerarán mm de pérdidas potenciales y deficiencias máximas que se darían si el almacenaje del suelo no dispusiera de agua para compensar parcial o completamente esta diferencia. La evapotranspiración real (ETR) surge del efecto combinado de la demanda atmosférica y la oferta de agua (P y agua disponible en el suelo). Cuando la diferencia de P y ETP es positiva, la $ETR = ETP$, cuando la diferencia entre P y ETP es negativa, la ETR se obtiene como la sumatoria de la lluvia más el valor absoluto de la variación de almacenaje. Esta última representa los mm de agua que proporciona el suelo a la ETR. Las deficiencias hídricas corresponden a los mm de diferencia entre la ETP y la ETR.

Como una primera aproximación de indicador de deficiencia se calculó la deficiencia de evapotranspiración relativa (DETrel) (Doorenbos y Kassan, 1986) $DETrel = 1 - ETR/ETP$. Los valores de $DETrel = 1$ indican valores máximos de deficiencia donde la oferta de agua (precipitación + agua disponible en suelo) es insuficiente para el proceso evapotranspirativo. Valores de $DETrel = 0$ reflejan condiciones de nula deficiencia donde la tasa evapotranspirativa no presentaría limitantes hídricas para su expresión potencial.

2.5 BALANCE HÍDRICO Y RECARGA DE ACUÍFEROS

La ecuación del balance hídrico, estacional o anual, para una cuenca cualquiera está dada por:

$$P - ETR - Q_s = \pm \Delta S \pm \Delta GW \quad [1]$$

donde: P = precipitación incidente (mm)

ETR = evapotranspiración real (mm)

Q_s = caudal específico medido a la salida de la cuenca (mm)

ΔS = cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (mm)

ΔGW = cambio en el almacenamiento del acuífero superior (mm)

La evapotranspiración real (ETR) se puede reescribir como:

$$ETR = I + E + T \quad [2]$$

Donde I es la intercepción, E la evaporación del suelo y T la transpiración. En lo que sigue, la suma de E y T se denota como ET .

La intercepción del dosel se calcula como:

$$I = P - (P_d - P_f) \quad [3]$$

Donde P_d representa la precipitación directa y P_f el escurrimiento fustal. La intercepción de las pasturas naturales se asume del mismo orden que la intercepción de las áreas cortafuegos, áreas riparias y el mantillo.

El balance contempla también la recarga de aguas subterráneas:

$$GW_{rec} - GW_{desc} = \pm \Delta GW \quad [4]$$

Donde GW_{rec} representa la recarga y GW_{desc} la descarga de aguas subterráneas

El balance de aguas subterráneas se realiza combinando dos métodos: separación empírica del hidrograma y fluctuaciones del nivel freático. El primer método separa el flujo total en escurrimiento superficial y flujo base, y asocia el último a las descargas de flujo subterráneo (Risser et al., 2005). El Segundo método asume que las variaciones del nivel piezométrico en acuíferos libres se debe a los procesos de recarga y descarga (Fan et al., 2014).

Para separar el hidrograma medido a la salida de las microcuencas se utilizó un filtro digital de un parámetro (Eckhardt, 2005):

$$Q_{s,srf}^i = \alpha Q_{s,srf}^{i-1} + (1 + \alpha)(Q_s^i - Q_s^{i-1})/2 \quad [5]$$

donde $Q_{s,srf}^i$ representa el escurrimiento superficial en el instante de tiempo i , Q_s^i es el escurrimiento total en el tiempo i y α es el parámetro del filtro.

El flujo base $Q_{s,base}^i$ se computa sustrayendo el escurrimiento superficial del escurrimiento total:

$$Q_{s,base}^i = Q_s^i - Q_{s,srf}^i \quad [6]$$

El método de las fluctuaciones del nivel freático asume las siguientes expresiones para la recarga y descarga de aguas subterráneas:

$$GW_{rech} = \begin{cases} \Delta H S_y & \text{if } \Delta H > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta H \leq 0 \end{cases} \quad [7]$$
$$GW_{disch} = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta H > 0 \\ \Delta H S_y & \text{if } \Delta H \leq 0 \end{cases}$$

donde GW_{rech} y GW_{disch} representan la recarga y descarga, ΔH las fluctuaciones del nivel freático y S_y es el rendimiento específico del acuífero (specific yield en la literatura anglosajona).

El flujo base y la descarga fueron calculados diariamente. El valor óptimo del parámetro α del filtro se determine por inspección visual del hidrograma y la separación del mismo en escurrimiento superficial y flujo base. Los valores del rendimiento específico S_y fueron elegidos de modo que las descargas estacionales de aguas subterráneas fueran equivalentes al flujo base.

2.6 MODELOS HIDROLÓGICOS SIMPLES

2.6.1 INTERCEPCIÓN DEL DOSEL FORESTAL

Para la simulación de la intercepción se utilizó el modelo de Gash, en él se considera la precipitación como una serie de eventos en cada uno de los cuales se cumplen las siguientes tres etapas: la primera es la etapa de mojado y se da entre el comienzo del evento y la saturación del dosel; la segunda es la de saturación ocurre luego que la precipitación excede la necesaria para la saturación del dosel cuya superficie permanece mojada durante toda la etapa; finalmente se da el secado que ocurre entre el final de la lluvia y hasta el secado completo del dosel y los troncos. El marco conceptual del modelo fue esquematizado en Gash (1979) y considera al dosel y los fustes como reservorios que son llenados por la precipitación y vaciados por la evaporación y el drenaje y estima las tasas de entrada y salida de esos compartimientos. La estructura del dosel se describe mediante el coeficiente de atravesamiento libre (p_d) y la capacidad máxima de almacenamiento (S) mientras que para los fustes se considera el coeficiente de redistribución fustal (pf) y la capacidad máxima de almacenamiento de los fustes (S_f).

Posteriormente Gash et al. (1995) reformulan el modelo para hacer viable su aplicación a bosques de dosel ralo considerando las siguientes modificaciones:

- $E_c = E/c$ es la tasa de evaporación desde el dosel, calculada por Penman Monteith, se considera nula la evaporación del área sin cobertura de dosel
- $S_c = S/c$ es la capacidad de almacenamiento del dosel por unidad de área cubierta, siendo c la cobertura del dosel
- El exceso de precipitación se deriva a los troncos recién después de haber saturado al dosel

Las distintas componentes de la intercepción se calculan según se muestra en la Tabla 2.4 y al igual que la versión original la intercepción se calcula a partir de la precipitación diaria asumiendo un único evento por día.

Tabla 2.4 Parámetros y formulación del modelo de Gash para dosel ralo [adaptado de Gash et al., 1995]

Parámetros	Formulación
Cobertura del dosel	$c = 1 - p_d$
Tasa media de evaporación del dosel	$\bar{E}_c = \bar{E} / c$
Capacidad máxima de almacenamiento del dosel	$S_c = S / c$
Precipitación necesaria para saturar el dosel	$P' = -\frac{\bar{P}}{\bar{E}_c} S_c \cdot \text{Ln} \left(1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{P}} \right)$
Componente de la intercepción	Formulación
Evaporación desde el dosel para los m eventos con $P \leq P'$, insuficientes para saturar el dosel.	$c \cdot \sum_{j=1}^m P_j$

Evaporación desde el dosel, para los n eventos con $P > P'$, que lo saturan. El primer término corresponde a la etapa de mojado y el segundo al secado luego de que finaliza el evento.	$n.c.P' + \frac{c.\overline{E}_c}{P} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_j)$
Evaporación desde los troncos, para los q eventos con $P > P'' = S_f / p_f$ que los saturan.	$q.S_f$
Evaporación desde los troncos, para los n-q eventos con $P \leq P'' = S_f / p_f$ que no los saturan.	$p_f \sum_{j=1}^{n-q} P_j$

2.6.2 MODELO DE ZHANG.

Zhang et al (1999) proponen un modelo simple para cuantificar el impacto de los cambios en la cobertura vegetal en la evapotranspiración media anual (ET) a escala de cuencas, basado en datos y parámetros fácilmente obtenibles a escala regional. En el mismo se asume que la ET en una cuenca es la suma de la ET de la vegetación herbácea y la ET de la cobertura forestal, afectando en forma lineal de acuerdo a las respectivas áreas.

El mismo, en su forma más simple, se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w \frac{E_0}{P}}{1 + w \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P}\right)^{-1}} \quad [8]$$

Donde ET es la evapotranspiración media anual (mm), P es la precipitación anual (mm), E₀ es la evapotranspiración potencial (mm) y w es el coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo y representa las diferencias en como las distintas coberturas utilizan el agua del suelo.

Los parámetros del modelo, E₀ (evapotranspiración potencial) y w (coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo) se consideran constantes para cada una de las coberturas, surgen del análisis de un gran número de estudios de balance hídrico en cuencas con diferentes coberturas y con distinto porcentaje del área afectada por pasturas y forestación, así como también afectadas por diferentes situaciones climáticas y tipos de suelos.

Parámetro	Cobertura Forestal	Cobertura herbácea
E₀	1400	1100
W	2.0	0.5

La aplicación del mismo para determinar la evapotranspiración media anual a situaciones con ambas coberturas toma la siguiente forma.

$$ET = \left(f \frac{1 + 2 \frac{1410}{P}}{1 + 2 \frac{1410}{P} + \frac{P}{1410}} + (1 - f) \frac{1 + 0.5 \frac{1100}{P}}{1 + 0.5 \frac{1100}{P} + \frac{P}{1100}} \right) P. \quad [9]$$

Donde f es la proporción del área bajo cobertura forestal y $(1-f)$ la del área bajo pasturas herbáceas.

La relación anterior sugiere que la evapotranspiración media anual bajo las mismas condiciones climáticas está determinada, principalmente, por las características de la vegetación y las diferencias podrían ser atribuidas a la forma en que los distintos tipos de vegetación hacen uso del agua del suelo.

2.6.3 MODELO DE TEMEZ

El modelo de Temez (1977) es un modelo de balance hídrico agregado, que permite estimar el escurrimiento mensual generado en una cuenca a partir de la precipitación, el almacenamiento en el suelo y la evapotranspiración potencial. Reproduce el ciclo hidrológico de forma continua en el tiempo de una manera simple y conceptual. El modelo considera dos capas de suelo, una superior no saturada, y una inferior saturada. Estas dos capas pueden ser consideradas como reservorios, generadoras de un flujo superficial rápido y lento respectivamente. Una parte excedente (T) del agua que precipita (P), es drenada y sale por el cauce, mientras que el resto de esta agua ($P-T$) es almacenada en la primer capa de suelo. En esta capa del suelo se genera la evapotranspiración. El modelo permite además almacenar agua que pase de un mes a otro.

El esquema general de cálculo se presenta en la Figura 2.10, un mayor detalle de la estructura del modelo y su calibración en Uruguay se presenta en “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas” (MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011).

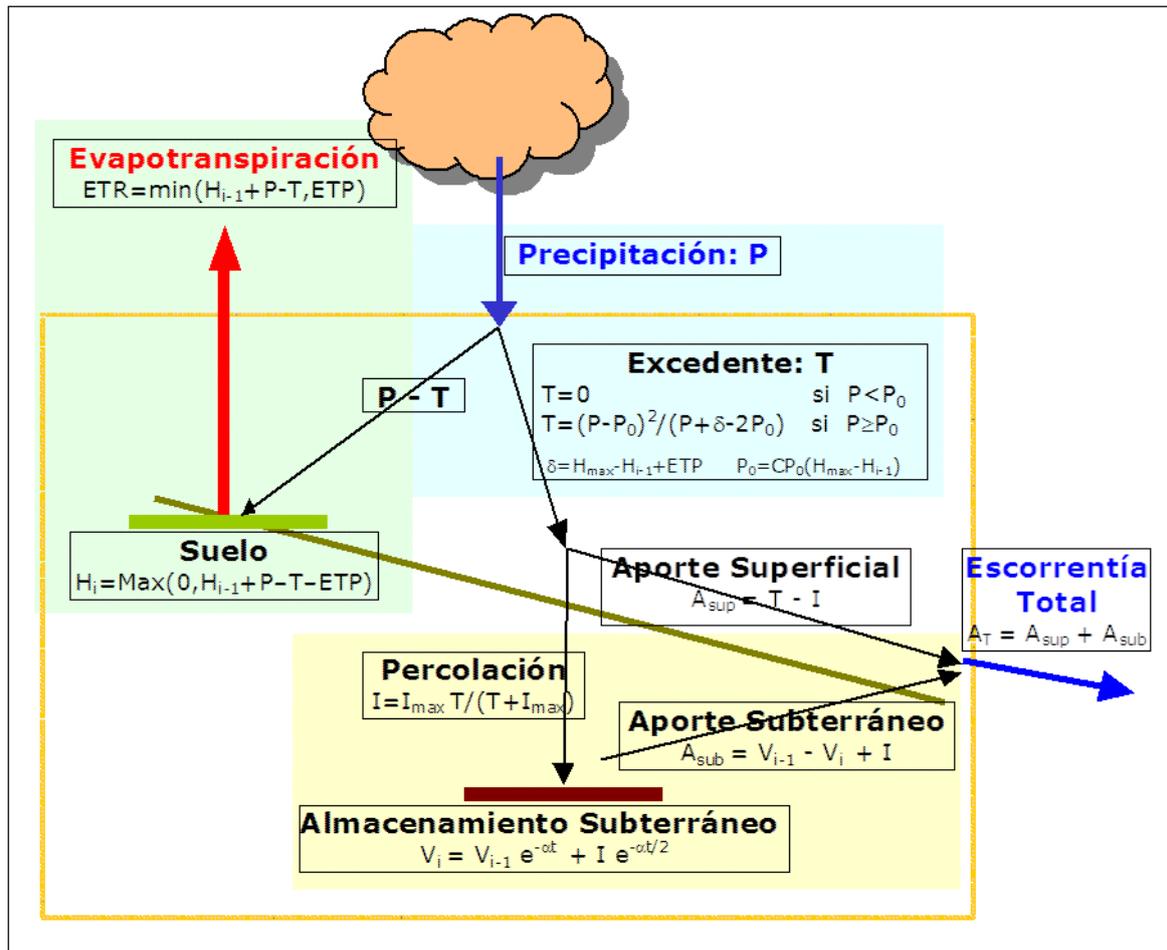


Figura 2.10 Esquema matemático del modelo de Temez.

2.6.4 MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos de transformación Precipitación-Escorrimento NRCS (USDA, 2010) y SWAT (Neitsch, 2011) fueron implementados en cada una de las micro-cuencas, con el objetivo de establecer el cambio en los parámetros de los modelos, debido al cambio de uso de suelo entre pastura natural y monte forestal.

2.6.4.1 Modelo hidrológico NRCS

La metodología clásica de estimación de volumen de escorrentía y caudales extremos, se basa en las recomendaciones del National Engineering Handbook elaborado por el Natural Resources Conservation Service-NRCS-USDA (ex. Soil Conservation Service-SCS). Dada una tormenta extrema, el método consiste en, por un lado, determinar la precipitación efectiva utilizando el método de “número de curva”, y por otro lado obtener el hidrograma de crecida aplicando sobre la precipitación efectiva el método del “hidrograma unitario”.

El método del número de curva considera los principales factores que afectan la generación de escurrimiento, incluyendo las características hidrológicas de los suelos, la cobertura y el manejo de los mismos y las condiciones antecedentes de humedad. Todos estos factores están combinados en un índice, llamado Número de Curva de Escurrimiento (“CN”), parámetro característico del método. (Sartori, et. al, 2010). Su aplicación

consiste en la selección de dicho parámetro en tablas publicadas en el manual del NRCS, elaboradas a partir de información hidrológica de cuencas ubicadas en Estados Unidos.

La necesidad de adaptar el método a las condiciones locales, en particular en relación a la climatología y funcionamiento hidrológico de los suelos, ha motivado la realización de diversos estudios desarrollados para cuencas de Uruguay, por ejemplo: Molfino (2001); Silveira (2000). Todos estos estudios vinculados a la aplicación del método de número de curva, fueron realizados en cuencas del Uruguay cuya cobertura principal es pasturas naturales.

En el marco del proyecto INIA-FPTA-210 (Silveira et. al, 2010), desarrollado por el mismo equipo de investigadores que el presente proyecto, se realizó el primer análisis de la variación del Número de Curva debido al cambio de uso de suelo a monte forestal. Dicho primer análisis incluyó solamente 5 eventos registrados, que para el tipo de problema bajo estudio resultan insuficientes a efectos de obtener conclusiones firmes. En este proyecto Alianzas ANII-FJR, se investiga la variación del parámetro número de curva debido al cambio de uso de suelo entre pastura natural y monte forestal, sobre la base de 43 eventos registrados entre 2006 y 2014, continuando y ampliando lo realizado en el proyecto previo.

A nivel internacional, la última versión revisada del National Engineering Handbook (NRCS, 2007), da cuenta de la variación del número de curva en cuencas de Estados Unidos, debido al área plantada de bosque para determinadas especies, entre las que no se consideran los bosques de Eucaliptos y Pino; especies de mayor interés en el Uruguay debido a la superficie plantada de los mismos.

Método CN-NRCS.

El análisis de la variación del número de curva debido al cambio de uso de suelo (pastura natural a monte forestal) se realizó utilizando la información registrada de precipitación y caudal en las cuencas Don Tomás (cobertura monte forestal) y La Cantera (cobertura pastura natural). La estimación del número de curva se realizó aplicando las ecuaciones del modelo CN del NRCS, en base a los datos medidos en cada sub-cuenca. En aquellos casos que la precipitación del evento supera el volumen de abstracción inicial, la relación entre el volumen de escorrentía (V_{esc}), la precipitación (P) y el almacenamiento máximo potencial (S) es:

$$V_{esc} = \left(\frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \right) \quad [10]$$

La ecuación [10], puede escribirse también como:

$$S = 5 \left(P + 2V_{esc} - \sqrt{4(V_{esc})^2 + 5PV_{esc}} \right) \quad [11]$$

Para ambas cuencas se dispone de datos de P y V_{esc} y se pretende obtener CN, que está relacionado con S de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad [12]$$

Combinando las ecuaciones [11] y [12], se obtiene la ecuación [13] que es aplicada directamente para cada evento en ambas cuencas.

$$CN = \frac{25400}{254 + 5 \left(P + 2V_{esc} - \sqrt{4(V_{esc})^2 + 5PV_{esc}} \right)} \quad [13]$$

Flujo base y Volumen de escorrentía

Si bien se cuenta con los hidrogramas medidos para cada evento en los puntos de cierre de ambas cuencas (La Cantera y Don Tomás), el área bajo el hidrograma no es exactamente el volumen de escorrentía de las ecuaciones [10], [11] y [13]. El modelo del NRCS trabaja con el volumen de escorrentía correspondiente a una tormenta extrema y por lo tanto es necesario restar el flujo base (aporte de agua subterránea regional) y el flujo sub-superficial lento.

El flujo base correspondiente al aporte de agua subterránea regional, fue estudiado en el marco de este proyecto y es nulo para la cuenca Don Tomás y corresponde a 5.4 l/s para la cuenca La Cantera. El flujo sub-superficial lento, no fue medido de forma sistemática pero en una primera aproximación en base a la forma de la rama descendente de los hidrogramas medidos, puede asumirse que corresponde a un 2.5 % del volumen total del hidrograma. En base a estos valores, se obtuvo el Volumen de escorrentía generado en cada evento, a ser utilizado en las ecuaciones [10], [11] y [13].

De esta forma se calcularon los valores del número de curva para cada evento y cuenca en base a la metodología del NRCS.

Método Asintótico (Hawkins, 1993).

El método asintótico es un procedimiento gráfico y analítico, que se basa en asumir que el número de curva de una cuenca definido a partir de datos observados es función del volumen precipitado.

El primer paso es calcular para cada evento el volumen total de precipitación (P) y el volumen de escurrimiento (Vesc) asociado al evento. A partir de ello determinar el valor de CN a partir de la ecuación [13].

Dado que el número de curva es función de la magnitud de la precipitación del evento, tres posibles comportamientos de la función $CN=f(P)$, pueden ser observados (Hawkins, 1993) :

- a) Comportamiento principal- El número de curva es decreciente con el aumento de la precipitación aproximándose a un valor constante: CN_{∞} . Este comportamiento puede ser representado por la ecuación:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})e^{-kP} \quad [14]$$

donde el parámetro k es una constante de decaimiento con dimensiones de 1/mm, a ser ajustado para cada cuenca. En este sentido, el valor de CN_{∞} , será el número de curva de referencia.

- b) Comportamiento complaciente: El número de curva calculado es decreciente con el aumento de la precipitación sin aproximarse a un valor constante. La determinación del número de curva de referencia en estos casos puede ser hecha mediante el ajuste de la ecuación $CN=f(P)$ a los datos observados y asumiendo que para precipitaciones mayores a las registradas el comportamiento será de tipo principal. En este sentido, el valor de CN_{∞} , será el número de curva de referencia.
- c) Comportamiento violento: El número de curva calculado es decreciente con el aumento de la precipitación como en el caso complaciente, aumentando abruptamente a partir de cierto valor tendiendo a un valor constante de referencia CN_{∞} . Este comportamiento puede ser representado mediante la formulación:

$$CN(P) = CN_{\infty} (1 - e^{-kP}) \quad [15]$$

Una vez determinado el comportamiento de la función CN (P) para cada una de las cuencas, se determina el coeficiente CN de referencia utilizando las expresiones 13 ó 14. Finalmente son comparados los resultados obtenidos a partir del método asintótico con los obtenidos de la aplicación directa del NRCS.

2.6.4.2 **Modelo hidrológico SWAT**

El modelo SWAT (Soil & Water assesment Tool) fue desarrollado para predecir el impacto sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos de las prácticas de manejo de suelos y cultivos, la producción y transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas y la variabilidad climática en grandes cuencas.

Es un modelo pensado para estimar respuestas de largo plazo y no para el tránsito detallado de eventos. Ha respondido satisfactoriamente a la simulación continua de paso diario mientras que está siendo testeado para su implementación en escalas temporales menores (horaria). La distribución espacial del modelo consiste en dividir la cuenca en múltiples subcuencas y éstas a su vez en distintas unidades de respuesta hidrológica (HRU) que agrupan combinaciones de tipo de suelo, uso de suelo y pendiente de terreno, sin localización asignada dentro de la subcuenca.

La simulación de la relación precipitación-escorrentía se hace en una primera etapa mediante el balance hídrico en la subcuenca y posteriormente mediante el tránsito por la red de drenaje del volumen de agua calculado. El módulo hidrológico del SWAT considera los siguientes procesos (Neitsch, 2011):

- Intercepción del dosel o canopia: si se utiliza el método del número de curva para estimar el escurrimiento esta pérdida ya es tenida en cuenta, de lo contrario puede considerarse por separado mediante un almacenamiento máximo y la variación del índice de área foliar (IAF)
- Infiltración: El SWAT contiene dos opciones para su estimación
 - Método del número de curva: simula el volumen a escurrir y obtiene la infiltración por diferencia.
 - Green & Ampt: calcula infiltración a partir de información de precipitación con paso temporal menor al diario (h)
- Redistribución del agua en el perfil del suelo: modela las distintas capas del suelo como reservorios con un almacenamiento máximo dado y el flujo se gobierna con la conductividad hidráulica saturada.
- Evapotranspiración: Se calcula por separado en el suelo y la vegetación. La evaporación del suelo se estima como función de la ETP y el índice de área foliar (IAF). La evapotranspiración real se estima con funciones exponenciales de la profundidad del suelo y el contenido de agua. La transpiración de cultivo se simula como función lineal de la ETP y el IAF. Cuando se computa la componente de intercepción del dosel es la primera en ser removida por evaporación. El SWAT maneja tres opciones para la estimación de la ETP: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith.
- Escurrimiento subsuperficial: este flujo lateral se calcula en simultáneo con la componente de redistribución de agua en el suelo (para una profundidad de hasta 2 m). Usa el modelo de onda cinemática (Borah et al, 2007).
- Escurrimiento superficial: El volumen se calcula utilizando una modificación del método SCS (USDA, 1972) con el número de curva variable en forma no lineal respecto al contenido de agua del suelo. La segunda alternativa es la resultante del modelo de Green-Ampt.

El caudal máximo se estima mediante una modificación del Método Racional en la que el caudal máximo es función de la proporción de precipitación del día que ocurre hasta el tiempo de concentración, calculada con una técnica estocástica. El tiempo de concentración de la subcuenca se estima con la fórmula de Manning considerando flujo superficial y por el canal principal de la red de drenaje de la subcuenca.

2.7 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, Nº 56. 300 p.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 377-382.
- Doorembos, J., Kassam A. H. 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, FAO. 212 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no.33)
- Fan J, Oestergaard KT, Guyot A and Lockington, Da. 2014. Estimating groundwater recharge and evapotranspiration from water table fluctuations under three vegetation covers in a coastal sandy aquifer of subtropical Australia. *Journal of Hydrology* 519: 1120-1129.
- Ford, E.D. y Deans, J.D. (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15: 901-917.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forest. *Quart. J. R. Soc.*, 105, pp 43-55.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170:79-86.
- Hawkins, R.H. (1993), "Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data" *Journal of Irrigation and Drainage*. ASCE, 119(2), pp. 1471-1476.
- Huber, A., Iroumé, A. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology* 10(1-4):78-92
- Huber, A., Oyarzún, C., Ellies, E. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque*, 6(2), 74-82.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 635-662.
- Likens, G. E., Eaton, J. S. 1970. A polyurethane stemflow collector for trees and shrubs. *Ecology*, v. 51, n. 5, p. 938-939.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. y King K.W. (2011). *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation - Version 2009*, Technical Report TR-406, Texas Water Resources Institute, College Station, TX, 2011.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service-USDA (2010). "National Engineering Handbook", Part 630: Hydrology.
- Risser DW, Conger RW, Ulrich JE and Asmussen MP. 2005. Estimates of groundwater recharge based on streamflow-hydrograph methods: Pennsylvania. US Geological Survey Open-File Report 2005–1333.
- Sartori, et. al. (2010). "Investigação do parâmetro CN para duas bacias cultivadas com eucaliptos". *Memorias del Congreso Latinoamericano de Hidráulica-IAHR*, Punta del Este 2010.
- Silveira, L.; Chreties, C.; Alonso, J.; Amorín, C; De Izaguirre, P.; Crisci, M.; Symonds, S; Martínez, L.; García Petillo; García Prechac, F; Delgado, S.; Clérici, C.; Bentancor, L.; Hill, M.; Alliaume, F.; Iroumé, A; Huber, A.; Cabral, P; Audicio, P. 2011. "Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas", Serie Técnica INIA. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo.
- Témez, J. R. 1977. Modelo matemático de transferencia de precipitación-aportación. Madrid: ASINEL.

Thornthwaite, C. W., Mather, J. R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. Publication in Climatology. 10 (3): 185-311.

USDA, S. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington, DC.

Zhang L, Dawes WR and Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research 37(3): 701-708.

Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology CSIRO Land and Water. Technical report 99/12, November, 1999.

3. CANTIDAD DE AGUA - RESULTADOS

3.1 BALANCE HÍDRICO Y RECARGA

3.1.1 BALANCE HÍDRICO DON TOMÁS Y LA CANTERA

El balance hídrico estacional y anual se calculó según las ecuaciones propuestas en el Capítulo 2.5. El balance resultante se presenta en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Los valores faltantes de precipitación mensual se rellenaron aplicando la correlación que se encontró entre LC y DT ($R^2=0,973$).

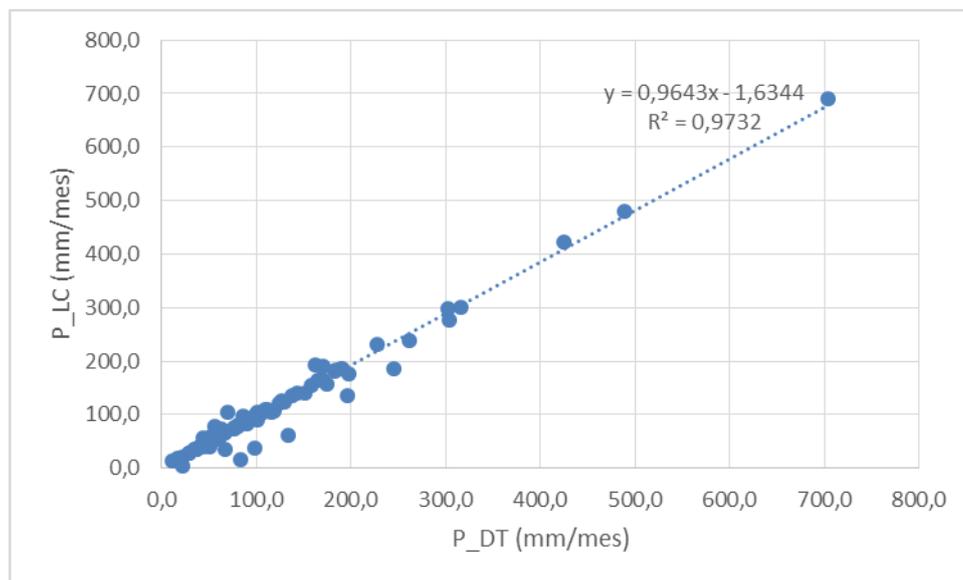


Figura 3.1 Correlación entre datos mensuales de precipitación medida en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)

En lo que refiere a datos faltantes de caudales mensuales se utilizaron dos procedimientos: los datos faltantes de caudales en LC se rellenaron utilizando la relación aceptable entre precipitación y caudal específico mensual ($R^2=0,734$), que se observa en la Figura 3.1; mientras que en DT se utilizó la relación entre caudales específicos medidos en DT y LC ($R^2=0,844$) que se presenta en la Figura 3.3, puesto que la correlación entre precipitación y caudales mensuales no es satisfactoria, probablemente debido a la dispersión de los datos, lo que se puede asociar a que dicha correlación no considera factores como la intensidad de la lluvia y la interceptación, que inciden en el caudal medido en la microcuenca.

Tabla 3.1 Balance hídrico anual (en mm) calculado en las microcuencas DT y LC en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.

Año hídrico	DON TOMAS (DT) (Plantación forestal)									LA CANTERA (LC) (Pasturas naturales)						
	ET	P	I	Q_s	ΔS	ΔGW	GW_{rec}	GW_{desc}	ETR	P	Q_s	ΔS	ΔGW	GW_{rec}	GW_{desc}	ETR
Oct 06–Set 07	859	1545	296	355	35				1155	1508	679	65				764
Oct 07–Set 08	661	927	188	79	0				849	930	285	2				643
Oct 08–Set 09	640	792	162	7	-18				802	817	179	-6				643
Oct 09–Set 10	1253	2523	425	772		73	381	308	1678	2418	1158		15	329	314	1245
Oct 10–Set 11	551	1231	200	484		-5	197	202	751	1245	545		-3	223	226	702
Oct 11–Set 12	651	1445	213	549		32	305	273	864	1484	735		9	269	260	740
Oct 12–Set 13	702	1817	336	818		-38	363	401	1038	1767	916		53	353	300	797
Oct 13–Set 14	889	1601	320	444		-52	329	382	1209	1566	862		-4	264	268	707

Tabla 3.2 Balance hídrico estacional (en mm) calculado en las microcuencas DT y LC en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.

Balance estacional	DON TOMAS (DT) (Plantación forestal)									LA CANTERA (LC) (Pasturas naturales)						
	ET	P	I	Q_s	ΔS	ΔGW	GW_{rec}	GW_{desc}	ETR	P	Q_s	ΔS	ΔGW	GW_{rec}	GW_{desc}	ETR
Oct 06–Mar 07	695	1122	217	141	69				912	1100	300	95				705
Abr 07–Set 07	164	423	79	214	-34				243	408	379	-31				59
Oct 07–Mar 08	404	618	132	75	8				536	616	179	-38				474
Abr 08–Set 08	257	309	56	3.6	-8				313	315	106	40				168
Oct 08–Mar 09	406	516	106	7.3	-3				512	542	110	-4				436
Abr 09–Set 09	234	276	56	0	-14				290	275	70	-2				207
Oct 09–Mar 10	960	1967	323	606		78	230	152	1283	1889	911		17	211	195	961
Abr 10–Set 10	293	557	102	167		-6	150	156	395	529	247		-2	117	120	285
Oct 10–Mar 11	226	437	86	193		-68	20	88	312	460	138		-39	41	80	362
Abr 11–Set 11	325	793	114	291		63	177	114	439	784	407		37	182	146	341
Oct 11–Mar 12	361	745	99	289		-4	160	164	460	784	309		-9	135	144	484
Abr 12–Set 12	290	700	114	260		36	145	109	404	700	426		18	134	116	257
Oct 12–Mar 13	506	1358	248	622		-18	189	207	754	1321	622		0	190	190	700
Abr 13–Set 13	195	460	88	196		-20	175	194	283	445	294		53	163	110	98
Oct 13–Mar 14	646	881	172	157		-94	98	192	818	849	380		-10	116	126	479
Abr 14–Set 14	243	721	148	287		42	231	189	392	716	482		6	148	142	228

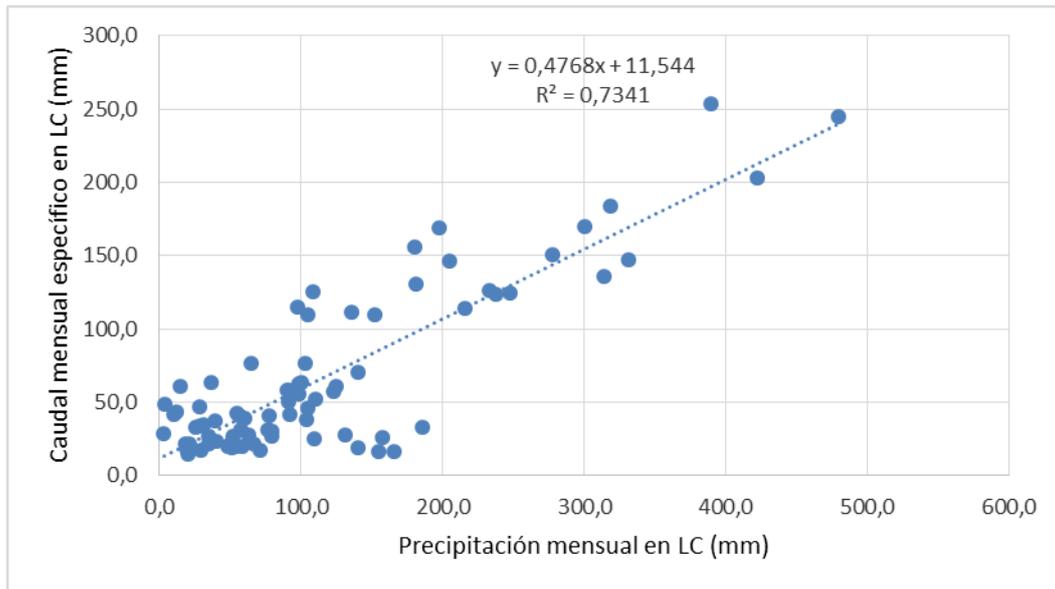


Figura 3.2 Correlación entre datos mensuales de precipitación y caudal específico medidos en la microcuenca La Cantera (LC)

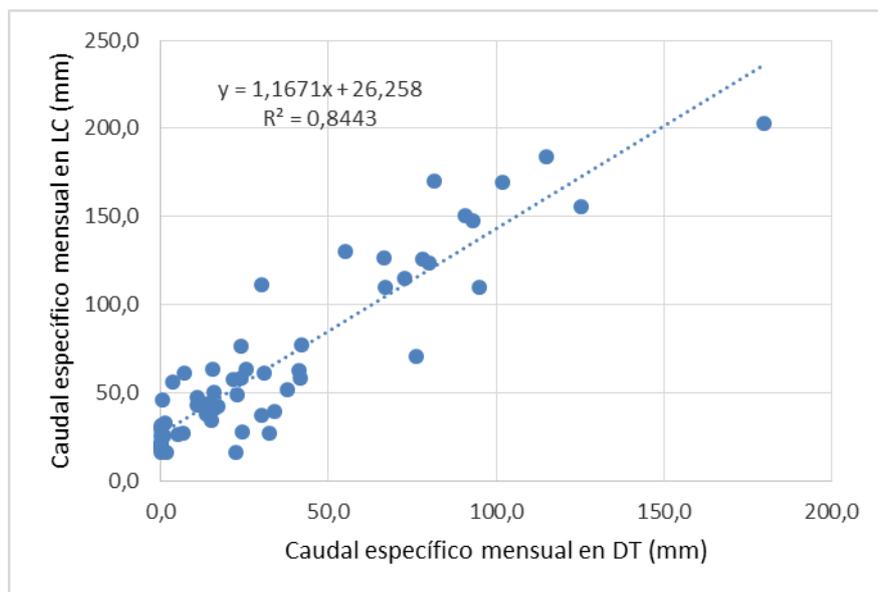


Figura 3.3 Correlación entre datos mensuales de caudales específicos medidos en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)

La intercepción se calculó según la ecuación planteada en el Capítulo 2. Los datos faltantes de intercepción debido a fallas de las instalaciones para medir precipitación directa (Pd) y escurrimiento fustal (Pf) se rellenaron utilizando un modelo de intercepción (Alonso, 2011), previamente calibrado según el modelo de intercepción de Gash et al. (1995).

Los datos del contenido de humedad del suelo solamente cubren los tres primeros años en que se calculó el balance hídrico, debido a fallas de la sonda de neutrones. Los valores estacionales y anuales calculados del cambio del contenido de humedad en el suelo de las dos microcuencas experimentales varían entre 2,2 y 95,4 mm (escala estacional) y entre 0,2 y 64,6 mm (escala anual), representando máximo 8,7% de la correspondiente precipitación estacional y 4,3% de la correspondiente precipitación anual.

Los cambios en el almacenamiento del acuífero superior fueron medidos a partir de Octubre de 2009, fecha en que se instalaron limnógrafos en cada piezómetro.

Reducción del escurrimiento

El indicador $RQ_{\text{específico}}$ (reducción del caudal específico) fue representado en función de la precipitación estacional y anual, mostrando una tendencia decreciente a medida que se incrementa la precipitación (Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6). Esos valores fueron comparados con el indicador I (pérdidas por interceptación del dosel) en las respectivas figuras. Sin embargo, los coeficientes de determinación (R^2) para la correlación entre la precipitación y $RQ_{\text{específico}}$ e I son relativamente bajos. Probablemente, esto se debe a que la precipitación acumulada (estacional o anual) no explica por sí sola las variaciones interestacionales o interanuales de esos indicadores hidrológicos. La reducción del caudal también depende de la distribución temporal de la lluvia, las condiciones meteorológicas (por ejemplo, nubosidad, radiación solar, temperatura) y el contenido de humedad del suelo. La Tabla 3.1 y

Tabla 3.2 muestran que los años extremos húmedos y secos dominaron sobre lo que históricamente se considera como años medios (precipitación media anual 1208 mm), con primaveras y veranos inusualmente lluviosos y otoños e inviernos secos. Los años hidrológicos entre Octubre 2006 y Setiembre 2014 pueden clasificarse en 4 años húmedos, 2 años secos y 2 años medios, según datos de la estación pluviométrica sita en Paysandú, de la que se cuenta con datos diarios desde 1950. La reducción anual del caudal específico varía entre 17 a 27% de la correspondiente precipitación anual, excepto para tres años en que ésta se sitúa entre 4 a 11,5%, probablemente debido a errores de medición no detectados. La reducción del caudal específico correspondiente a la precipitación media anual es 17,2%.

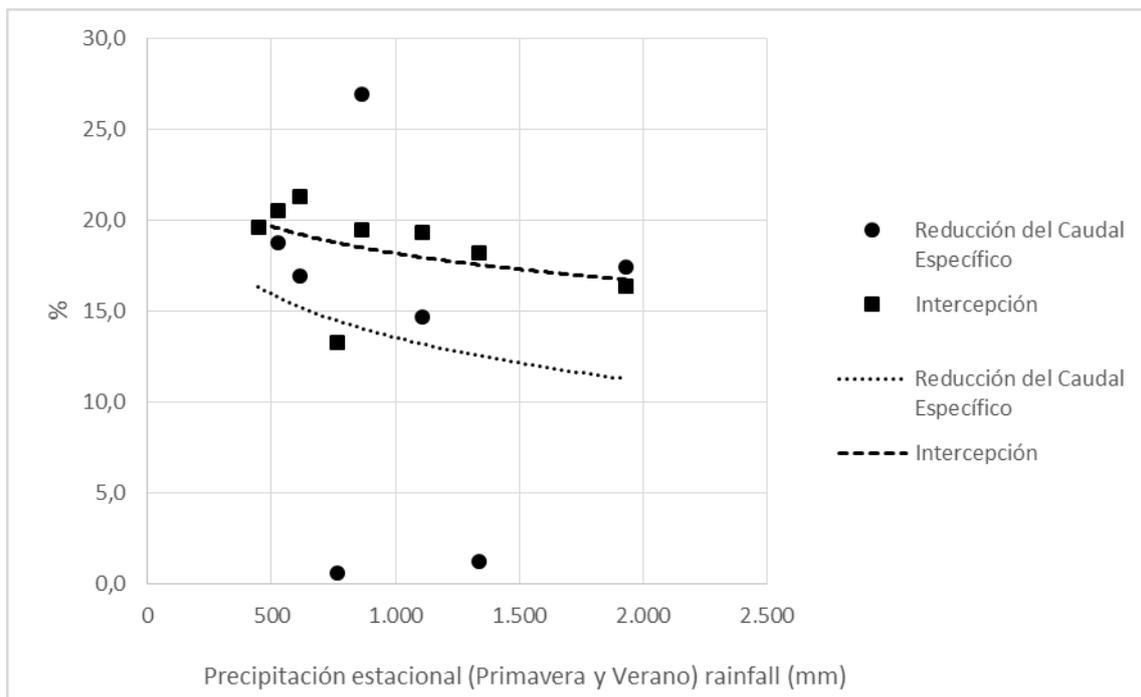


Figura 3.4 Relación entre la precipitación estacional (primavera y verano) y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la intercepción (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales)

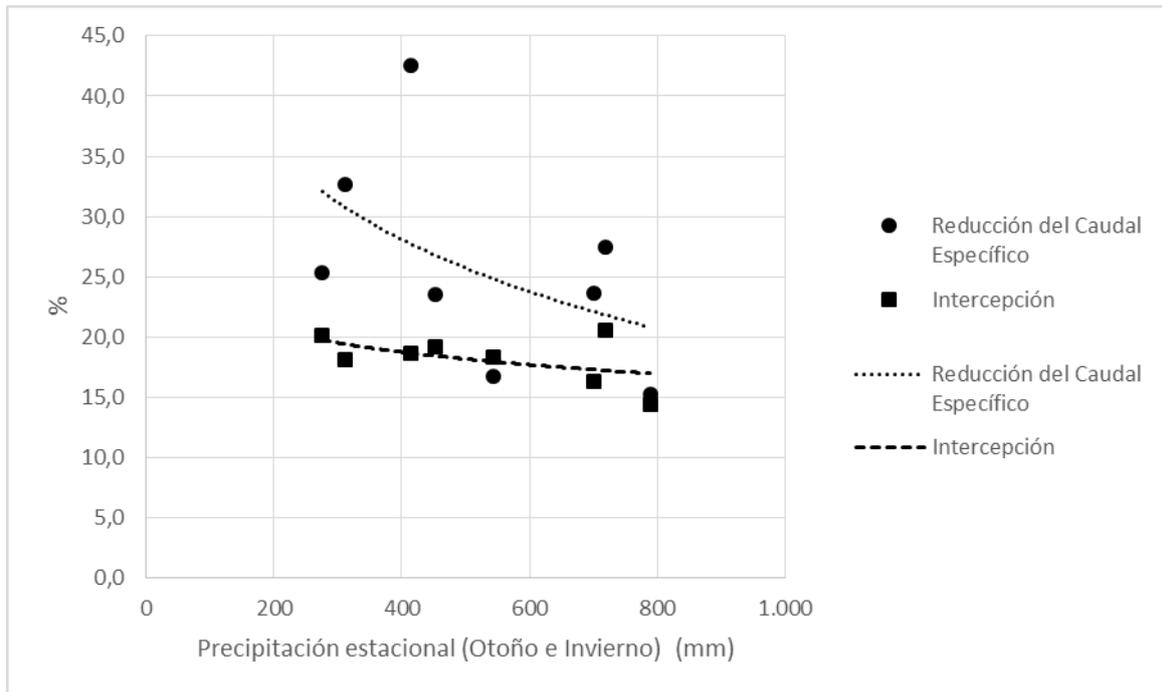


Figura 3.5 Relación entre la precipitación estacional (otoño e invierno) y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la intercepción (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales)

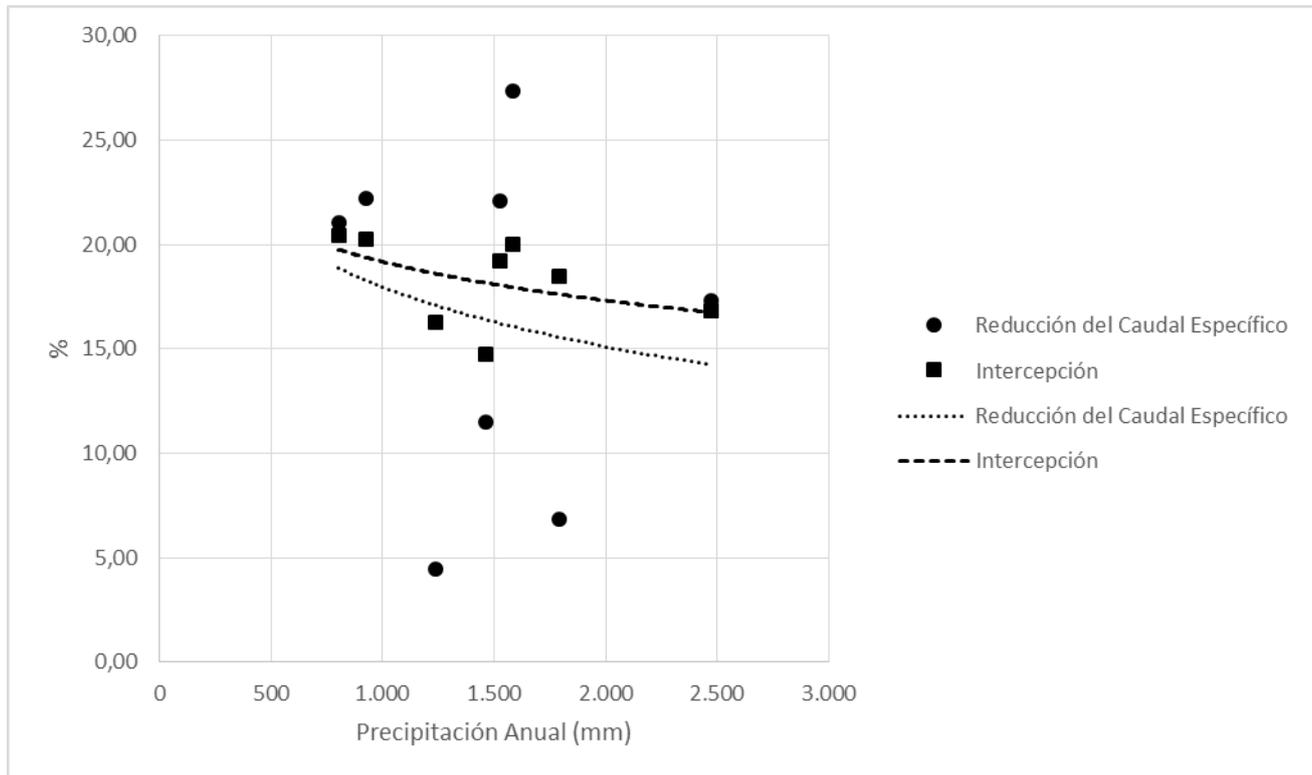


Figura 3.6 Relación entre la precipitación anual y la reducción del caudal específico (RQespecífico) y la intercepción (I), determinada en el par de microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales)

La Figura 3.4 muestra que la reducción del caudal específico es del orden del 16% en primaveras y veranos con una precipitación de 500mm. Sin embargo, en otoños e inviernos con una precipitación acumulada entre 275 a 400 mm, la reducción del caudal específico es mucho mayor, 32 a 28% de P, que son porcentajes elevados teniendo en cuenta que se trata de períodos anómalos, con déficit de precipitación, en que el porcentaje aplica a una cantidad de lluvia precipitada muy limitada. Estos resultados estacionales, que se basan en una serie de corta duración (8 años), dominada por anomalías, en que las primaveras y veranos se caracterizaron por excesos de lluvias y los otoños e inviernos por déficit de lluvias, son opuestos a los encontrados en una investigación previa con base en una serie extensa de 34 años de longitud (Silveira y Alonso, 2009). Ese trabajo, con base en datos de precipitación y caudal, pre- y pos-forestación, tuvo lugar en la cuenca Manuel Díaz, en el alto río Tacuarembó. La cuenca tiene una superficie de 2 097 km², de los cuales el 30% fue convertido en plantaciones de Eucalyptus y Pinus. El caudal específico disminuyó entre 36,5 y 8,2% en relación a lluvias anuales entre 900 y 1 700 mm, respectivamente. La investigación también mostró que la reducción del caudal específico es mayor en primavera – verano (Octubre a Marzo), disminuyendo entre 38,4 y 25,2%, y menor en otoño – invierno, en que decreció entre 20,3 y 15%, dependiendo en ambos casos de la precipitación acumulada estacionalmente.

Diferencia en la evapotranspiración real según la cobertura

Las Figura 3.7 y Figura 3.8, ilustran la diferencia en la evapotranspiración real (ΔETR), calculada estacional- y anualmente, en función de la precipitación acumulada en el correspondiente período. La ΔETR anual varía entre 4 y 32% de la correspondiente precipitación anual, con un valor medio de 18%. Sin embargo, las diferencias en la evapotranspiración real entre plantación forestal y campo natural alcanzan hasta un 46% en estaciones con déficit hídrico, probablemente debido a baja intensidad de lluvia y elevada intercepción, lo que

concuera con los resultados identificados en la Figura 3.5. A medida que la precipitación estacional y anual crece, ΔETR expresada como porcentaje de la correspondiente precipitación acumulada en el período decrece, probablemente debido a elevadas intensidades de lluvia y, por lo tanto, elevada precipitación directa.

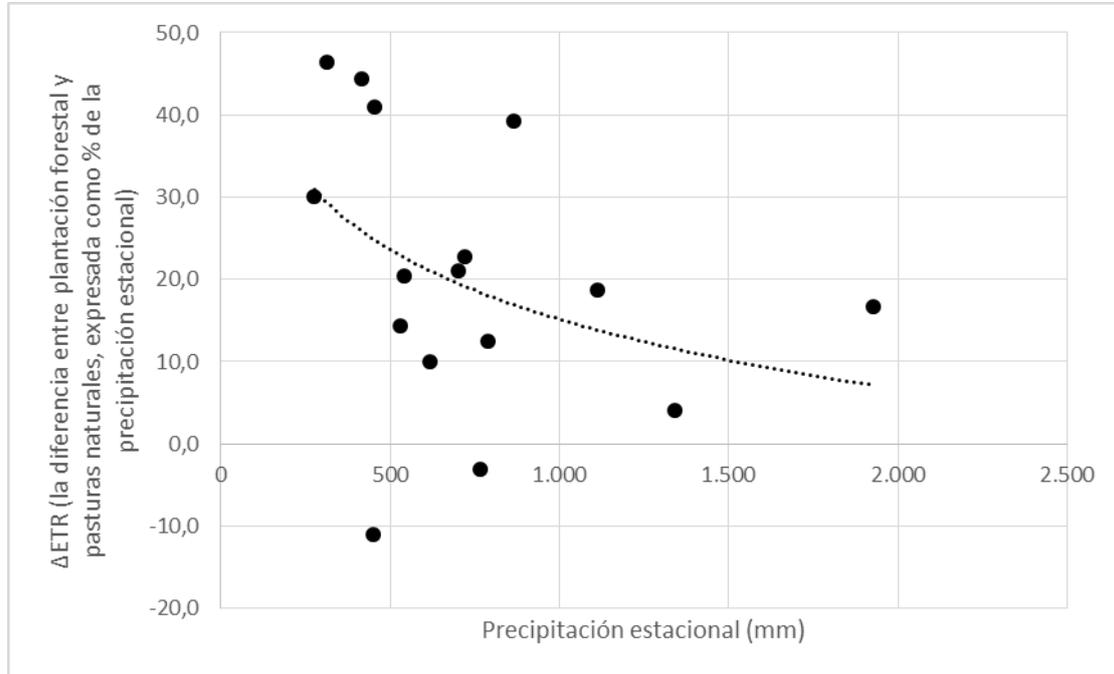


Figura 3.7 Diferencia estacional entre la evapotranspiración real entre plantación forestal y pasturas naturales, expresada como porcentaje de la precipitación estacional

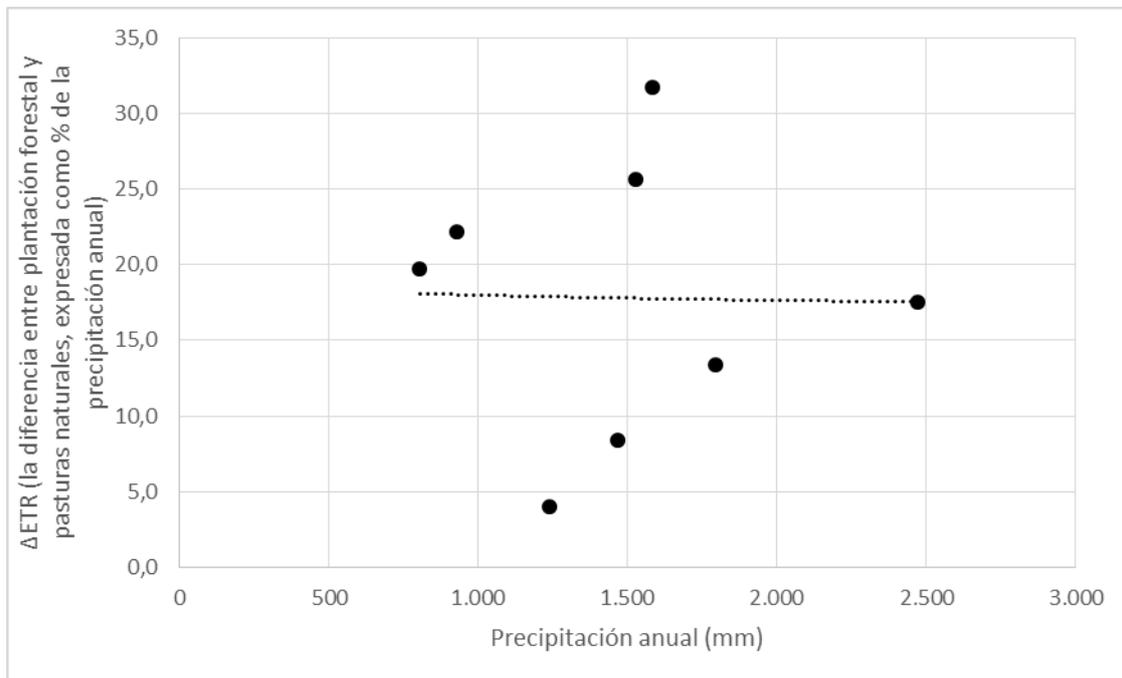


Figura 3.8 Diferencia anual entre la evapotranspiración real entre plantación forestal y pasturas naturales, expresada como porcentaje de la precipitación anual

Peel et al. (2002) representaron la diferencia en evapotranspiración real (ΔETR) entre plantaciones forestales (de hoja perenne y de hoja caduca, combinadas) y pasturas en relación a la precipitación anual, con base en las relaciones desarrolladas por Zhan et al. (1999, 2001), quienes utilizaron resultados de 250 cuencas experimentales de 29 países. El valor de ΔETR correspondiente a la precipitación media anual – 1 208 mm - en la zona litoral en que se ubican las microcuencas, es aproximadamente 22%, mientras que en el par de microcuencas DT y LC el valor resultante del balance hídrico es 18%. No obstante, si bien estos valores son consistentes, la figura desarrollada por Peel et al. (2002) muestra valores de ΔETR entre 5 y 21% para valores de precipitación anual menores a 1 000 mm (años secos), mientras que los resultados obtenidos en las microcuencas muestran que ΔETR es próxima a 18% para valores de precipitación entre 800 y 1 000 mm. La baja intensidad de las lluvias combinada con el clima y la existencia de un acuífero libre próximo a la superficie del terreno, probablemente expliquen dichas diferencias.

La Figura 3.9 reproduce las curvas desarrolladas por Zhan et al. (1999, 2001), que representan ETR para cuencas forestales y cuencas cubiertas por pasturas, en función de la precipitación anual. La Figura muestra también los valores de ETR resultantes del balance hídrico en LC y DT, mostrando un ajuste aceptable excepto para el año con precipitación anual más extrema por exceso.

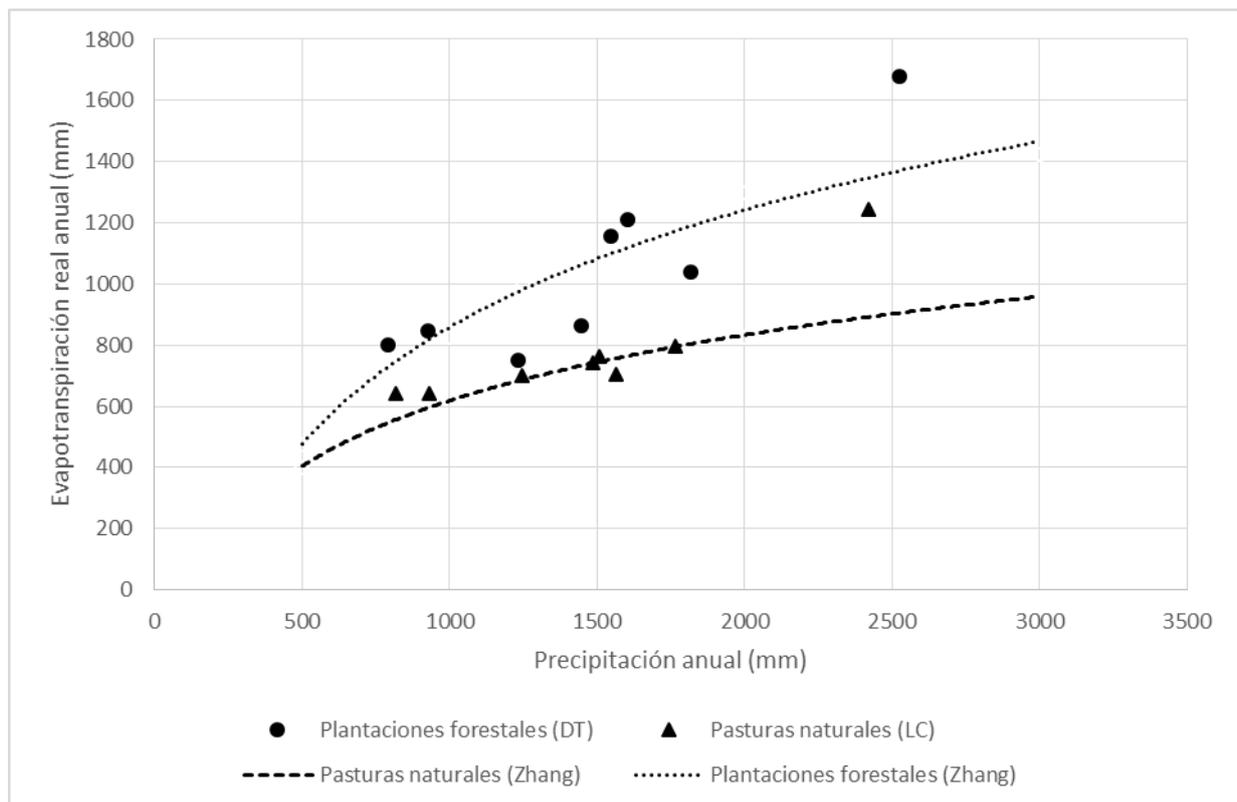


Figura 3.9 Comparación entre las curvas de Zhang et al. (1999, 2001) y los valores de evapotranspiración real anual registrados entre Oct 2006 y Set 2014 en las microcuencas Don Tomás (DT) y La Cantera (LC)

Lima (2001) también encontró que la relación entre ETR y la precipitación anual observada por Zhang et al. (1999, 2001) es consistente con los datos de las cuencas experimentales del Programa de Monitoreo de Cuencas conocido como PROMAB, del Instituto de Ciencias Forestales e Investigación (IPEF) de Brasil.

Balance de aguas subterráneas y recarga

Los cambios del almacenamiento del acuífero, la recarga y la descarga, fueron calculados diariamente aplicando las ecuaciones que se presentaron en el Capítulo 2. En primer lugar se aplicó el filtro digital para separar diariamente los hidrogramas medidos a la salida de ambas microcuencas. El valor óptimo del parámetro α del filtro digital se determinó para cada microcuenca inspeccionando visualmente el hidrograma y el flujo base resultante (ver Figura 3.10 y Tabla 3.3).

a) Don Tomás (plantación forestal)

b) La Cantera (pasturas naturales)

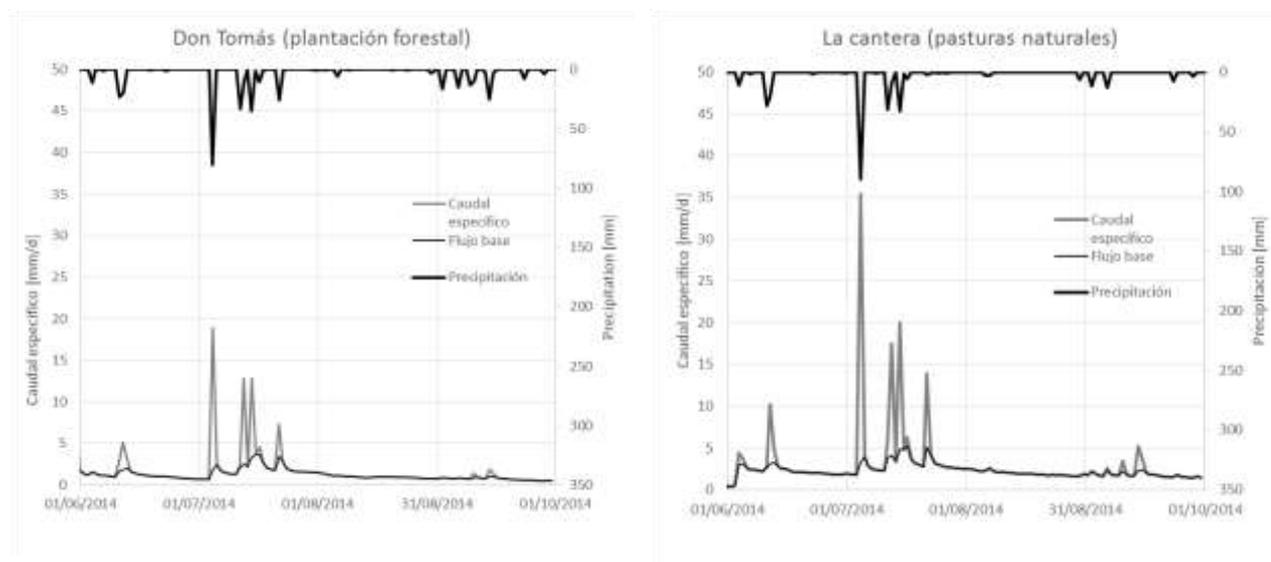


Figura 3.10 Separación del hidrograma aplicando el filtro digital de un parámetro.

Tabla 3.3 Valores del parámetro del filtro digital para la separación del hidrograma, rendimiento específico, y flujo base y descarga media estacional

	Don Tomas (DT) (Plantación forestal)	La Cantera (LC) (Pasturas naturales)
Parámetro del filtro digital	0.93	0.95
Flujo base medio estacional [mm]	157	137
Rendimiento específico, S_y	0.065	0.039
Descarga media estacional [mm]	157	137

Seguidamente, se calculó la descarga del acuífero a partir de los niveles freáticos monitoreados, aplicando la metodología descrita en el capítulo 2.

El piezómetro localizado en la ladera baja de DT registró una serie prácticamente continua, con solo una estación con datos parciales (24% de datos faltantes). No se consideraron datos de los piezómetros ubicados en la ladera alta y media, debido a que el nivel freático mayormente se ubicaba por debajo de la profundidad del piezómetro.

El piezómetro localizado en la ladera baja de LC registró una serie prácticamente continua, con solo una estación con datos incompletos (24% de datos faltantes), y el piezómetro localizado a media ladera registró seis estaciones sin falta de datos. Se consideró un único rendimiento específico, S_y , para ambos piezómetros. La recarga y la descarga se calculó individualmente, según se describe en el Capítulo 2. La recarga y descarga de ambos piezómetros se correlacionaron con el período común de datos (seis estaciones), y la correlación se utilizó para estimar los caudales faltantes. El resultado promedio de ambos piezómetros se asoció a la cuenca LC.

El rendimiento específico, S_y , se calibró para cada microcuenca de modo que la descarga media del acuífero coincida con el flujo medio base (ver Figura 3.11 y Tabla 3.3).

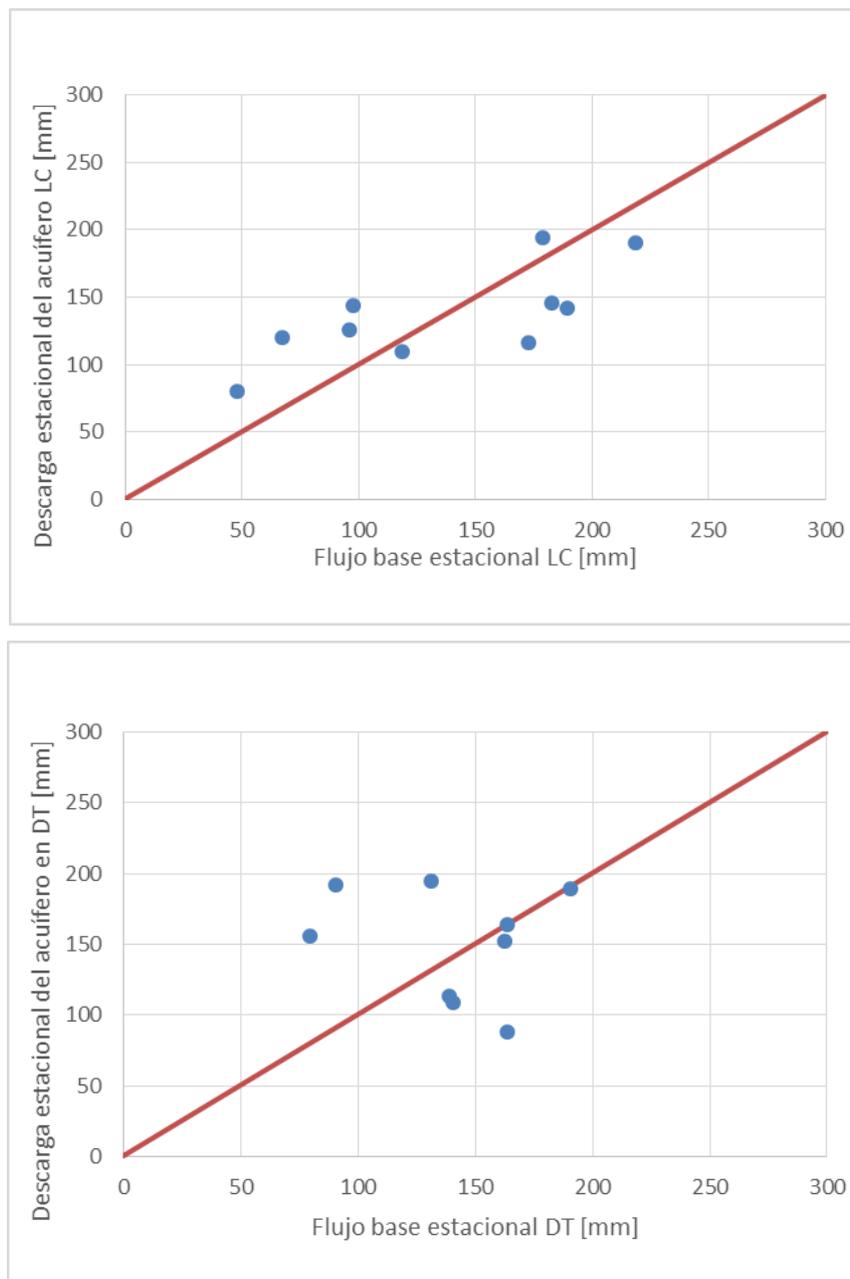


Figura 3.11 Flujo base estacional y descarga del acuífero. El coeficiente de almacenamiento específico, S_y , se calibró para obtener el mismo valor medio para el flujo base y la descarga del acuífero.



La Tabla 3.1 y

Tabla 3.2 muestran que los intercambios de flujo de DT (recarga y descarga) son equivalentes a los de LC. La recarga media en DT es 315 mm/año (18,3% de la precipitación incidente), mientras que en LC es 288 mm/año (17,0% de la precipitación anual). Estos valores se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura, 11 a 52% de la precipitación para pasturas naturales y 4 a 39% para áreas forestadas con Eucalyptus (Fan et al., 2014, Le Maitre et al., 1999, Allison and Hughes, 1972).

Incertidumbre en las componentes del balance

El contenido de humedad del suelo solamente se midió en los primeros tres años, debido a fallas del instrumental que no pudieron subsanarse. No obstante, las medidas de esos tres años sugieren que el error que se introduce al no considerar los cambios del contenido de humedad del suelo, a lo sumo representa el 3 a 4 % de la correspondiente precipitación anual o estacional, lo que incrementa la evapotranspiración real en un 10%. Esos valores son consistentes con los mencionados por Zhang et al. (1999), quienes sugieren que el cambio de humedad del suelo es a menudo solamente un 5 a 10% de la precipitación anual.

Asimismo, como se mencionó anteriormente, en LC se asumió un aporte de flujo base externo. Si tal aporte no se hubiera considerado, el valor del coeficiente de almacenamiento específico S_y habría sido 0,076 para igualar los valores de flujo base con la recarga estimada (Tabla 3.4). Esto, a su vez, hubiera conducido a un valor medio de recarga de 587 mm/año (34,6 % de la precipitación media incidente), lo que se entiende como una sobreestimación. Por consiguiente, para disminuir la incertidumbre, a futuro se debe implementar un programa de monitoreo o ensayos de campo que permitan caracterizar los aportes externos o el coeficiente de almacenamiento específico.

Tabla 3.4 Balance anual (en mm) calculado en la microcuenca LC sin considerar aportes externos, donde P es la precipitación incidente, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento del acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, Q_s base el flujo base medido, GW_{lat} el aporte externo, ET la evapotranspiración, y Q_s el caudal específico a la salida de la microcuenca.

LA CANTERA (LC)						
(Pasturas naturales)						
Balance anual	P	Q_s	ΔGW	GW_{rec}	GW_{desc}	AET
Oct 09–Set 10	2418	1301	30	671	641	1088
Oct 10–Set 11	1245	687	-5	456	461	563
Oct 11–Set 12	1484	877	18	549	531	589
Oct 12–Set 13	1767	1058	109	721	612	600
Oct 13–Set 14	1566	1005	-7	540	547	568

3.1.2 **BALANCE HÍDRICO LA NUEVA ESPERANZA**

El balance hídrico estacional y anual se calculó según las ecuaciones propuestas en el Capítulo 2. El balance resultante se presenta en la Tabla 3.5 y

Tabla 3.6.

La medición de las variables hidrológicas en LNE se inició en Ene 2008. La etapa inicial, comprendida entre Ene 2008 y Mar 2011, es un período de calibración en el que ambas microcuencas se mantuvieron en su estado natural, es decir, con pasturas naturales por cobertura. En abril de 2011 se realiza la plantación de una de las microcuencas.

Para la formulación de estos balances, en primer lugar se procedió a analizar la consistencia de los datos y a completar las ausencias de datos. A continuación se describe el procedimiento seguido.

Precipitación (P): Para completar tres meses en que se registró falta de datos (Feb 2010, Set y Oct 2012) se estableció una correlación entre las estaciones sitas en DT y LC con LNE, cuyos resultados se presentan en la Figura 5.11. Puede observarse que las relaciones obtenidas son muy similares, con coeficientes de determinación (R^2) que explican el 80% de la variabilidad. En la medida que las fallas de medición son parciales, se optó por sustituir el dato medido si el valor resultante de aplicar las ecuaciones de correlación es superior a la medida parcial y manteniendo coherencia en la relación P-Q. Aplicando esos criterios solamente se completaron los meses de Set y Oct 2012, manteniéndose el registro parcial medido en Feb 2010.

Caudal (Q): Para completar los meses en que se tienen registros mensuales faltantes o parciales de caudal en LNE se distinguió entre el período pre-plantación y pos-plantación. En el primer caso, se estableció una correlación de tipo caudal-caudal entre ambas microcuencas, que se presenta en la Figura 3.13, con un coeficiente de determinación $R^2=0,96$. La correlación caudal – caudal en el período pos-plantación muestra mayor variabilidad, con un coeficiente de determinación $R^2=0,62$, lo que es esperable al incidir los procesos hidrológicos vinculados a la plantación y el propio laboreo. En la Figura 3.14 se muestra la correlación caudal – caudal pos-plantación y, en la misma figura, se reproduce la relación lineal pre-plantación, de modo de comparar ambos períodos pre- y pos-plantación. Asimismo, puesto que en algunos meses se tienen datos faltantes en ambas microcuencas, se estableció una correlación entre precipitación y caudal en la microcuenca que se mantiene en condiciones naturales, es decir, cubierta por pasturas. La misma se ilustra en la Figura 3.15.

Tabla 3.5 Balance hídrico anual (en mm) calculado en las microcuencas LNE en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rec} la recarga de aguas subterráneas y GW_{desc} la descarga, ET la suma de evaporación del suelo y transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.

LA NUEVA ESPERANZA (LNE) (Plantación forestal)							(Pasturas naturales)				
Año Hídrico	ET	P	I	Q_s	ΔH_s	ΔGW	ETR	Q_s	ΔS	ΔGW	ETR
Oct09_Set10	962	1738	s/d	776	s/d	s/d	962	755	0	s/d	983
Oct10_Set11	402	1091	s/d	689	s/d	s/d	402	343	0	s/d	748
Oct11_Set12	818	1096	s/d	279	s/d	s/d	818	432	0	s/d	665
Oct12_Set13	865	1368	s/d	503	s/d	s/d	865	645	0	s/d	723
Oct13_Set14	810	1301	s/d	338	152	s/d	810	622	145	s/d	534
Oct14_Set15	919	1297	s/d	403	-26	s/d	919	542	-47	s/d	801

Tabla 3.6 Balance hídrico estacional (en mm) calculado en las microcuencas LNE en Uruguay, donde P es la precipitación incidente, I las pérdidas por interceptación, ΔS el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo, ΔGW el cambio de almacenamiento de agua en el acuífero, GW_{rech} la recarga de aguas subterráneas y GW_{disch} la descarga, ET la suma de la evaporación del suelo y la transpiración, y Q_s el caudal específico. La evapotranspiración real (ETR) es la suma de ET e I.

LA NUEVA ESPERANZA (LNE) (Plantación forestal)							(Pasturas naturales)					
Estación	ET	P	I	Q_s	ΔH_s	ΔGW	ETR	Q_s	ΔS	ΔGW	ETR	
Abr_Set 08	295	411	s/d	116	s/d	s/d	295	48	s/d	s/d	363	
Oct-Mar 09	512	627	s/d	115	s/d	s/d	512	204	s/d	s/d	424	
Abr_Set 09	236	371	s/d	135	s/d	s/d	236	95	s/d	s/d	276	
Oct-Mar 10	734	1289	s/d	554	s/d	s/d	734	584	s/d	s/d	705	
Abr_Set 10	228	449	s/d	221	s/d	s/d	228	171	s/d	s/d	278	
Oct-Mar 11	384	441	s/d	57	s/d	s/d	384	21	s/d	s/d	420	
Abr_Set 11	322	650	s/d	328	s/d	s/d	322	322	s/d	s/d	328	
Oct-Mar 12	541	716	s/d	175	s/d	s/d	541	160	s/d	s/d	556	
Abr_Set 12	229	380	s/d	151	s/d	s/d	229	272	s/d	s/d	108	
Oct-Mar 13	701	889	s/d	187	s/d	s/d	701	332	s/d	s/d	557	
Abr_Set 13	268	479	s/d	212	s/d	s/d	268	313	s/d	s/d	166	
Oct-Mar 14	460	737	s/d	192	85	s/d	460	283	106	s/d	348	
Abr_Set 14	235	564	s/d	261	67	s/d	235	339	39	s/d	187	
Oct-Mar 15	657	744	s/d	156	-70	s/d	657	269	-87	s/d	562	
Abr_Set 15	287	553	s/d	222	44	s/d	287	273	41	s/d	239	

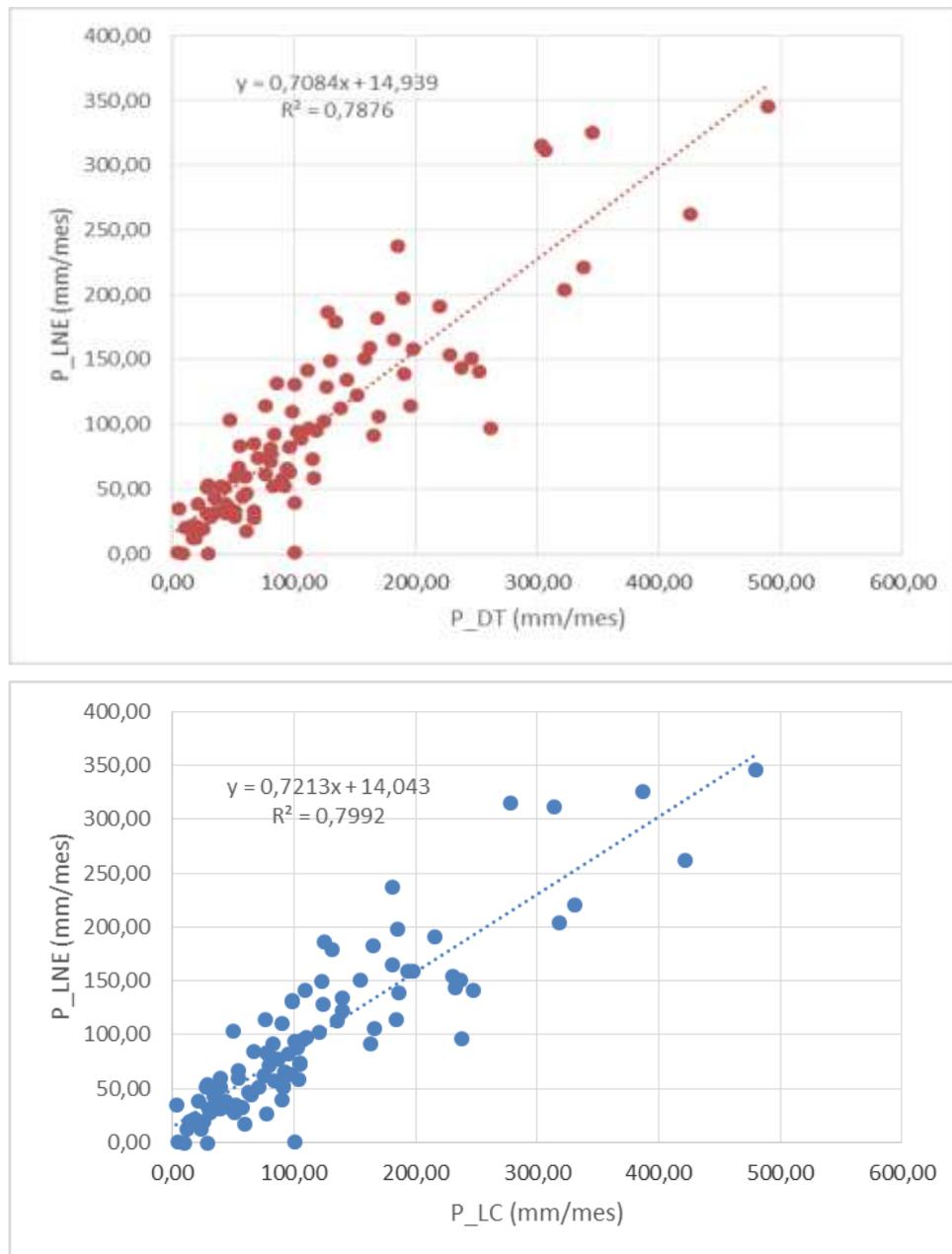


Figura 3.12 Correlación entre datos mensuales de precipitación registrados en, arriba DT y LNE, abajo LC y LNE

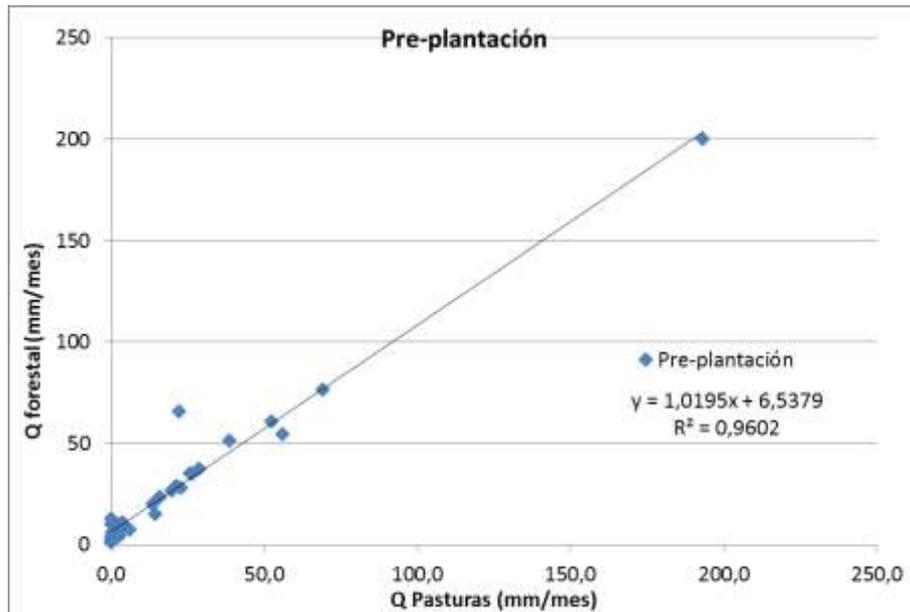


Figura 3.13 Correlación caudal – caudal en el período pre-plantación, Ene 2008 – Mar 2011, en LNE. La denominación Qforestal refiere a la microcuenca que fue plantada a partir de Abr 2011

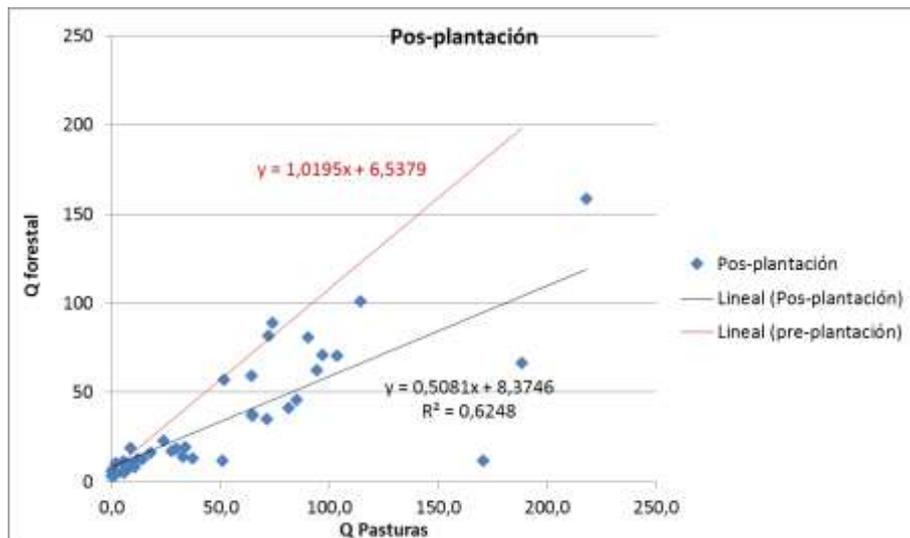


Figura 3.14 Correlación caudal – caudal en el período pos-plantación, Abr 2011 – Set 2015, en LNE, y comparación con la relación pre-plantación

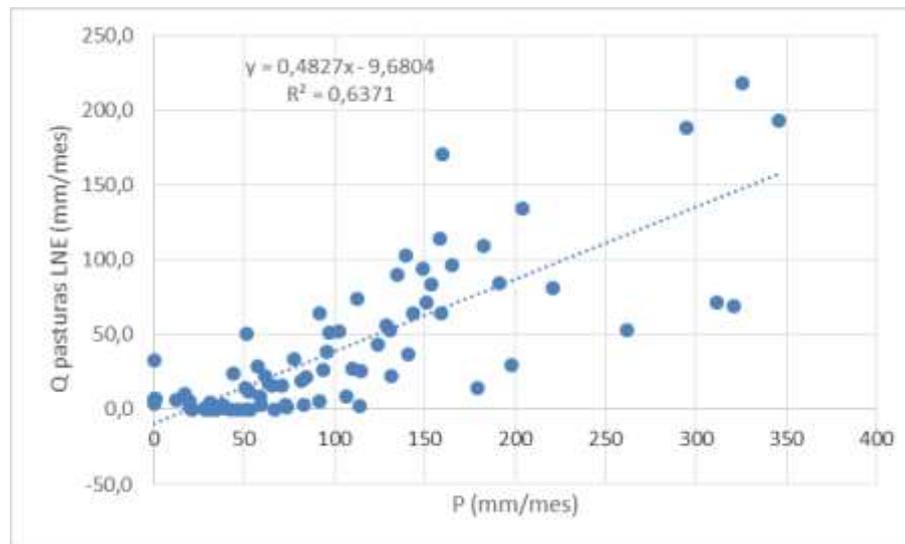


Figura 3.15 Correlación precipitación – caudal en la microcuenca cubierta por pasturas naturales, correspondiente al período Abr 2008 – Set 2015

Aplicando la relación P-Qp en LNE (Figura 3.15) se rellenaron datos de caudal de 7 meses (Ene 2009 a May 2009, Ene 2010, Abr 2015). En la microcuenca forestal se rellenaron 3 meses de caudal (May 2009, Dic 2009 y Ene 2010) aplicando la correlación Qp-Qf correspondiente al período pre-plantación (Figura 3.13) y 10 meses (Jul a Set 2012, Dic 2012, Mar a May 2013, Mar 2014, Mar 2015, May 2015) aplicando la correlación Qp-Qf correspondiente al período pos-plantación (Figura 3.14). En todos los casos, si el caudal registrado parcialmente supera el valor obtenido mediante correlación, se mantuvo el valor medido.

Seguidamente, considerando la utilización de datos para comparar ambas coberturas, se utilizó la calibración de microcuencas (Figura 3.13) y se aplicó a la serie de caudales mensuales de la microcuenca forestal, en el período pos-plantación, una corrección de + 1,95%.

Humedad de suelo (Hs): Las medidas de contenido de humedad de suelo se iniciaron en Oct 2013, a partir de la instalación de equipos de medición continua adquiridos en el marco del proyecto ANII Alianzas.

Variaciones del almacenamiento del estrato superior del acuífero (ΔGW): Si bien en LNE se dispone de piezómetros en ambas microcuencas, provistos de limnógrafos que registran las variaciones del nivel piezométrico, ésta información no se pudo utilizar para cuantificar ΔGW . Ello se debe a que los piezómetros están provistos de rejilla en más de un estrato acuífero, por lo que el nivel piezométrico que se registra integra un acuífero multicapa. Sin embargo, en el balance hídrico tiene importancia fundamental conocer las variaciones del estrato superior por los fenómenos de recarga, y probable extracción de agua por las raíces en períodos de déficit hídrico. Se contempló la posibilidad de sellar las rejillas de los estratos inferiores, debiendo desecharse la alternativa al constatar que los piezómetros se construyeron con prefiltro, que vincula todos los estratos acuíferos, en lugar de desarrollo natural sin prefiltro.

A continuación se sintetizan los resultados del balance hídrico estacional y anual, presentando los indicadores que fueran desarrollados en el Capítulo 2, que son aplicables con la información actualmente disponible.

Reducción del caudal específico

En la Figura 3.16 se presenta la reducción del caudal específico a nivel estacional, expresada como porcentaje de la lluvia acumulada. Los datos corresponden a 7 semestres después del primer año pos-plantación, en que

comienza a observarse una afectación del recurso hídrico. El rango de reducción varía entre 10 a 25 % de la precipitación acumulada estacionalmente, para el ajuste logarítmico, correspondiendo el porcentaje más elevado a estaciones con déficit hídrico.

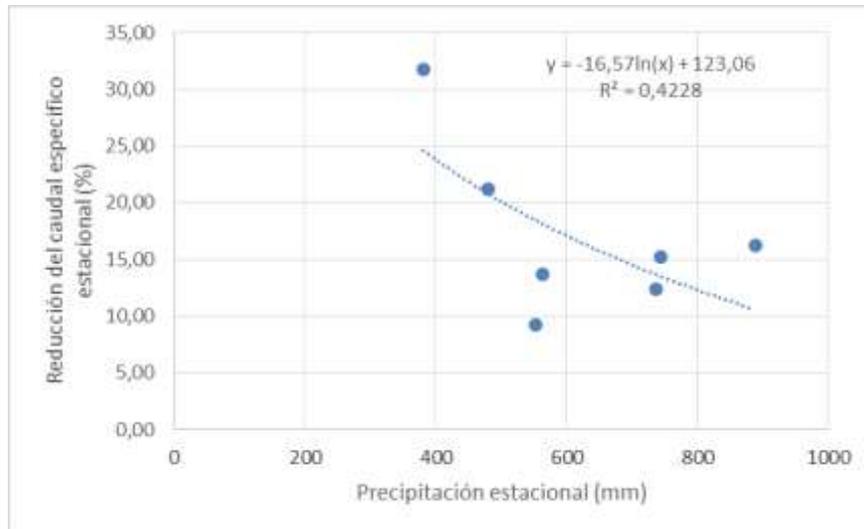
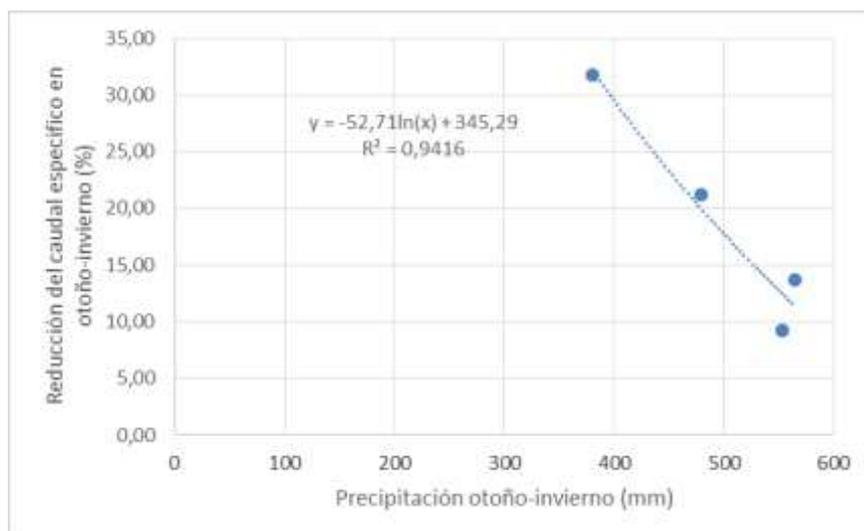


Figura 3.16 Reducción del caudal específico expresada como porcentaje de la lluvia acumulada estacionalmente

La Figura 3.17 muestra la reducción del caudal específico distinguiendo entre meses de otoño-invierno y primavera-verano. Puede observarse que la mayor afectación tiene lugar en meses de otoño-invierno con déficit hídrico. Este resultado, como se observó para las microcuencas DT y LC es opuesto al esperable. Ello se debe a las anomalías del período de monitoreo, caracterizado por primaveras-veranos lluviosos y otoños-inviernos con déficit hídrico. En el caso de los meses de primavera-verano solamente se cuenta con datos de 3 años, por lo que no pudo ajustarse ninguna línea de tendencia. En cambio, en otoño-invierno el ajuste es excelente ($R^2=0,96$).



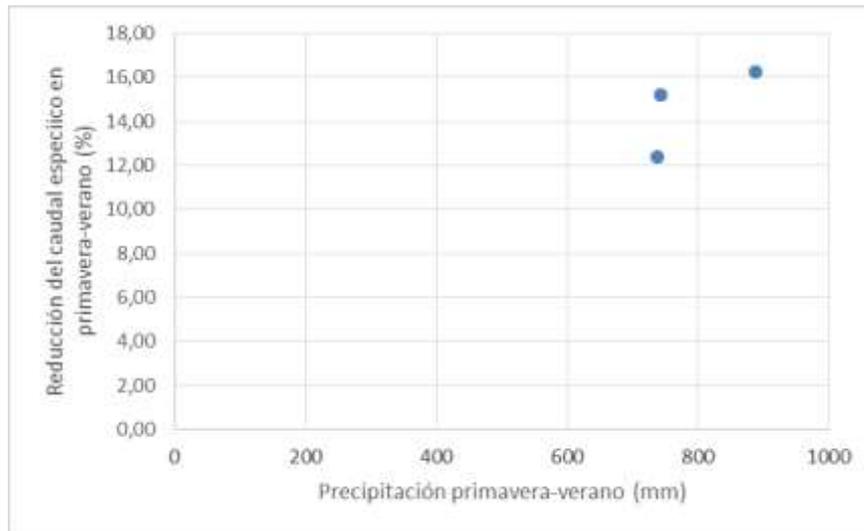


Figura 3.17 Reducción del caudal específico expresada como porcentaje de la lluvia acumulada estacionalmente, distinguiendo entre meses de otoño-invierno (arriba) y primavera-verano (abajo)

Por su parte, en la Figura 3.18 se ilustran la reducción del caudal específico observada a escala anual. Solamente se cuenta con datos correspondientes a cuatro años pos-plantación, por lo que no es pertinente pretender ajustar una línea de tendencia.

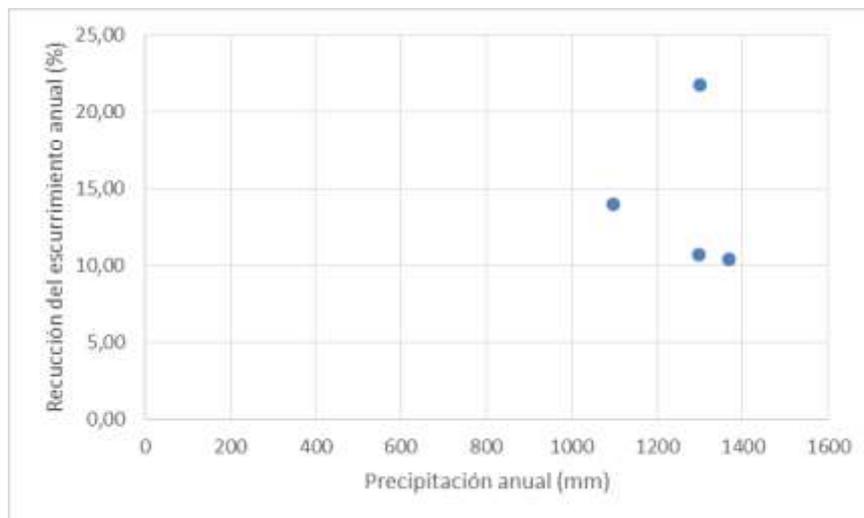


Figura 3.18 Reducción del caudal específico anual, expresado como porcentaje de la correspondiente lluvia anual

Diferencia en la evapotranspiración real según la cobertura

La Figura 3.19 ilustra la diferencia en la evapotranspiración real entre la plantación forestal joven y las pasturas naturales, expresada como porcentaje de la precipitación estacional. Los resultados son muy similares a los presentados en la Figura 3.16 para la reducción del caudal específico, puesto que las medidas de ΔH_s se incorporaron en los últimos cuatro semestres, mientras que no se cuenta con información de ΔGW .

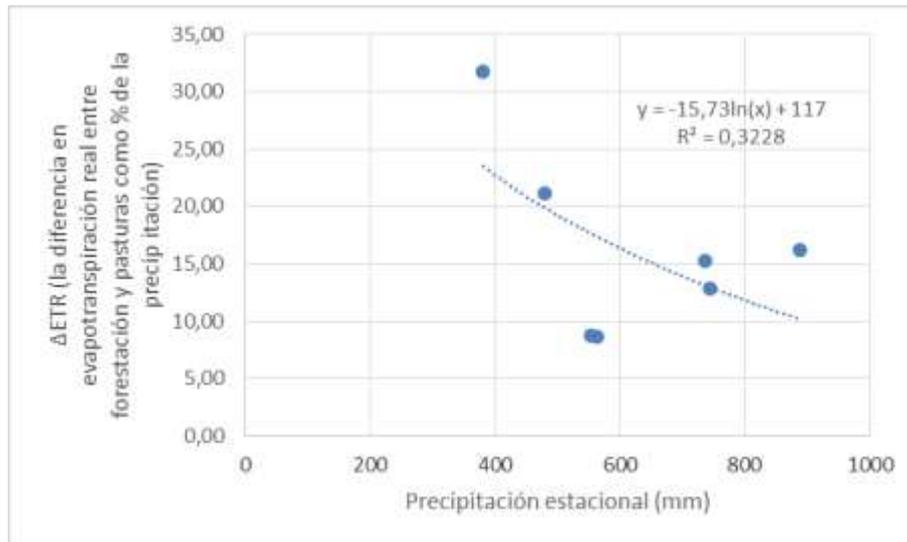


Figura 3.19 Diferencia en la evapotranspiración real entre forestación y pasturas en LNE, expresada como % de la precipitación estacional

Por último, la Figura 3.20 reproduce las curvas desarrolladas por Zhang et al. (1999, 2001), que representan ETR para cuencas forestales y cuencas cubiertas por pasturas, en función de la precipitación anual. La Figura muestra también los valores de ETR resultantes del balance hídrico en LNE, mostrando un ajuste aceptable para pasturas naturales, mientras que la evapotranspiración real anual para la plantación forestal es próxima, pero inferior a la curva desarrollada por Zhang et al. (1999, 2001), probablemente debido a que se trata de una plantación joven, con un dosel en desarrollo.

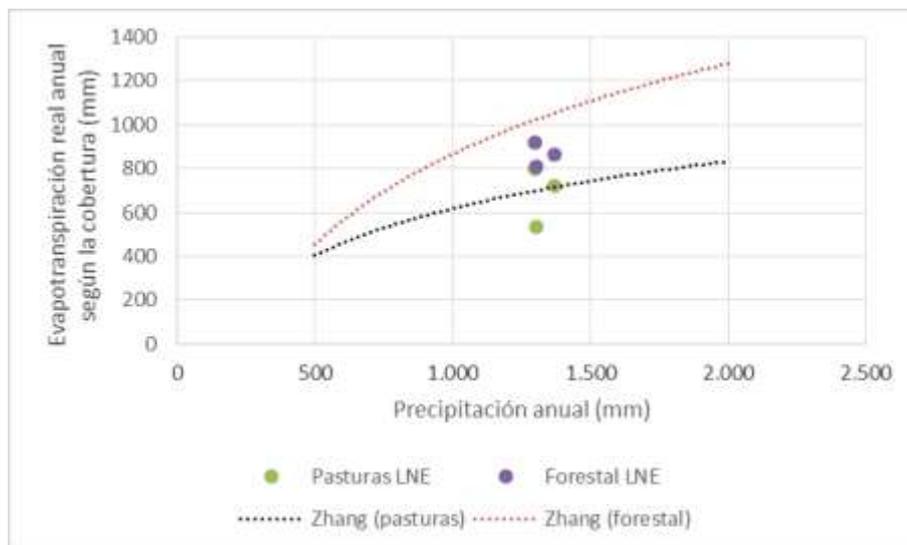


Figura 3.20 Comparación entre las curvas de Zhang et al. (1999, 2001) y los valores de evapotranspiración real anual registrados entre Oct 2012 y Set 2015 en las microcuencas LNE

3.2 DINÁMICA DEL AGUA EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA ATMÓSFERA

3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL

Variables de estado de los rodales

La densidad en términos de número de árboles por hectárea en promedio pasó de 1080 a 980, lo que hace a una mortalidad promedio de 9.2% en el período considerado.



Figura 3.21 Evolución de la densidad promedio en LNE

La evolución del diámetro a la altura del pecho y la altura se han mantenido creciendo a una tasa lineal de 2,5 – 3,5 cm promedio por año para el diámetro y de 3,0 – 3,5 m promedio por año en altura. En el último período la tasa de crecimiento de diámetro y altura han disminuido levemente.

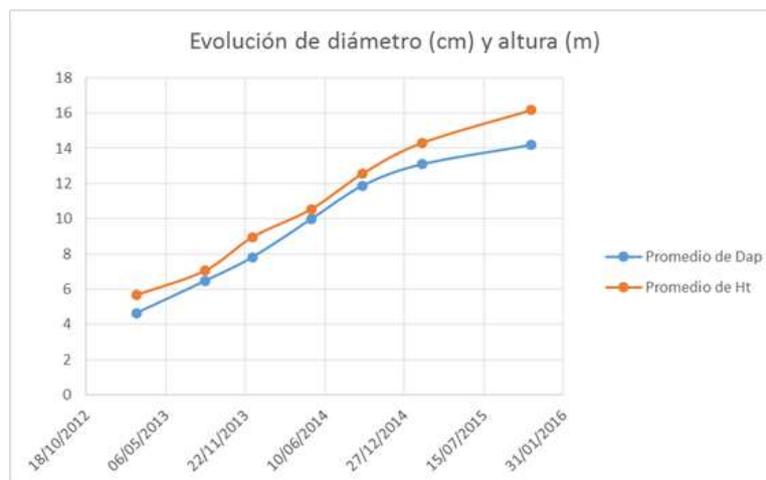


Figura 3.22 Evolución de diámetro y altura promedio en LNE

El crecimiento en volumen ha evolucionado de la etapa de crecimiento exponencial a la etapa de crecimiento lineal presentando una tasa de crecimiento medio anual de 30 m³/ha/año promedio. La relación existente entre el incremento medio anual y el incremento corriente anual muestran que aún le falta al bosque para

entrar en la etapa de crecimiento decreciente y para llegar al punto de máxima productividad física en el mínimo tiempo.

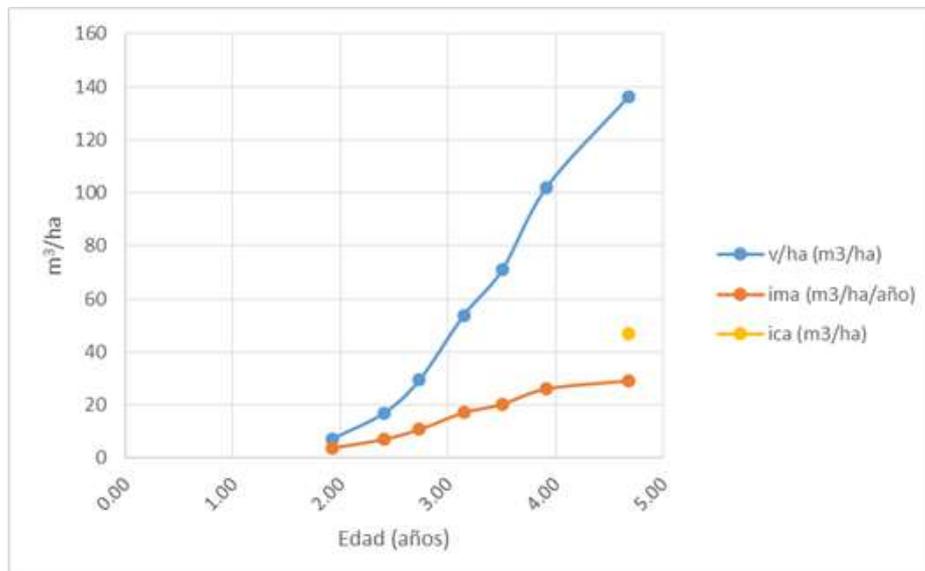


Figura 3.23 Evolución del volumen en LNE

La plantación de la cuenca de La Nueva Esperanza presenta tasas de crecimiento elevadas de 30 m³/ha/año promedio, con una mortalidad que se puede considerar esperable de 2%.

Al momento de la última medición dicho bosque aún no ha llegado al punto de máxima productividad física en el mínimo tiempo por lo que tiene la posibilidad de seguir creciendo a tasas constantes durante un período más de tiempo.

3.2.2 Determinación de índice de área foliar (IAF) mediante ceptómetro

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados del IAF para el rodal muestreado en el sitio Nueva Esperanza.

Tabla 3.7 Índice de área foliar (IAF) promedio para el sitio experimental Nueva Esperanza del período diciembre 2013 – setiembre 2015. Se presenta el valor medio \pm desviación estándar.

Mes/Año	Diciembre 2013	Mayo 2014	Setiembre 2014	Marzo 2015	Setiembre 2015
IAF	2,13 \pm 1,1	2,93 \pm 0,83	3,51 \pm 0,78	3,68 \pm 0,53	3,4 \pm 0,45

Dada las características del rodal, principalmente especie, etapa de desarrollo y a la evolución de las variables estado del rodal, los valores de IAF obtenidos se encuentran en los rangos citados en extensa literatura referente (Jonckheere et al. 2004, Whitehead y Beadle 2004). Los valores de IAF registrados describen un incremento del área foliar hacia otoño coincidiendo con el patrón estacional de la especie, a la vez que refleja el carácter dinámico de este indicador.

La variación en el área foliar -observada en los valores de IAF- en el período mayo-setiembre 2014 y marzo-setiembre 2015 responde a la respuesta del desarrollo del área foliar en función de la disponibilidad de agua en el sitio. Deficiencias hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera repercute en procesos como abscisión de hojas, disminución y/o cese del desarrollo foliar. Este comportamiento está en concordancia con los resultados obtenidos de deficiencia de evapotranspiración relativa (DET_{rel}). En el período febrero-Julio 2015, se obtuvieron en forma consecutiva DET_{rel} superiores a 0,5 (excepto mayo 2015). En este período de tiempo se observa un leve descenso en el IAF, a diferencia de igual período en el año 2014 donde se visualiza un incremento del IAF y donde la DET_{rel} es nula. Valores de $DET_{rel} = 0$ reflejan condiciones de nula deficiencia, donde la tasa evapotranspirativa no presentaría limitantes hídricas para su expresión potencial. Valores de $DET_{rel} = 1$ indican valores máximos de deficiencia donde la oferta de agua (precipitación + agua disponible en suelo) es insuficiente para el proceso evapotranspirativo.

La determinación de IAF en el rodal del sitio Don Tomás describe la situación del área foliar en condición de rodal adulto (pre-cosecha). El IAF en mayo de 2014 indica valores de 2,81 \pm 0,16 (valor medio \pm desviación estándar). Los valores obtenidos resultaron algo inferiores a los citados en la literatura para rodal adulto (IAF = 4-5). Determinaciones de IAF en el año 2009 (Alonso, J. 2011) -mediante fotografía hemisférica digital- en este mismo rodal indicaron valores de 1,82 \pm 0,27 (valor medio \pm desviación estándar). Dado la etapa de desarrollo del rodal los valores de IAF en el período 2009-2014 hasta su cosecha permiten inferir una menor tasa de incremento del área foliar en los últimos 5 años de rodal (pre-cosecha).

3.2.3 CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Con respecto a la evolución del agua en el suelo como primer resultado se debió obtener las curvas de calibración para cada una de las profundidades; a pesar de que los valores obtenidos, según el fabricante, representan el contenido de agua en el suelo en base a volumen (mm cada 10 cm), para mayores garantías en cuanto a la confiabilidad de los datos se extrajeron muestras de suelo; representativas de las profundidades a las cuales fueron colocados y para tres momentos separados en el tiempo de forma de contemplar diferentes contenidos de humedad; para realizar la calibración en cada uno de los puntos de monitoreo de forma de obtener una correlación entre los valores registrados y el contenido de agua medido mediante el método gravimétrico. Este último método consiste en medir de forma directa el contenido de agua del suelo y es la que se usa para la calibración de todas las metodologías que la miden de forma indirecta.

Las relaciones encontradas hasta el momento entre los valores de agua obtenidos en forma directa e indirecta no han sido totalmente satisfactorias para los sitios Don Tomás y La Cantera la relación fue errática para todas las profundidades. Por este motivo, hasta no lograr un mayor ajuste, no se pudieron obtener valores de contenido de agua en el suelos 100% confiables, analizando los datos “brutos” se observa una sobre estimación del contenido de humedad dado que para la mayor parte del período el contenido supera ampliamente el valor determinado de capacidad de campo (máxima cantidad de agua capaz de retener el suelo) aún en períodos sin lluvias. Consecuencia de lo anterior los resultados obtenidos al evaluar éste parámetro nos permiten observar tendencias en cuanto a la evolución en el tiempo del contenido de agua en el suelo hasta los 80 cm de profundidad.

En el caso del sitio La Nueva Esperanza se logró un mejor ajuste lo cual permitió obtener valores de agua en el suelo más confiables (Figura 3.24), el contenido de agua se determinó hasta los 65 cm de profundidad. En este caso, ajustando los datos con la calibración lograda se obtuvo que los registradores en promedio sobreestimaron el contenido de agua en el suelo en un 18,2%.

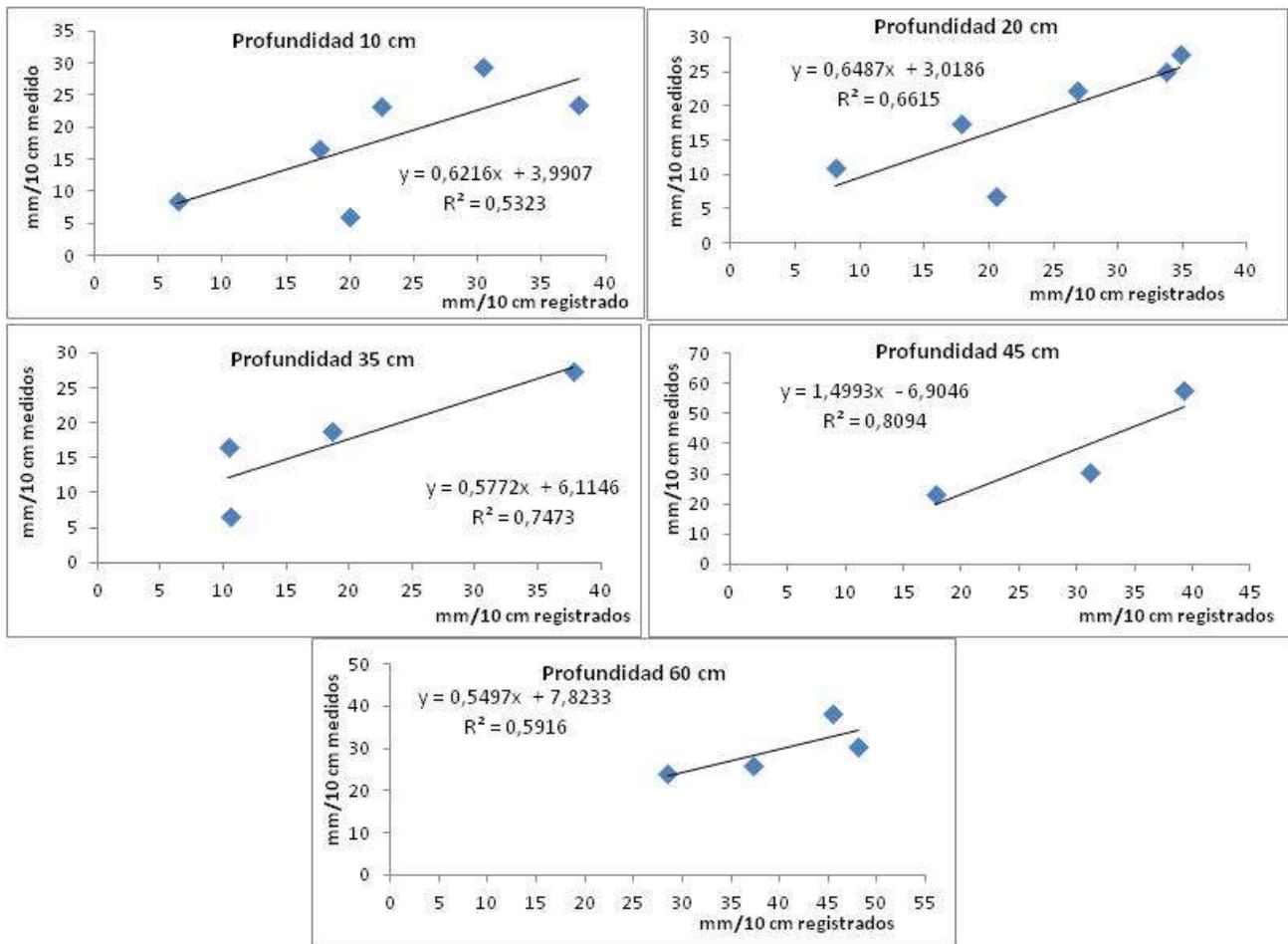


Figura 3.24 Curvas de calibración para cada una de las profundidades del suelo tipo en el establecimiento La Nueva Esperanza

Contenido de agua en el suelo microcuencas Don Tomás y La Cantera

En la Figura 3.25 se puede observar los resultados obtenidos a partir de los registradores instalados en cada una de las microcuencas, los datos graficados, tanto los de precipitación como los de humedad del suelo, son valores diarios. Considerando que para el sitio La Nueva Esperanza los registradores de humedad en el suelo sobreestimaron los valores en un 18,2% se utilizó este valor para ajustar los valores obtenidos en éstos sitios de forma de obtener un contenido más ajustado a los parámetros hídricos de los suelos representativos de las microcuencas, dado que si se usaban los datos en “bruto”, los mismos sobrepasaban los valores de capacidad de campo en gran parte del período analizado, lo cual demostraba plenamente una sobre valoración, igualmente solo podemos hablar de tendencias hasta no tener una calibración local aceptable.

La Figura 3.25 muestra que ambas coberturas presentan similar comportamiento en cuanto al contenido de agua en el suelo pero existe una diferencia entre coberturas, siendo el contenido de agua en el suelo en la microcuenca forestal menor que en pastura en gran parte del período analizado, con una tendencia a incrementarse la diferencia en los períodos de menores precipitaciones. En períodos de precipitaciones diarias importantes (mayores a 60 mm diarios) se nota una leve tendencia (muy puntual en el tiempo) a superar el contenido de agua en la forestación con respecto a la pastura. Hacia el final del período de monitoreo la microcuenca forestal había sido cosechada por lo tanto las diferencias encontradas no pueden adjudicarse a la diferencia en la cobertura forestal sino al manejo, dado que la microcuenca forestal aumenta su rugosidad

superficial, por las actividades propias de la cosecha, lo que estaría determinando una mayor probabilidad de infiltración, pudiendo determinar mayores contenidos de agua en el suelo.

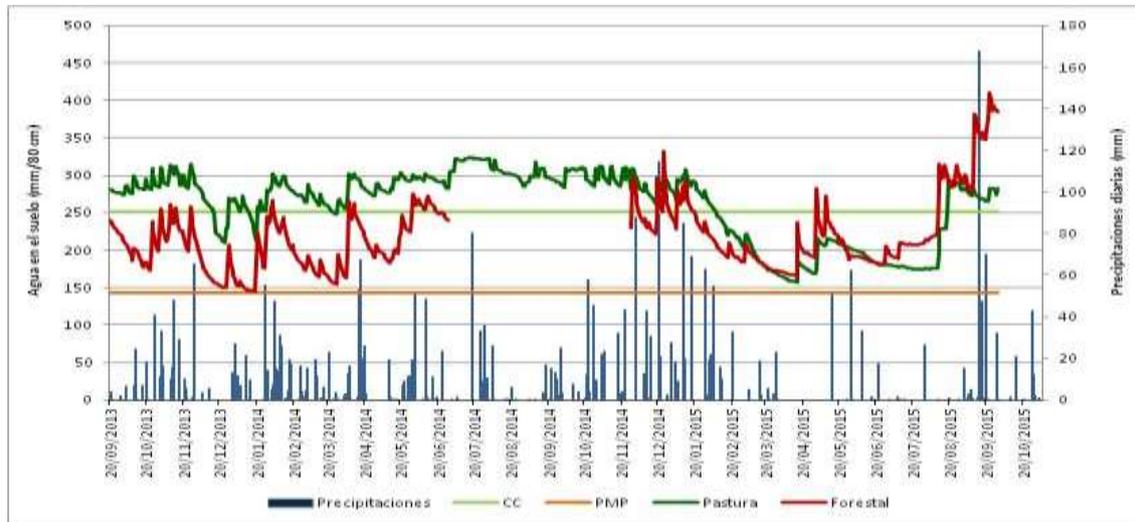


Figura 3.25 Contenido de agua en el suelo (en 80 cm de profundidad) y precipitaciones diarias registradas en la microcuenca Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura) durante el período 21/9/2013 – 30/9/2015. CC (Capacidad de Campo) y PMP (Punto de Marchitez Permanente) en mm/80 cm.

El funcionamiento de los registradores es sumamente satisfactorio, los resultados reflejan el comportamiento del agua del suelo en el tiempo y como se dan las respuestas según se esté frente a períodos de recarga del agua del suelo (lluvias) o de disminución (principalmente debido a la extracción por parte de las raíces para satisfacer el proceso de evapotranspiración).

Pero, como puede verse en la Figura 3.25, los milímetros totales de agua en el suelo obtenidos hasta los 80 cm, estarían sobreestimados con respecto al valor real (el cual deberíamos de haber encontrado si la calibración hubiese sido posible) dado que tanto en la microcuenca de pastura superan a los estimados a capacidad de campo para igual profundidad. En la realidad el contenido registrado debería mantenerse entre los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), parámetros hídricos característicos para los suelos tipo de las microcuencas, por lo menos en gran parte del período, pudiendo ser superiores solamente en casos de precipitaciones diarias de cierta magnitud.

En la Figura 3.26 se muestra la evolución en el tiempo, para ambas coberturas, del contenido de agua disponible en el suelo hasta los 80 cm, definiendo éste parámetro como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo (máxima cantidad de agua que puede retener el suelo) y el punto de marchitez permanente (mínima cantidad de agua en el suelo a la cual, en términos relativos, la cobertura podría extraer agua del suelo).

Se observa que el agua disponible en la cobertura forestal representó un 47 % del agua disponible en la pastura durante el período en que estuvo la plantación forestal, luego de la cosecha la tendencia se revirtió pasando la microcuenca antes forestada a tener un 27% más de agua disponible con respecto a la que mantuvo la cobertura de pasturas. Como se mencionó anteriormente esta variación fue consecuencia del manejo de cosecha y plantación en ese segundo período, lo cual aumentó la rugosidad del suelo permitiendo una mayor infiltración de agua conjuntamente a que tampoco presentaba una cobertura vegetal que la extrajera.

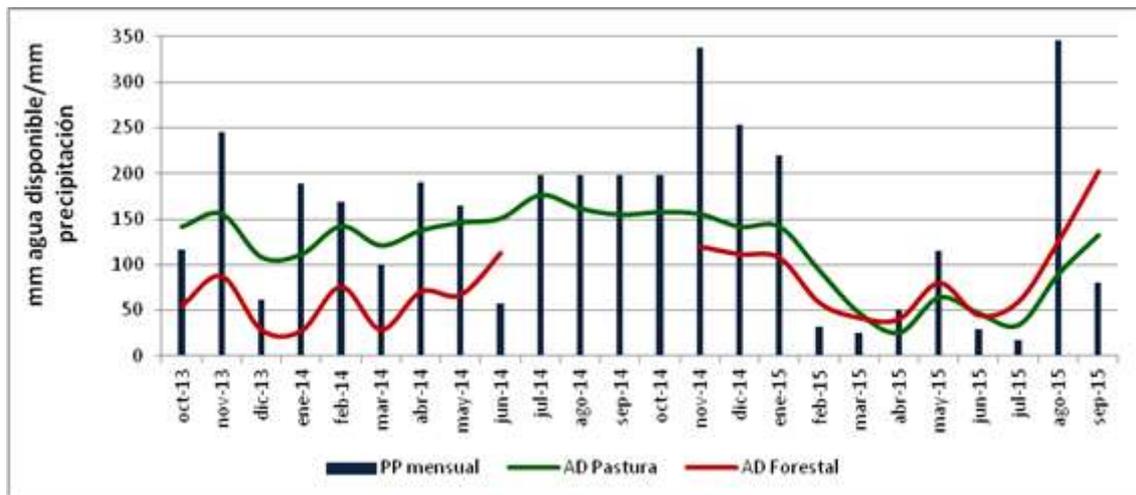


Figura 3.26 Contenido de agua disponible promedio mensual en el suelo (en 80 cm de profundidad) y precipitaciones mensuales registradas en la microcuenca Don Tomás (forestal) y La Cantera (pastura) durante el período octubre 2013 – setiembre/2015.

A medida que se obtengan más registros del contenido de agua en el suelo y se obtenga la ecuación de calibración, la información obtenida permitirá profundizar el conocimiento en el comportamiento del agua del suelo según el tipo de vegetación presente en los sitios bajo estudio.

Contenido de agua en el suelo en La Nueva Esperanza

En el predio La Nueva Esperanza (LNE) se comenzó el monitoreo del contenido del agua en el suelo a partir de la instalación de los registradores continuos en mayo de 2013, anteriormente no se pudo medir mediante la metodología de termalización de neutrones debido a que los suelos presentes no permitieron, dadas sus características, la instalación de tubos de acceso a la sonda de neutrones.

El monitoreo del contenido de agua en el suelo en ambas microcuencas se realizó hasta una profundidad de 60 – 80 cm debido a que las características del suelo (presencia de un horizonte C impenetrable y con abundante cantidad de gravas y gravillas) no permite la instalación de los sensores a mayores profundidades.

En la Figura 3.27 pueden observarse los registros obtenidos en ambas microcuencas, como ya se mencionó los resultados obtenidos directamente de los registradores fueron ajustados mediante las curvas de calibración que se muestran en la Figura 3.24, eso determinó mejorar la calidad de los datos aunque aún deberíamos tender a una mejor calibración para poder obtener información más confiable, aunque es esperable que no se modifiquen las tendencias observadas hasta el momento.

En la Figura 3.27 se puede observar que ambas coberturas presentan similares tendencias en cuanto al contenido de agua en el suelo y que las diferencias entre coberturas no son tan significativas como las que se observan al comparar las microcuencas Don Tomás (forestada) y La Cantera (pastura), esto puede deberse a las características de la plantación, en éste caso son árboles jóvenes (3 – 4 años) y en Don Tomás ya finalizando el turno de producción (14-15 años).

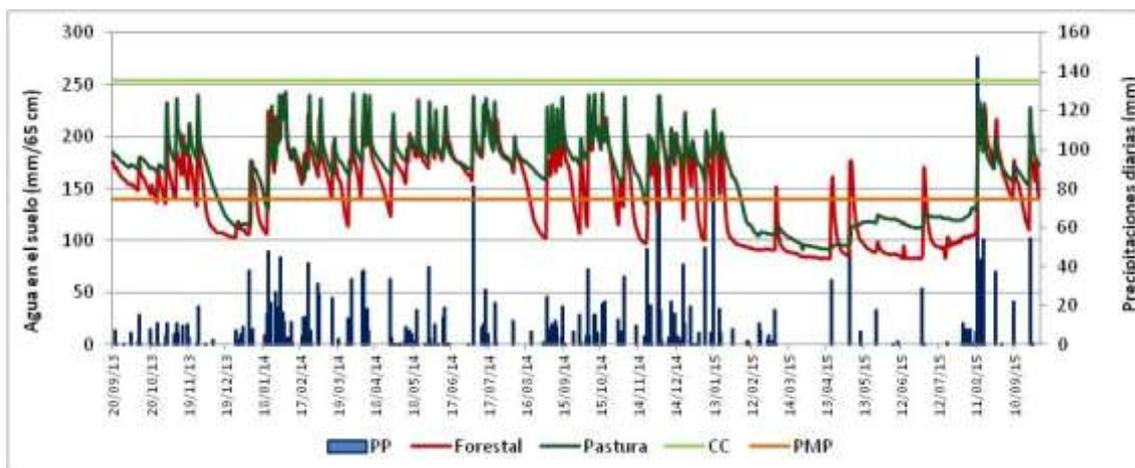


Figura 3.27 Contenido de agua en el suelo (en 65 cm de profundidad) y precipitaciones registradas en la microcuencas forestal y de pastura en el predio La Nueva Esperanza 20/9/2013 – 30/9/2015. CC (Capacidad de Campo) y PMP (Punto de Marchitez Permanente) en mm/80 cm.

En la Figura 3.28 se muestra la evolución en el tiempo, para ambas coberturas, del contenido de agua disponible en el suelo hasta los 65 cm. Se observa que el agua disponible en la cobertura forestal representó un 40,8 % del agua disponible en la pastura durante el período en que el suelo contó con agua disponible, hubo algunos períodos (febrero a julio 2015) con marcados déficits hídricos en los cuales ninguna de las coberturas presentaba agua disponible en el suelo, presentando una mayor tendencia al déficit hídrico la cobertura forestal que la de pasturas.

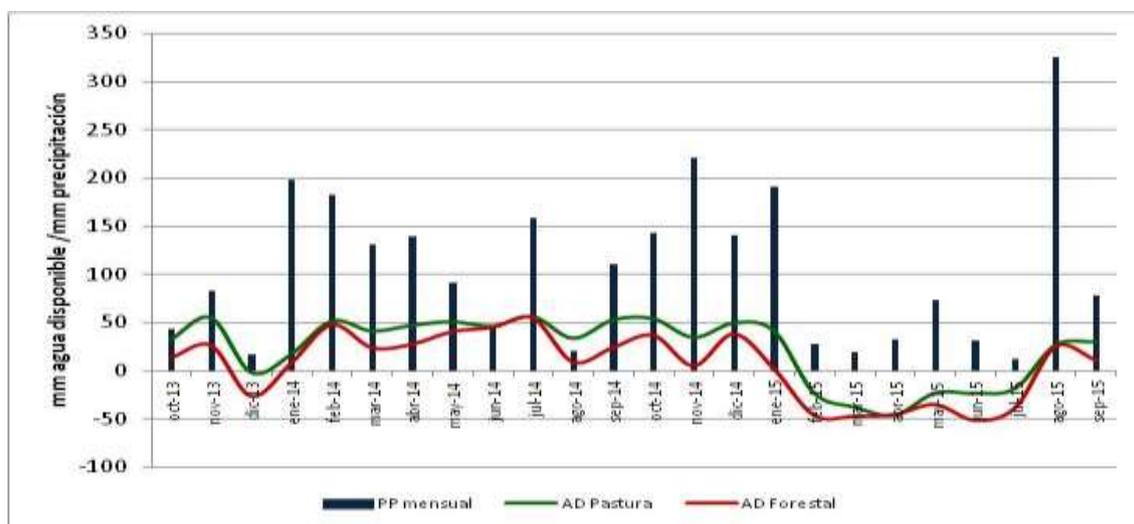


Figura 3.28 Contenido de agua disponible promedio mensual en el suelo (en 65 cm de profundidad) y precipitaciones mensuales registradas en las microcuencas forestal y de pasturas en La Nueva Esperanza durante el período octubre 2013 – setiembre/2015.

Registadores de humedad: oportunidad de determinaciones parciales de consumo de agua

En la Tabla 3.8, Tabla 3.9 y Tabla 3.10 se presentan para el sitio La Nueva Esperanza, a modo de ejemplo, la evolución del contenido de agua en el suelo para tres períodos de escasas o nulas precipitaciones, esa disminución que se va registrando diariamente nos estaría determinando el consumo realizado en cada una

de las coberturas por concepto de evapotranspiración. Esta es una alternativa a evaluar con mayor profundidad en la medida que contemos con la calibración de los sensores, lo cual nos permitiría poder comparar un valor de evapotranspiración estimado por otros métodos y la disminución real del contenido de agua en el suelo.

Tabla 3.8 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 31 mm

	Agua en el suelo (mm/65 cm)		PP (mm)	Disminución contenido agua en el suelo (mm)	
	Forestal	Pastura		Forestal	Pastura
16/04/14	220,7	236,6	0,0	-6,7	-6,0
17/04/14	215,4	232,0	0,0	-5,3	-4,6
18/04/14	211,0	228,2	0,0	-4,5	-3,8
19/04/14	207,8	225,4	0,0	-3,2	-2,8
20/04/14	202,2	222,6	0,0	-5,6	-2,8
21/04/14	197,2	219,5	0,0	-5,0	-3,1
22/04/14	191,7	216,4	0,0	-5,5	-3,1
23/04/14	186,4	213,4	0,0	-5,3	-3,0
24/04/14	180,9	210,6	0,0	-5,6	-2,8
25/04/14	175,0	207,9	0,0	-5,9	-2,6
26/04/14	169,5	205,8	0,0	-5,4	-2,1
27/04/14	162,8	202,6	0,0	-6,7	-3,2
28/04/14	156,6	200,5	0,0	-6,2	-2,2
29/04/14	151,4	198,9	0,0	-5,2	-1,6
Total (mm)				-75,9	-43,7

Tabla 3.9 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 33,2 mm

	Agua en el suelo (mm/65 cm)		PP (mm)	Disminución contenido agua en el suelo (mm)	
	Forestal	Pastura		Forestal	Pastura
17/06/14	241,0	229,4	0,0	-6,5	-3,4
18/06/14	233,4	226,0	0,0	-7,6	-3,4
19/06/14	228,8	223,3	0,0	-4,6	-2,8
20/06/14	225,6	221,2	0,0	-3,2	-2,0
21/06/14	222,7	219,3	0,0	-2,9	-2,0
22/06/14	220,8	217,8	0,0	-1,9	-1,4
23/06/14	219,2	217,2	0,0	-1,6	-0,6
24/06/14	218,9	216,9	0,0	-0,3	-0,3
25/06/14	216,9	216,0	0,0	-2,0	-0,9
26/06/14	214,2	214,8	0,0	-2,7	-1,2
27/06/14	211,5	213,3	0,0	-2,7	-1,4
28/06/14	207,9	211,9	0,0	-3,6	-1,4
29/06/14	205,5	210,7	0,0	-2,4	-1,2
30/06/14	201,8	207,8	0,0	-3,7	-3,0
01/07/14	202,0	208,2	0,0	0,2	0,4
02/07/14	199,8	207,0	0,0	-2,2	-1,1

03/07/14	197,0	206,2	0,0	-2,8	-0,9
04/07/14	192,9	205,5	0,0	-4,1	-0,7
Total (mm)				-54,7	-27,3

En la Tabla 3.10 la disminución registrada en la cobertura forestal fue menor que en la pastura, apenas 3 mm, pero la disminución diaria tan baja en la cobertura forestal podría estar afectada por los bajos contenidos existentes de agua en suelo (hasta la profundidad evaluada: 65 cm) comparado con los resultados de contenido de agua en la cobertura de pasturas. Estos bajos contenidos de agua estarían generando que la extracción de agua por parte de los árboles a esa profundidad sea mínima.

La evaluación del contenido de agua a mayor profundidad se ha visto dificultada en estos suelos por las características de los mismos (alta presencia de gravas y gravillas y su superficialidad) que hacen imposible la posibilidad de determinar el contenido de agua en el suelo por métodos directos e indirectos, por lo cual se podría estar subestimando el consumo de la cobertura forestal dado que las raíces alcanzan profundidades mayores, pudiendo obtener agua cuando las condiciones superficiales presentan déficit.

Tabla 3.10 Disminución del contenido de agua en el suelo según coberturas en períodos de escasas o nulas precipitaciones. Precipitación en los 5 días previos: 18 mm

	Agua en el suelo (mm/65 cm)		PP mm	Disminución contenido agua en el suelo (mm)	
	Forestal	Pastura		Forestal	Pastura
26/05/15	111,8	152,8	0,0	-3,8	-0,6
27/05/15	109,9	152,2	0,0	-1,9	-0,6
28/05/15	108,0	151,3	0,0	-2,0	-0,9
29/05/15	106,2	150,4	0,0	-1,8	-1,0
30/05/15	105,5	149,8	0,0	-0,7	-0,5
31/05/15	104,6	149,4	0,0	-0,9	-0,5
01/06/15	104,3	148,8	0,0	-0,3	-0,6
02/06/15	103,5	147,9	0,0	-0,8	-0,9
03/06/15	103,5	147,4	0,0	0,0	-0,6
04/06/15	103,5	147,1	0,0	0,0	-0,3
05/06/15	103,5	147,2	0,3	0,0	0,1
06/06/15	103,3	147,7	0,0	-0,2	0,5
07/06/15	103,0	146,7	0,0	-0,3	-1,0
08/06/15	103,0	145,1	0,0	0,0	-1,6
09/06/15	102,6	144,3	1,5	-0,3	-0,8
10/06/15	103,0	144,2	0,0	0,4	0,0
11/06/15	101,0	142,9	0,0	-2,0	-1,3
12/06/15	99,6	140,5	0,0	-1,4	-2,4
13/06/15	98,0	139,0	0,0	-1,6	-1,5
14/06/15	98,3	141,2	0,0	0,3	2,2
15/06/15	98,5	138,3	0,0	0,2	-2,9
16/06/15	98,1	137,0	0,0	-0,4	-1,2
17/06/15	98,4	136,1	0,0	0,3	-1,0
18/06/15	98,4	135,6	0,0	0,0	-0,5
19/06/15	97,9	134,3	0,0	-0,5	-1,3
20/06/15	98,0	133,4	0,0	0,1	-0,9
21/06/15	97,5	133,2	0,0	-0,5	-0,2

22/06/15	97,3	133,0	0,0	-0,2	-0,2
23/06/15	97,1	132,4	0,0	-0,2	-0,6
24/06/15	97,1	131,6	0,0	0,0	-0,8
25/06/15	97,0	131,6	0,0	-0,1	0,0
26/06/15	97,3	131,9	0,0	0,3	0,3
27/06/15	96,9	131,9	0,0	-0,4	0,0
28/06/15	96,7	131,4	0,0	-0,3	-0,5
Total (mm)			1,8	-18,9	-21,9

3.2.4 BALANCE HÍDRICO DE THORNTHWAITTE Y MATHER

Los resultados del balance hídrico se presentan en la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 para los sitios Don Tomás y Nueva Esperanza respectivamente.

Los resultados de DETrel para los sitios experimentales Don Tomás y Nueva Esperanza se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.11 Balance hídrico (T&M): sitio Don Tomás, período enero 2012-setiembre 2015. Resultados de almacenamiento de agua en el suelo (Alm), evapotranspiración real (ETR), deficiencias hídricas (D) y excesos hídricos (E).

Mes	Alm	ETR	D	E	Mes	Alm	ETR	D	E
01/12	2	67	134	0	01/14	62	118	0	0
02/12	105	134	0	126	02/14	102	104	0	0
03/12	77	117	5	0	03/14	84	101	2	0
04/12	57	77	12	0	04/14	105	72	0	64
05/12	63	65	0	0	05/14	105	42	0	91
06/12	48	31	14	0	06/14	105	39	0	9
07/12	29	26	35	0	07/14	105	40	0	119
08/12	105	70	0	111	08/14	57	58	16	0
09/12	105	96	0	46	09/14	70	70	0	0
10/12	105	105	0	243	10/14	105	94	0	58
11/12	40	107	36	0	11/14	105	111	0	153
12/12	105	139	0	158	12/14	105	115	0	93
01/13	43	113	32	0	01/15	105	111	0	72
02/13	75	116	0	0	02/15	51	83	22	0
03/13	105	100	0	38	03/15	18	54	75	0
04/13	94	82	1	0	04/15	12	52	38	0
05/13	105	33	0	106	05/15	82	33	0	0
06/13	69	40	8	0	06/15	77	32	1	0
07/13	84	56	0	0	07/15	63	32	7	0
08/13	51	56	19	0	08/15	105	55	0	226
09/13	56	98	0	0	09/15	105	70	0	10
10/13	42	106	15	0					
11/13	105	119	0	15					
12/13	41	112	35	0					

Tabla 3.12 Balance hídrico (T&M): sitio Nueva Esperanza, período enero 2012-setiembre 2015. Resultados de almacenaje de agua en el suelo (Alm), evapotranspiración real (ETR), deficiencias hídricas (D) y excesos hídricos (E).

Mes	Alm	ETR	D	E	Mes	Alm	ETR	D	E
01/12	4	62	150	0	01/14	81	128	0	0
02/12	110	121	0	85	02/14	110	86	0	67
03/12	61	113	16	0	03/14	110	102	0	29
04/12	43	69	20	0	04/14	110	72	0	68
05/12	25	19	42	0	05/14	110	42	0	50
06/12	18	7	31	0	06/14	110	39	0	5
07/12	11	7	49	0	07/14	110	40	0	118
08/12	110	73	0	31	08/14	68	62	11	0
09/12	79	83	5	0	09/14	108	70	0	0
10/12	36	55	44	0	10/14	110	94	0	47
11/12	14	53	84	0	11/14	110	111	0	110
12/12	110	138	0	27	12/14	110	115	0	26
01/13	44	99	35	0	01/15	110	111	0	80
02/13	53	104	0	0	02/15	55	83	21	0
03/13	101	106	0	0	03/15	20	54	75	0
04/13	89	78	2	0	04/15	12	41	49	0
05/13	110	35	0	104	05/15	52	33	0	0
06/13	80	31	5	0	06/15	51	32	1	0
07/13	88	44	0	0	07/15	40	23	16	0
08/13	71	68	7	0	08/15	110	55	0	200
09/13	110	84	0	25	09/15	110	70	0	8
10/13	64	89	14	0					
11/13	51	96	12	0					
12/13	11	57	129	0					

Tabla 3.13 Deficiencia de evapotranspiración relativa: sitios Don Tomás y Nueva Esperanza, período enero 2012-a setiembre 2015.

Mes	Don Tomás	Nueva Esperanza	Mes	Don Tomás	Nueva Esperanza
01/12	0,67	0,71	01/14	0,00	0,00
02/12	0,00	0,00	02/14	0,00	0,00
03/12	0,04	0,12	03/14	0,02	0,00
04/12	0,13	0,23	04/14	0,00	0,00
05/12	0,00	0,69	05/14	0,00	0,00
06/12	0,31	0,81	06/14	0,00	0,00
07/12	0,57	0,87	07/14	0,00	0,00
08/12	0,00	0,00	08/14	0,22	0,15
09/12	0,00	0,06	09/14	0,00	0,00

10/12	0,00	0,44	10/14	0,00	0,00
11/12	0,25	0,61	11/14	0,00	0,00
12/12	0,00	0,00	12/14	0,00	0,00
01/13	0,22	0,26	01/15	0,00	0,00
02/13	0,00	0,00	02/15	0,21	0,20
03/13	0,00	0,00	03/15	0,58	0,58
04/13	0,01	0,02	04/15	0,42	0,54
05/13	0,00	0,00	05/15	0,00	0,00
06/13	0,17	0,14	06/15	0,05	0,04
07/13	0,00	0,00	07/15	0,18	0,40
08/13	0,26	0,09	08/15	0,00	0,00
09/13	0,00	0,00	09/15	0,00	0,00
10/13	0,13	0,13			
11/13	0,00	0,11			
12/13	0,24	0,69			

La descripción preliminar, obtenida a través de balance T&M y de la DET_{rel} , refiere a la demanda potencial del cultivo de referencia (vegetación herbácea). La caracterización de aspectos estructurales del dosel (IAF) y de la cubierta forestal (crecimiento) permite analizar e inferir -en conjunto con las determinaciones edáficas e hidrológicas- las modificaciones de las relaciones hídricas en el sistema suelo-vegetación-atmósfera.

En forma preliminar se observa una directa asociación entre el almacenaje estimado mediante T&M y el monitoreo continuo del contenido de agua en el suelo bajo pasturas. Ajustes en la calibración del sensoramiento de humedad del suelo y en los parámetros ecofisiológicos del árbol darán oportunidad de evaluar esta asociación con ambas cubiertas vegetales (pastura y forestal).

El patrón estacional y la variación del área foliar encontrada en los rodales -en las diferentes estaciones de crecimiento evaluadas- en los sitios Don Tomás y La Nueva Esperanza- reflejan una asociación con el agua en el suelo. En función del monitoreo hídrico del suelo, se puede observar en términos generales que el contenido de agua bajo rodal presenta menores valores respecto a la cuenca con cobertura de pastura. A su vez se visualiza que esta tendencia es más marcada en el rodal adulto (sitio Don Tomás, en turno de corte final). En el sitio Nueva Esperanza con cobertura forestal joven (4 años) este comparativo de agua en el suelo no se presenta con diferencias tan significativas. Los valores de IAF observados en el rodal adulto (microcuenca Don Tomás) dan cuenta de una condición de dosel cerrado y máxima cobertura de suelo lo que subraya el efecto del dosel sobre la tasa de intercepción y evapotranspiración del sitio. En la microcuenca La Nueva Esperanza se reportan valores de IAF de un rodal joven, que dan cuenta de una condición de dosel en expansión (dosel abierto) y con cobertura parcial de suelo. Esta condición altera la redistribución de la precipitación, la dinámica del agua en el suelo y la tasa de intercepción y de evapotranspiración de manera tal que permite inferir que este efecto se puede atribuir a la cobertura del dosel forestal y a la cobertura herbácea bajo dosel.

3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS SIMPLES

3.3.1 Intercepción del dosel forestal

Entre el 13 de julio de 2006 y el 30 de abril de 2014 se registraron 11298 mm de precipitación total incidente en la microcuenca Don Tomás (forestada), para los cuales fue posible registrar además la precipitación directa y la precipitación fustal. Para el estudio y modelación de la intercepción la información fue analizada en base diaria asumiendo la ocurrencia de un único evento de precipitación al día. En el tratamiento de los datos se procedió a eliminar para el análisis los eventos sin registro precipitación directa o cuando el registro excedía a la precipitación incidente u otros donde la bomba de vaciado del tanque de almacenamiento de precipitación directa falló y el registro resulta incoherente. Los casos en que se obtuvo intercepción negativa (precipitación directa mayor a la incidente) demuestran la existencia de errores en el monitoreo (sobrestimación de la precipitación directa o subestimación en la medida de precipitación incidente). Los eventos no fueron eliminados por presentar incoherencias o datos faltantes en la precipitación fustal, ya que esta componente de la redistribución representa en general menos del 5% del total incidente.

En ese período pudieron registrarse en forma completa, 479 eventos que fueron considerados independientes cuando el intervalo de tiempo sin lluvia que los separa es de al menos 8 horas, período considerado adecuado para el secado completo del dosel (de acuerdo a las tasas medias de evaporación registradas). La distribución de frecuencia de los eventos muestra una marcada asimetría (Figura 3.29).

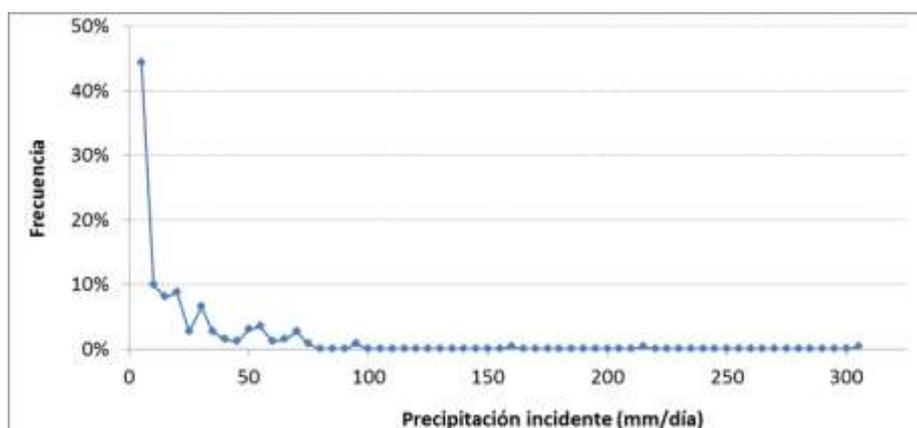


Figura 3.29 Distribución de frecuencia de los eventos de precipitación en DT

El análisis de los eventos distribuidos en dos períodos muestra que la precipitación incidente se distribuye en las componentes analizadas de la siguiente forma:

Tabla 3.14 Redistribución de la precipitación según edad en Don Tomás

Período	Edad plantación (años)	Precipitación directa (%P)	Precipitación fustal (%P)	Intercepción (%P)
2006-2009	8-11	79	4	17
2010-2014	12-16	82	5	13

Se evidencia una disminución de la intercepción en el segundo período de análisis, al aumentar la edad de la plantación por encima de los 11 años.

Respecto a la intercepción, a pesar de la alta dispersión de los datos, se observa una relación de tipo logarítmica (Figura 3.30) que indica la tendencia decreciente a una asíntota en la intercepción al aumentar la precipitación incidente. Para valores medios de precipitación diaria (20-40 mm) se tiene que la intercepción representa entre 20 y 30% de la precipitación total incidente, mientras que para valores extremos (60-90 mm) ésta disminuye entre un 18-10%, en la parcela experimental de Don Tomás.

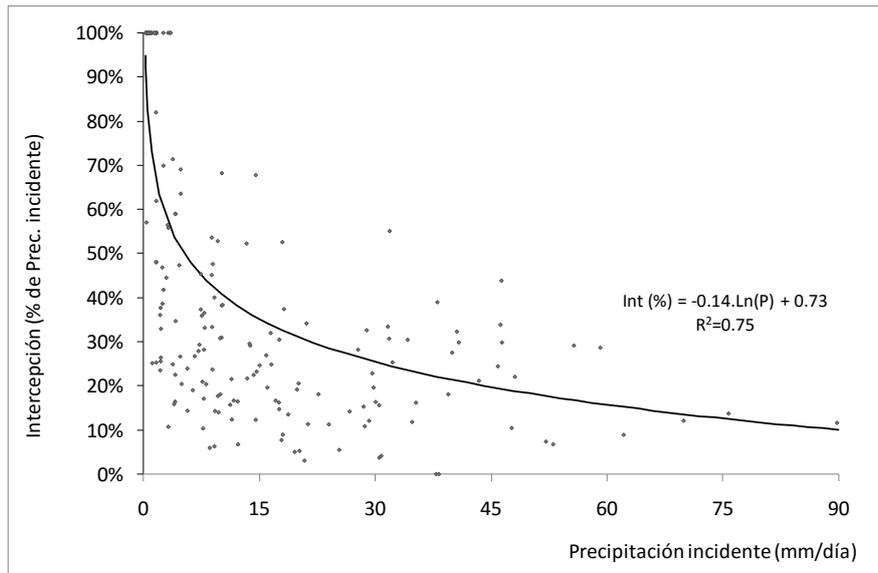


Figura 3.30 Variación de la intercepción con la precipitación incidente a nivel diario (Don Tomás).

Por su parte la redistribución de precipitación en la microcuenca forestada del establecimiento LNE, se comenzó a monitorear en mayo de 2015, registrándose en forma completa, 32 eventos que totalizan 470 mm de precipitación total incidente. El tratamiento de la información monitoreada siguió la misma metodología explicada anteriormente, resultando en que globalmente la precipitación incidente se distribuye en las componentes analizadas de la siguiente forma: precipitación directa 81%; precipitación fustal 6%, intercepción 13%, mostrando la intercepción un comportamiento decreciente en función de la precipitación total incidente hacia una asíntota cercana a ese valor, como se observa en la Figura 3.31.

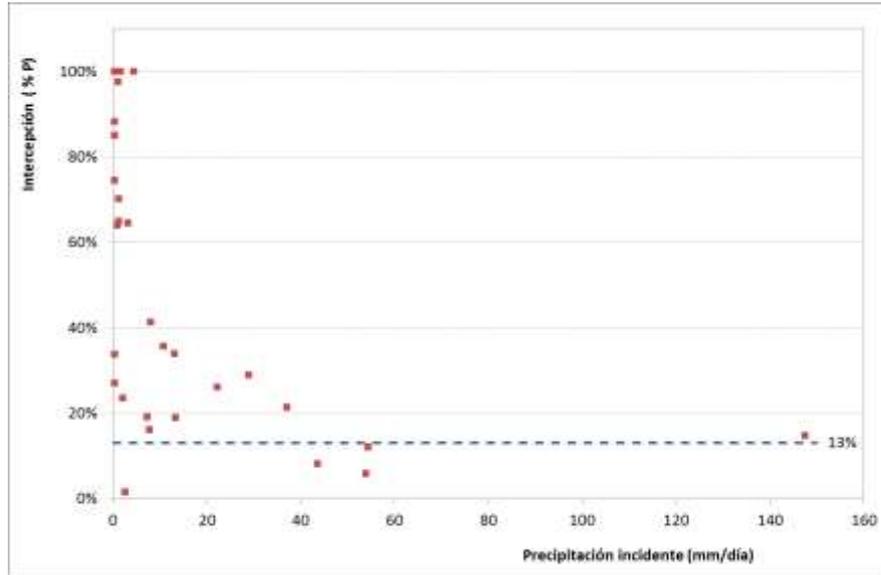


Figura 3.31 Relación Intercepción – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE

Parámetros del dosel forestal

Los valores de los parámetros relacionados al escurrimiento fustal, Sf y pf fueron estimados a partir de la regresión lineal entre precipitación fustal y precipitación incidente, resultando en 0,05 mm y 0.10 para la plantación de DT y 0,06 y 0,13 para LNE, respectivamente, como se muestra en la Figura 3.32 y Figura 3.33.

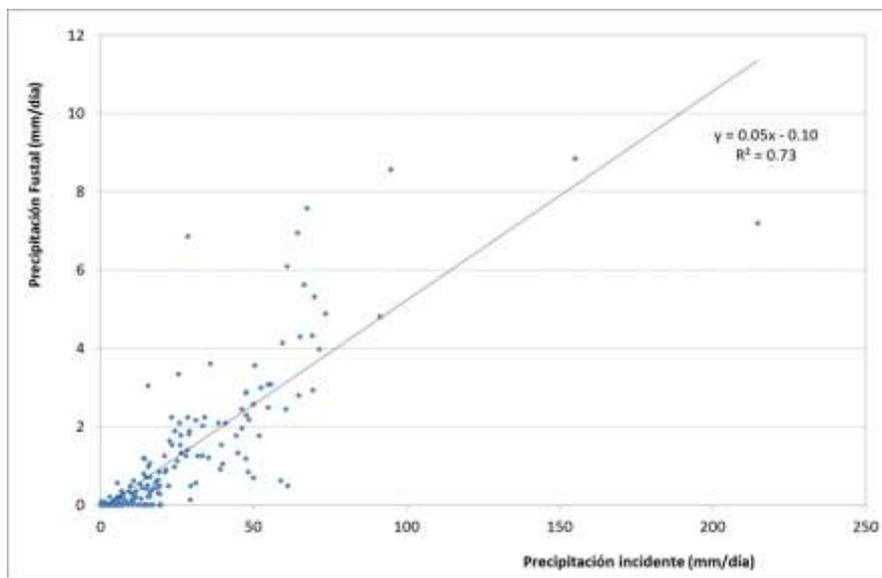


Figura 3.32 Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios en DT

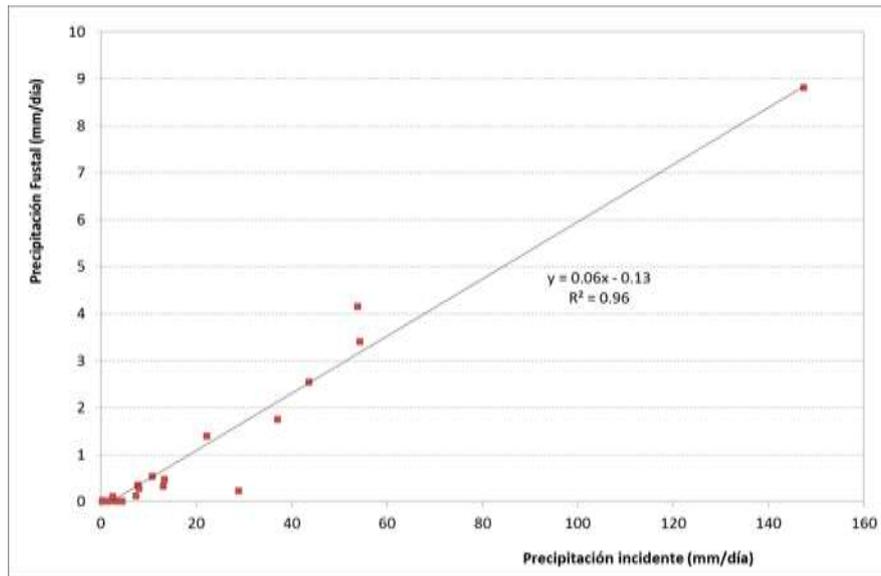


Figura 3.33 Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE

En segundo lugar y siguiendo la técnica de Leyton et al. (1967) se determinaron los parámetros de almacenamiento del dosel (S) y coeficiente de atravesamiento libre (p_d). La Figura 3.34 y la Figura 3.35 muestran la relación entre la precipitación directa y la precipitación total incidente para los eventos diarios seleccionados, se observan en ella las características típicas de esta relación (Rutter et al., 1971). El umbral de inflexión para la determinación de la envolvente superior se estableció en 1,6 mm.

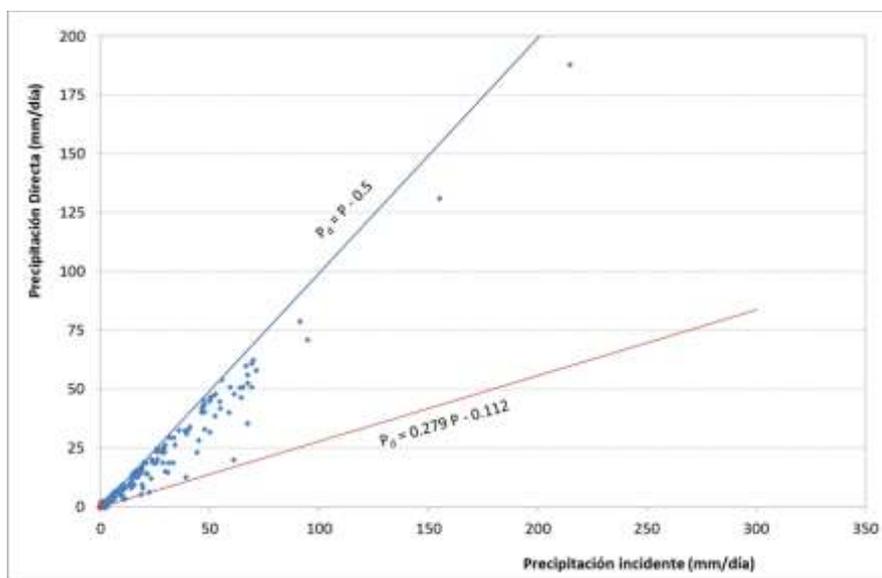


Figura 3.34 Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios en DT

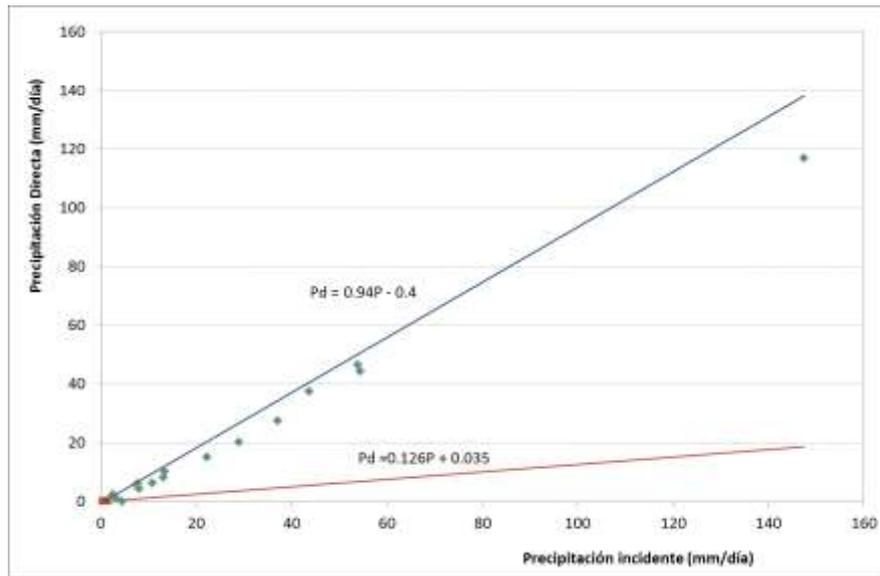


Figura 3.35 Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios en LNE

Como resultado se obtiene para la plantación de DT una estimación del parámetro S de 0,50 mm y del coeficiente pd de 0,279. El coeficiente c (cobertura del dosel) se estima como el complemento de pd, (1-pd), siendo entonces su valor de 0,721. Mientras que para LNE, el parámetro de almacenamiento S puede estimarse en 0,40mm, sin embargo los valores obtenidos para pd y c no se condicen con la menor cobertura de esta plantación más joven, resultado que puede deberse a la poca cantidad de eventos con los que se cuenta hasta el momento para las estimaciones.

Ajuste del modelo de Gash

El modelo de Gash se plantea entonces únicamente para la plantación de DT que es la que cuenta con mayor serie de datos. La principal variable de entrada del modelo es la precipitación total incidente que se ingresa en forma acumulada diaria. La evaporación potencial es la segunda variable de entrada en el modelo de Gash siendo necesario ingresarla con paso horario.

Los parámetros involucrados en ambos modelos pueden clasificarse como parámetros atmosféricos: tasas medias de precipitación y evaporación y parámetros estructurales del dosel ya descritos y calculados en el ítem anterior.

En la primera implementación del modelo de Gash (Alonso 2011), se realizó su calibración en función de los parámetros de cálculo de la resistencia aerodinámica del dosel forestal. En ese trabajo la evapotranspiración potencial se calcula utilizando la formulación de Penman-Monteith y considerando nula la resistencia del dosel y se determinó como mejor aproximación para la resistencia aerodinámica la formulación de Lankreijer et al (1993) en combinación con la estimación de los parámetros planteada por Abtew et al (1989).

Las tasas medias de precipitación y evaporación calculadas para todo el período se presentan en la Tabla 3.15 y Tabla 3.16 respectivamente.

Tabla 3.15 Tasas medias de precipitación para la aplicación del modelo de Gash

	$\bar{P} (mm/h)$											
	ene	feb	Mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	Dic
año 2010	10.4	2.9	3.6	--- ⁽¹⁾	1.0	2.8	--- ⁽¹⁾	--- ⁽¹⁾	2.4	2.6	7.6	3.3
año 2011	8.3	2.2	2.7	5.4	--- ⁽¹⁾	3.9	5.1	2.7	7.9	4.6	4.0	4.9
año 2012	2.2	0.5	1.9	4.5	1.1	0.3	0.8	2.5	1.4	5.8	--- ⁽¹⁾	7.6
año 2013	6.54	3.8	8.2	4.6	0.9	2.9	2.8	2	1.3	2.6	4	2.2
año 2014	10.7	4.4	3.5	3.7								

⁽¹⁾La precipitación en estos meses no alcanza a la de saturación del dosel

Tabla 3.16 Tasas medias de evapotranspiración de agua libre para la aplicación del modelo de Gash

	$\bar{E} (mm/h)$											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	Dic
año 2010	0.68	0.60	0.47		0.24	0.22			0.40	0.36	0.83	0.58
año 2011	0.67	0.67	0.41	0.31		0.19	0.22	0.18	0.35	0.36	0.60	0.61
año 2012	0.69	0.31	0.53	0.30	0.22	0.17	0.15	0.21	0.40	0.66		0.49
año 2013	0.61	0.48	0.50	0.27	0.14	0.21	0.19	0.26	0.27	0.34	0.35	0.47
año 2014	0.37	0.43	0.43	0.23								

Con esta información se implementó el modelo, obteniéndose los resultados que se presentan en forma acumulada en la Figura 3.36.

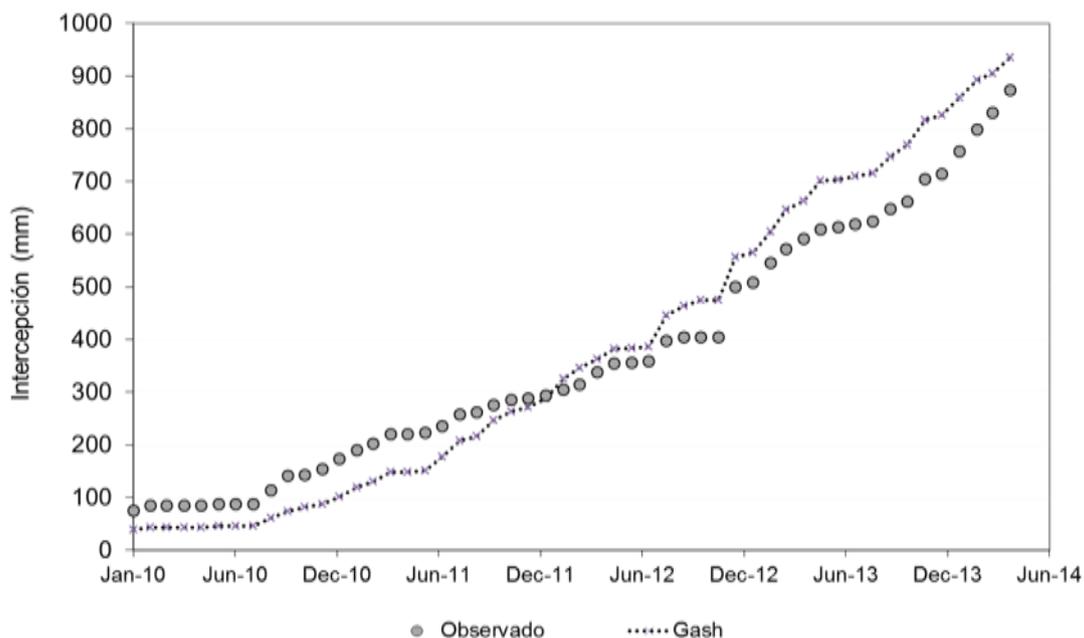


Figura 3.36 Intercepción observada e intercepción simulada acumuladas en el período de validación

La simulación presenta un muy buen ajuste con la serie de datos observados, el cual se verifica mediante el número de Nash obtenido de 0,81 y una diferencia entre los volúmenes acumulados de 7,1%.

Con el modelo de redistribución de la precipitación así validado se procedió a simular la serie completa de precipitación del período. Los resultados acumulados a nivel mensual se presentan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Intercepción mensual simulada con el modelo de Gash

	<i>I (mm / mes)</i>											
	ene	Feb	Mar	Abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	Dic
año 2010	47.9	213.	239.	255.	282.	299.	323.	340.	367.	389.	400.	413.
año 2011	9.2	37.4	12.1	30.9	24.8	20.6	25.9	33.9	8.8	31.7	18.7	7.8
año 2012	17.4	96.4	26.6	13.8	18.4	7.4	2.4	51.7	40.1	74.7	13.6	82.8
año 2013	13.7	41.1	41.1	17.3	24.9	1.5	18.1	6.5	31.8	24.9	47.3	15.2
año 2014	33.1	34.1	22.4	31.0								

3.3.2 MODELO DE ZHANG

En términos de escala media anual, la evapotranspiración es el principal proceso hidrológico que explica la modificación del caudal específico como resultado del cambio de uso de los suelos (Zhang et al., 1999, 2001). Holmes y Sinclair (1986) establecieron una relación entre la evapotranspiración media anual y la precipitación media anual para predecir el incremento del caudal específico cuando en Victoria, Australia, se sustituyeron, a escala de cuencas, plantaciones forestales por pasturas. Para establecer esta relación, se asume que los cambios en el contenido de humedad del suelo y en el almacenamiento del acuífero superior son despreciables frente a la magnitud de los restantes componentes del balance hídrico (precipitación, caudal específico y evapotranspiración), según se expuso en la sección 3.1. Zhang et al. (1999, 2001) extendieron el trabajo de Holmes y Sinclair (1986) incluyendo resultados de 250 estudios a escala mundial. El resultado se expresa en dos curvas que muestran la evapotranspiración media anual en función de la precipitación media anual, para pasturas y plantaciones forestales. Estas curvas se reproducen en las Figuras 5.8 y 5.19, en las que también se incluyen los valores de evapotranspiración anual resultantes del balance hídrico en Don Tomás – La Cantera y La Nueva Esperanza, respectivamente.

A partir de estas relaciones, Zhang et al. (2001) desarrollaron una relación simple, de dos parámetros, para estimar la evapotranspiración media anual a escala de cuencas, con cobertura de pasturas naturales y plantaciones forestales.

En la medida que solo se cuenta con resultados que se ajusten a dicho modelo en Don Tomás y La Cantera, puesto que la plantación en La Nueva Esperanza es muy joven, se entendió inconveniente ajustar el modelo de Zhang a nivel nacional. No obstante, es una posibilidad a considerar en un nuevo proyecto que tenga por objetivo avanzar en cambios de escala espacial.

3.3.3 MODELO DE TEMEZ

Para la implementación del método de Temez en cualquier cuenca de nuestro país, es necesario conocer el valor de los cuatro parámetros del modelo: Hmax, CPo, Imax y α . A nivel nacional está validada una calibración regional consistente en determinar un único valor para cada uno de los parámetros válido para cualquier punto del país, en base a regionalizar el parámetro Hmax vinculándolo al valor de Agua Disponible del suelo (AD), mediante la relación $H_{max} = CAD * AD$, cuyos valores se presentan en la Tabla 3.18:

Tabla 3.18 Valores de los parámetros calibrados del modelo de Temez (tomados de (MVOTMA-DINAGUA-IMFIA, 2011))

Parámetro	CAD	CPo	α (1/día)	Imáx (mm)
Valor Calibrado	0.92	0.30	0.0775	386

Como hipótesis estos valores regionales serían válidos para simular series de escurrimiento de aquellas microcuencas bajo cobertura de pasturas naturales, ya que ésta fue la condición de calibración y regionalización original. Realizando la simulación, durante el período seleccionado, en la cuenca de La Cantera y en las dos de LNE durante el período previo a la plantación, se obtienen los siguientes indicadores de ajuste:

Tabla 3.19 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros regionales

Microcuenca	Período	R ²	Nash	Diferencia de volumen (%)
La Cantera	Ene/07 a Dic/11	0.92	0.77	8.1
	Ene/12 a Set/15	0.94	0.80	11.4
LNE_pastura	Ene/08 a Dic/12	0.87	0.76	0.4
	Ene/13 a Set/15	0.86	0.63	25.0
LNE_forestal	Ene/08 a Ene/11	0.91	0.81	-0.6

Si bien el ajuste se valora como adecuado, se procede a una calibración local de los parámetros en estas microcuencas con el objetivo de ajustar el modelo con mejor comportamiento y analizar la variación de los parámetros dada por la cobertura forestal. Los ajustes logrados y los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 3.20 y Tabla 3.21. La comparación gráfica de las observaciones con la simulación regional y local en cada cuenca se observa en la Figura 3.37 a Figura 3.41.

Tabla 3.20 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros locales en cuencas de pastura

Microcuenca	Período	R ²	Nash	Diferencia de volumen (%)
La Cantera	Ene/07 a Dic/11	0.91	0.78	-0.4
	Ene/12 a Set/15	0.91	0.81	4.7
LNE_pastura	Ene/08 a Dic/12	0.86	0.74	-9.6
	Ene/13 a Set/15	0.85	0.66	15.9
LNE_forestal	Ene/08 a Ene/11	0.91	0.82	0.2

Tabla 3.21 Parámetros locales del modelo de Temez en cuencas de pastura

Microcuenca	CAD	CPo	α (1/día)	Imáx (mm)
La Cantera	0.63	0.30	2.325	1400
LNE_pastura	0.55	0.50	2.325	1400
LNE_forestal	1	0.25	2.325	386

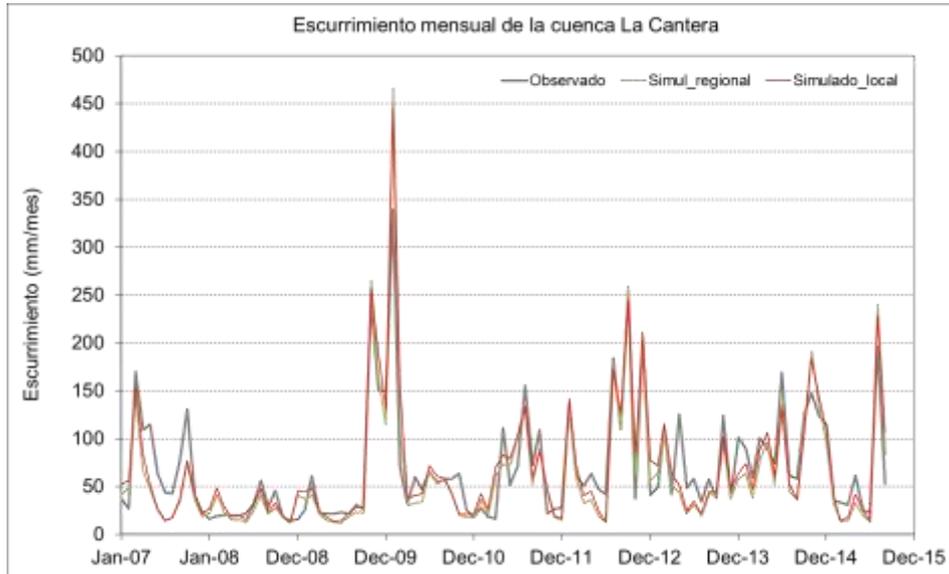


Figura 3.37 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca La Cantera

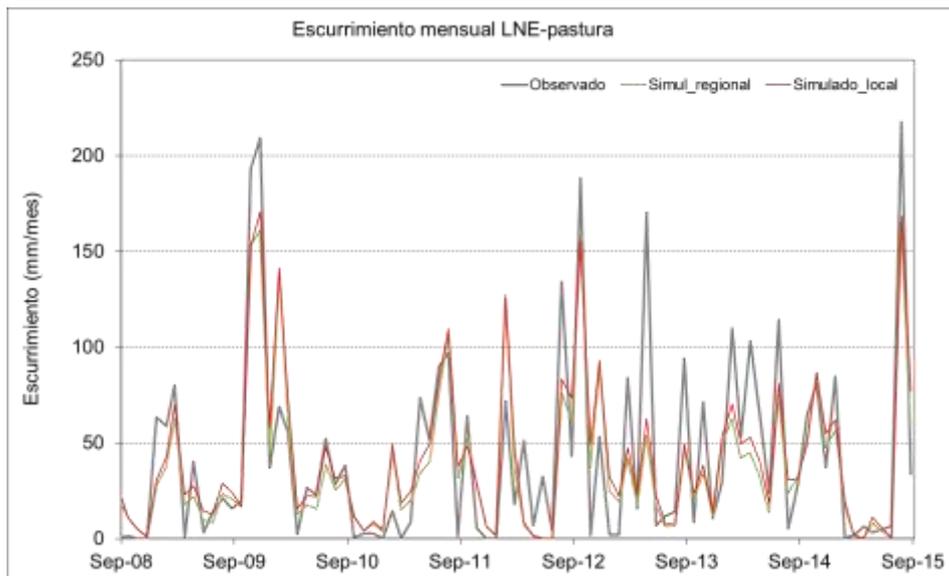


Figura 3.38 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE pastura

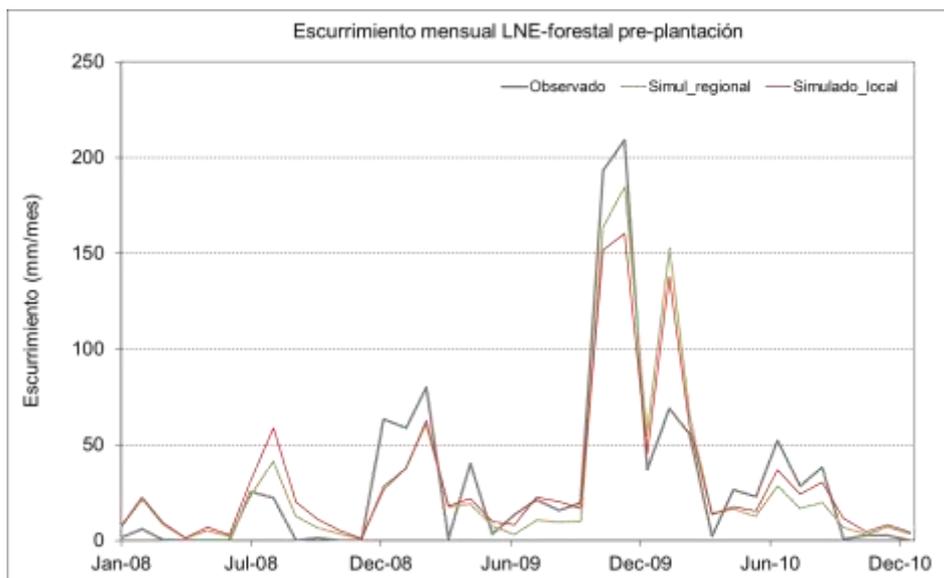


Figura 3.39 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE forestal (pre plantación)

Se entiende que en ningún caso los parámetros locales mejoran significativamente el ajuste de la simulación. Se implementará entonces el modelo en las cuencas forestadas en forma ponderada considerando las áreas de cada cobertura (56% forestado en DT y 47% forestado el LNE) manteniendo los parámetros regionales originales del modelo para el área cubierta por pasturas y considerando dos alternativas de trabajo para las zonas bajo forestación:

- a) Considerar que en la zona forestada la precipitación que alcanza el suelo es la precipitación neta, es decir descontando la interceptación del dosel.
- b) Considerar la Evapotranspiración de la zona forestada (ETf) como la resultante del modelo de Zhang.

La hipótesis b) presenta por su lado la ventaja de la mayor simplicidad del modelo de Zhang, frente al modelo de Gash, para su aplicación. Ambas hipótesis resultan adecuadas en el caso de la cuenca de Don Tomás ya que se trata de un monte con dosel completamente desarrollado pero no resultan completamente válidas en LNE ya que apenas ha comenzado a cerrar el dosel, en este caso deberían modificarse parámetros que tengan en cuenta el manejo del suelo ya que a esto se deben las mayores reducciones de escurrimiento en esta cuenca durante el período. En la Tabla 3.22 se presentan los indicadores de ajustes de los períodos de validación para las cuencas forestadas y en las Figura 3.39 y Figura 3.40 la representación de los datos observados y ambas simulaciones para las dos microcuencas forestadas.

Tabla 3.22 Ajuste de simulación del modelo Temez con parámetros regionales en cuencas forestadas

Microcuenca	Período	Modelo original			Considerando interceptación			Considerando ETf (Zhang)		
		R ²	Nash	ΔV (%)	R ²	Nash	ΔV (%)	R ²	Nash	ΔV (%)
Don Tomás	Ene/07-Dic/14	0.73	0.53	-28.3	0.85	0.69	-5.6	0.85	0.50	-36.9
LNE_forestal	Abr/11-Set/15	0.60	0.46	-14.8	0.77	0.53	-1.8	0.75	0.38	-21.8

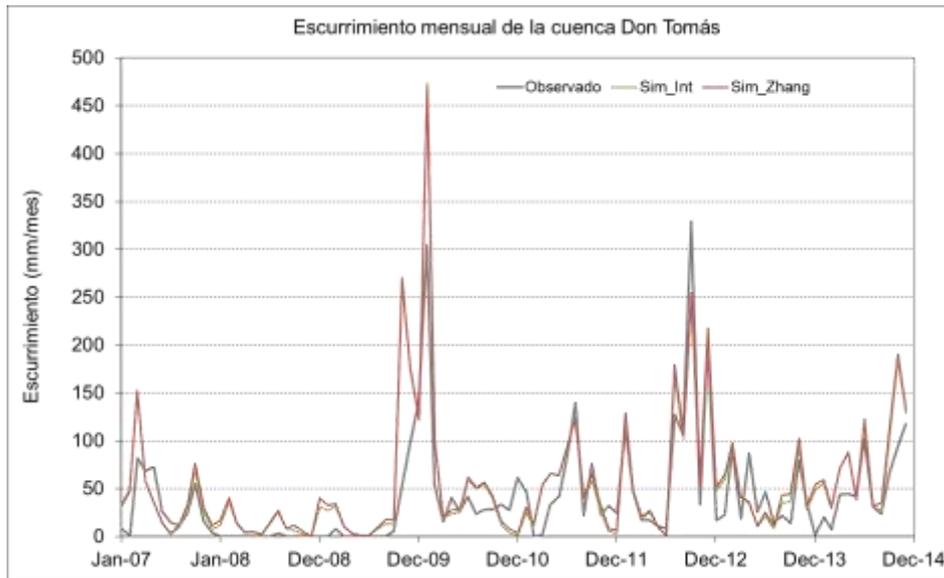


Figura 3.40 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca DT

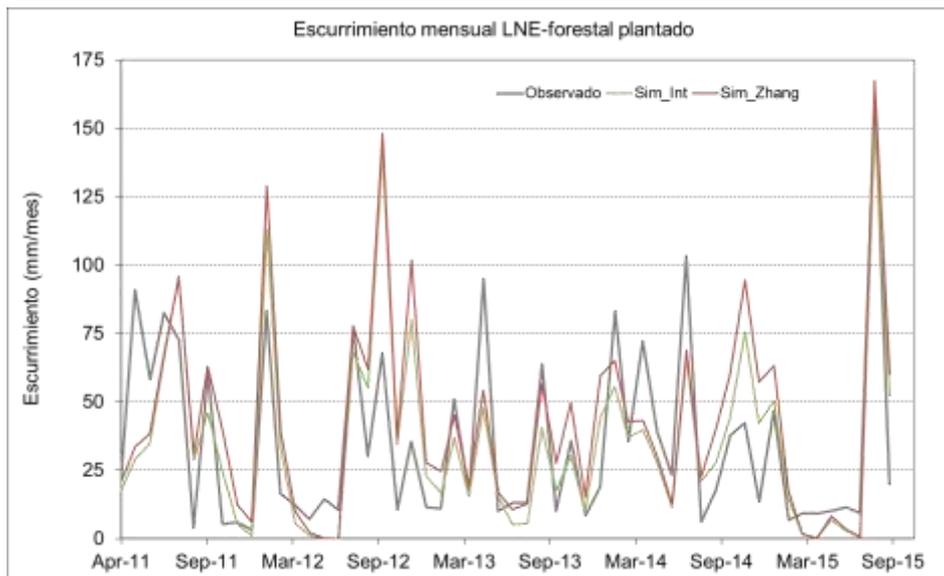


Figura 3.41 Ajuste del modelo de Temez en la microcuenca LNE forestal (posplantación)

Los resultados muestran que para ambas cuencas forestadas la variante a) del modelo tiene un desempeño ampliamente superior a la variante b), esto permite concluir que es posible ajustar satisfactoriamente un modelo mensual, que resulte útil a los efectos de la gestión del recurso hídrico, en base a los modelos de Temez y Gash. Dicho modelo representa con un buen ajuste los volúmenes escurridos a nivel mensual en base a la precipitación incidente en la cuenca, el ciclo medio de evapotranspiración potencial para la zona y la modelación de intercepción conociendo los parámetros estructurales del dosel.

3.3.4 Variación del número de curva (NRCS) debido al cambio de uso de suelo entre pasturas naturales y monte forestal.

Cuencas La Cantera y Don Tomás

En la Tabla 3.23 y Tabla 3.24 se presenta para cada evento recopilado la precipitación y volúmenes de escorrentía medidos en las cuencas La Cantera y Don Tomas respectivamente, utilizados en el análisis. Además se presenta el valor del almacenamiento máximo potencial (S) y el parámetro CN calculados a partir de la ecuación propuesta por el NRCS.

Tabla 3.23 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca La Cantera (pasturas naturales)

Evento	Fecha	P total (mm)	Vesc (mm)	S (mm)	CN(NRCS)
1	Junio 2006	31	6	48	84
2	Diciembre 2006	58	19	62	80
3	Agosto 2008	74	23	84	75
4	Noviembre 2009	37	18	24	91
5	Noviembre 2009_2	52	31	25	91
6	Febrero 2012	121	29	174	59
7	Febrero 2012_b	103	49	72	78
8	Febrero 2012_c	48	9	83	75
9	Marzo 2012	112	45	97	72
10	Marzo 2012_b	46	12	62	80
11	Mayo_2012	55	25	41	86
12	Agosto_2012	31	5	58	81
13	Agosto_2012_b	64	38	30	89
14	Agosto_2012_c	138	91	51	83
15	Septiembre 2012	96	51	57	82
16	Septiembre 2012_b	52	19	49	84
17	Octubre_2012	56	19	58	81
18	Octubre_2012_b	207	144	67	79
19	Diciembre_2012	273	103	255	50
20	Diciembre_2012_b	93	40	74	77
21	Febrero 2013	48	12	65	80
22	Febrero 2013_b	48	11	72	78
23	Febrero 2013_c	70	19	91	74
24	Marzo_2013	65	5	172	60
25	Marzo_2013_b	90	34	85	75
26	Abril 2013	51	7	100	72
27	Abril 2013_b	39	6	76	77
28	Mayo 2013	108	56	66	79
29	Setiembre_2013	104	34	115	69
30	Octubre 2013	35	6	64	80
31	Octubre_2013_b	40	6	77	77
32	Noviembre 2013	45	10	70	79
33	Noviembre 2013_b	84	41	55	82
34	Febrero 2014	144	101	46	85
35	Febrero 2014_b	36	13	36	88
36	Abril 2014	118	114	3	99
37	Julio 2014	90	41	67	79
38	Julio 2014_b	38	26	13	95
40	Octubre_2014	74	19	100	72
41	Noviembre 2014	43	10	62	80
42	Noviembre 2014_b	88	28	98	72
43	Noviembre 2014_c	42	11	54	83

Tabla 3.24 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca Don Tomás (monte forestal)

Evento	Fecha	P total (mm)	Vesc (mm)	S (mm)	CN(NRCS)
1	Junio 2006	34	3	86	75
2	Diciembre 2006	59	5	148	63
3	Agosto 2008	67	3	208	55
4	Noviembre 2009	38	0.5	146	64
5	Noviembre 2009_2	53	9	95	73
6	Febrero 2012	117	7	328	44
7	Febrero 2012_b	103	8	265	49
8	Febrero 2012_c	48	2	159	62
9	Marzo 2012	109	19	192	57
10	Marzo 2012_b	45	1	149	63
11	Mayo_2012	55	3	166	60
12	Agosto_2012	31	1	109	70
13	Agosto_2012_b	64	2	207	55
14	Agosto_2012_c	138	20	268	49
15	Septiembre 2012	96	26	123	67
16	Septiembre 2012_b	52	1	202	56
17	Octubre_2012	56	4	152	63
18	Octubre_2012_b	207	32	392	39
19	Diciembre_2012	276	24	681	27
20	Diciembre_2012_b	95	12	197	56
21	Febrero 2013	48	1	159	61
22	Febrero 2013_b	55	2	186	58
23	Febrero 2013_c	70	3	221	54
24	Marzo_2013	54	4	141	64
25	Marzo_2013_b	91	1	383	40
26	Abril 2013	53	1	180	59
27	Abril 2013_b	40	1	128	66
28	Mayo 2013	108	3	358	42
29	Setiembre_2013	107	11	246	51
30	Octubre 2013	32	2	88	74
31	Octubre_2013_b	41	2	125	67
32	Noviembre 2013	61	3	188	58
33	Noviembre 2013_b	84	12	166	60
34	Febrero 2014	148	11	386	40
35	Febrero 2014_b	36	3	92	73
36	Abril 2014	120	19	225	53
37	Julio 2014	80	25	89	74
38	Julio 2014_b	42	17	36	87
40	Octubre_2014	74	9	159	61
41	Noviembre 2014	43	6	86	75
42	Noviembre 2014_b	88	20	128	67
43	Noviembre 2014_c	42	7	79	76

A partir de estos resultados, se calcularon la media aritmética, la mediana y la media geométrica de los CN obtenidos, así como su desviación estandar para ambas cuencas, lo que se presenta en la Tabla 3.25. Se observa una clara disminución del número de curva (CN), del orden de 20 puntos al cambiar la cobertura de pasturas naturales a monte forestal. Se observa asimismo que esta diferencia es el doble que la desviación estándar.

Tabla 3.25 Parámetros estadísticos básicos de los resultados del CN para La Cantera y Don Tomás.

Cuenca	Media Aritmética	Media Geométrica	Mediana	Desviación Estandar
La Cantera	79	78	80	8.9
Don Tomás	60	58	61	12.1

A efectos de analizar la variabilidad encontrada en el número de curva en cada una de las cuencas, se siguió la idea propuesta por Hawkins (1993), en cuanto a que habitualmente, el número de curva (CN) tiene una relación funcional fuerte con la precipitación del evento. En las Figura 3.42 y Figura 3.43, se presentan la variación de CN con la precipitación incluyendo el ajuste de una función potencial y una función exponencial respectivamente para la cuenca La Cantera. Dicho ajuste se realiza dejando igual número de eventos por encima y por debajo de la curva ajustada. Las Figura 3.44 y Figura 3.45 presentan resultados análogos para la cuenca Don Tomás. A efectos de valorar la dispersión de los resultados, se presenta el valor de R^2 en todas las gráficas. Además, se agregan 2 líneas punteadas (superior e inferior) que corresponden a los valores de número de curva para los dos estados de escurrimiento antecedente-ARC (ex. Condiciones de humedad antecedente AMC) previsto en el método de NRCS. Estas condiciones de escurrimiento antecedente son una medida del error por considerar un único valor de CN, considerando que existen elementos que afectan CN, no incorporados en el modelo: intensidad de lluvia, contenido de humedad antecedente, distribución espacial de la lluvia, heterogeneidad del suelo, etc.

En ambas cuencas, es clara la dependencia decreciente del CN con la precipitación, siendo esto más evidente en el caso de la cuenca Don Tomás, donde el R^2 es alrededor de 0.70. En ambas cuencas, se observa que prácticamente todos los eventos están comprendidos en el intervalo de ARC-I y ARC-III. Esto muestra que aceptado como válido el ajuste potencial o exponencial para ambas cuencas, dada una precipitación medida o de diseño, con la función $CN=f(P)$ se determina un valor de CN el cual tiene una incertidumbre menor o igual a la de los CN presentados en la Tabla original del método NRCS, para una cobertura dada.

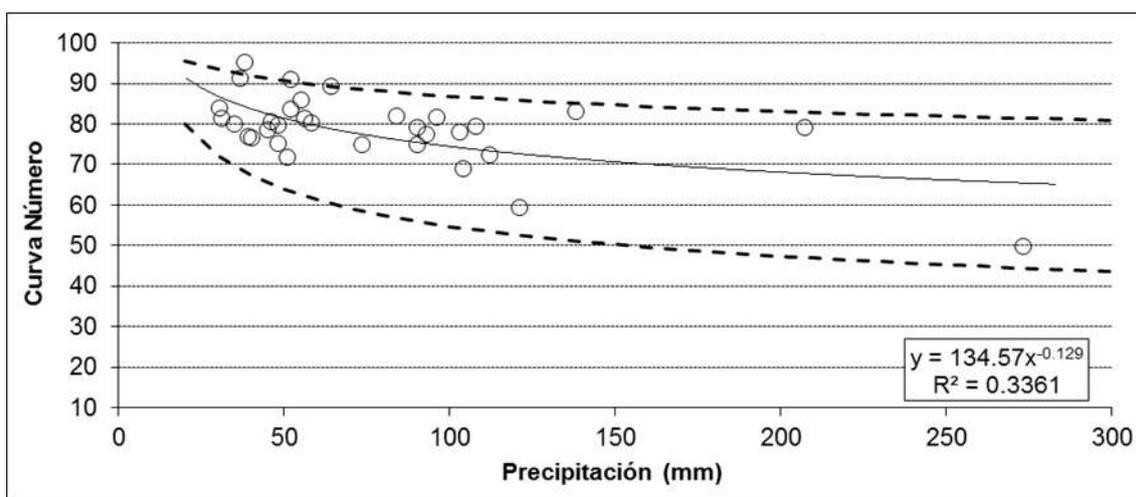


Figura 3.42 Relación $CN=f(P)$, ajuste potencial (línea llena), cuenca La Cantera (pasturas naturales)

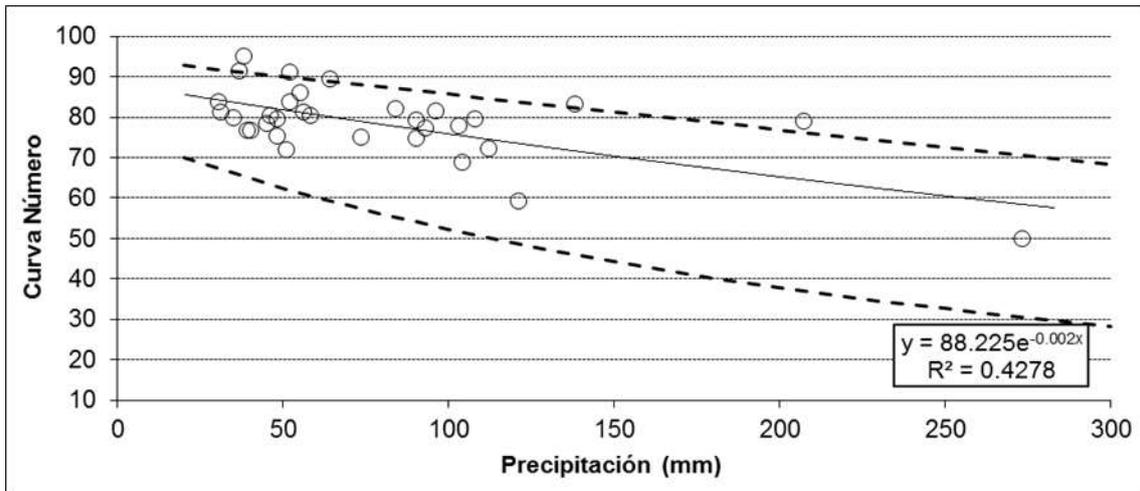


Figura 3.43 Relación $CN=f(P)$, ajuste exponencial (línea llena), cuenca La Cantera (pasturas naturales)

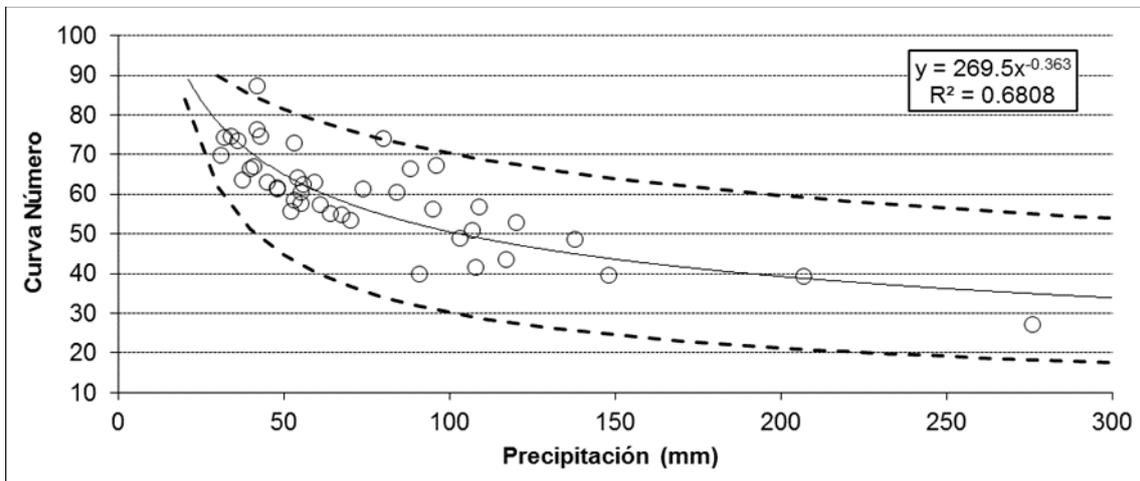


Figura 3.44 Relación $CN=f(P)$, ajuste potencial (línea llena), cuenca Don Tomás (monte forestal)

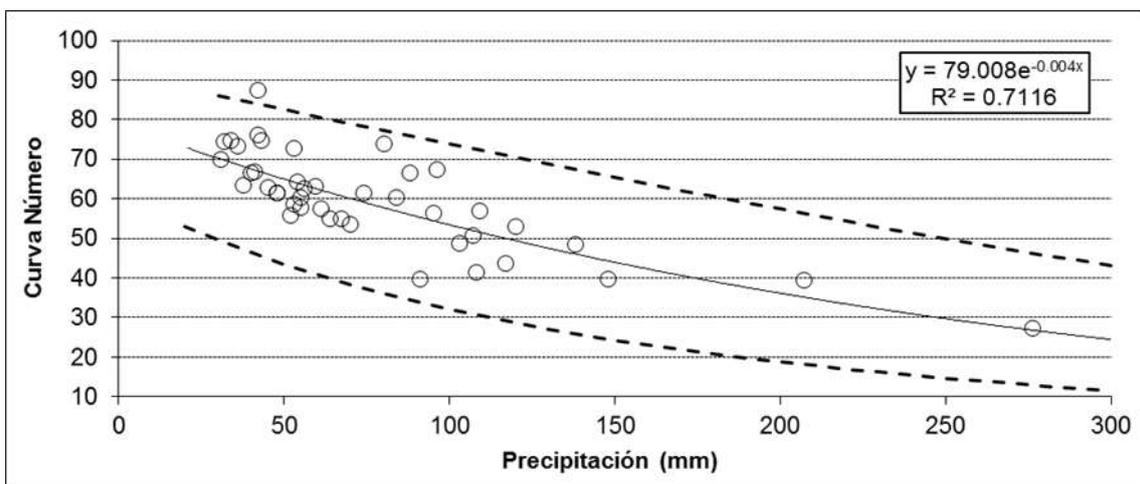


Figura 3.45 Relación $CN=f(P)$, ajuste exponencial (línea llena), cuenca Don Tomás (monte forestal)

En cuanto al método asintótico propuesto por Hawkins, en ambas cuencas se aprecia que el comportamiento es de tipo complaciente, es decir no se identifica una asíntota de CN en los eventos registrados. En ese caso, el CN debe estimarse a partir de la función $CN = f(P)$ ajustada. Por otra parte, para tormentas extremas superiores a las registradas, Hawkins propone determinar el CN de referencia (CN_{∞}), a partir del ajuste de la función:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})e^{-kP} \quad [4]$$

Donde k es una constante de decaimiento exponencial del CN con la precipitación. Fue ajustada en cada cuenca la expresión 4 y se determinaron por el método de mínimos cuadrados los valores de k y CN_{∞} . En la cuenca La Cantera, el valor de CN_{∞} resultó 77 mientras que en la cuenca Don Tomás, si se ajustan simultáneamente k y CN_{∞} , este último resulta 37; mientras que si se fija k=0.04 (obtenido del ajuste exponencial Figura 3.45) y luego se ajusta CN_{∞} , este resulta 55.

En la Tabla 3.26 se presenta un resumen de los números de curva (CN) característicos obtenidos.

Tabla 3.26 Resumen de CN característicos obtenidos mediante NRCS y el método asintótico Hawkins.

Cuenca	NRCS (USDA, 2007)				Hawkins (1993)	
	Media Aritmética	Media Geométrica	Mediana	Desviación Estandar	CN_{inf}	$CN=f(P)$
La Cantera	79	78	80	8.9	77	$CN(P)=88.225e^{-0.002P}$
Don Tomás	60	58	61	12.1	55	$CN(P)=79.008e^{-0.004P}$

La Tabla 3.26 pone de manifiesto que si en la cuenca La Cantera (pasturas naturales) el número de curva es aproximadamente 80, el cambio de cobertura a una plantación forestal adulta que ocupa el 56% del área de la cuenca (cuenca Don Tomás) provoca una disminución de 20 puntos, hasta un número de curva aproximadamente 60.

El cálculo del CN_{∞} a través del método de Hawkins pone de manifiesto la necesidad de continuar el monitoreo a efectos de disponer de nuevos eventos mayores a los registrados hasta la fecha. Esto permitirá definir con mejor precisión los valores de k y CN_{∞} .

Por otra parte, a los efectos de contrastar esta tendencia con las tendencias publicadas a nivel internacional en los manuales de referencia, se presenta en la Figura 3.46 la variación del número de curva versus el porcentaje del área de la cuenca ocupado por monte forestal, para diferentes especies (cuencas forestadas en Estados Unidos) que no incluyen eucaliptos ni pino. Fue incluido en la Figura 3.46 el resultado del número de curva obtenido para las cuencas La Cantera y Don Tomás, cuya tendencia es concordante con la de las diferentes especies reportadas. En dicha figura, C y B hacen referencia al grupo hidrológico (ambos presentes en las cuencas) y “Herbaceus” representa un mezcla de pastizales, malezas y arbustos de crecimiento bajo.

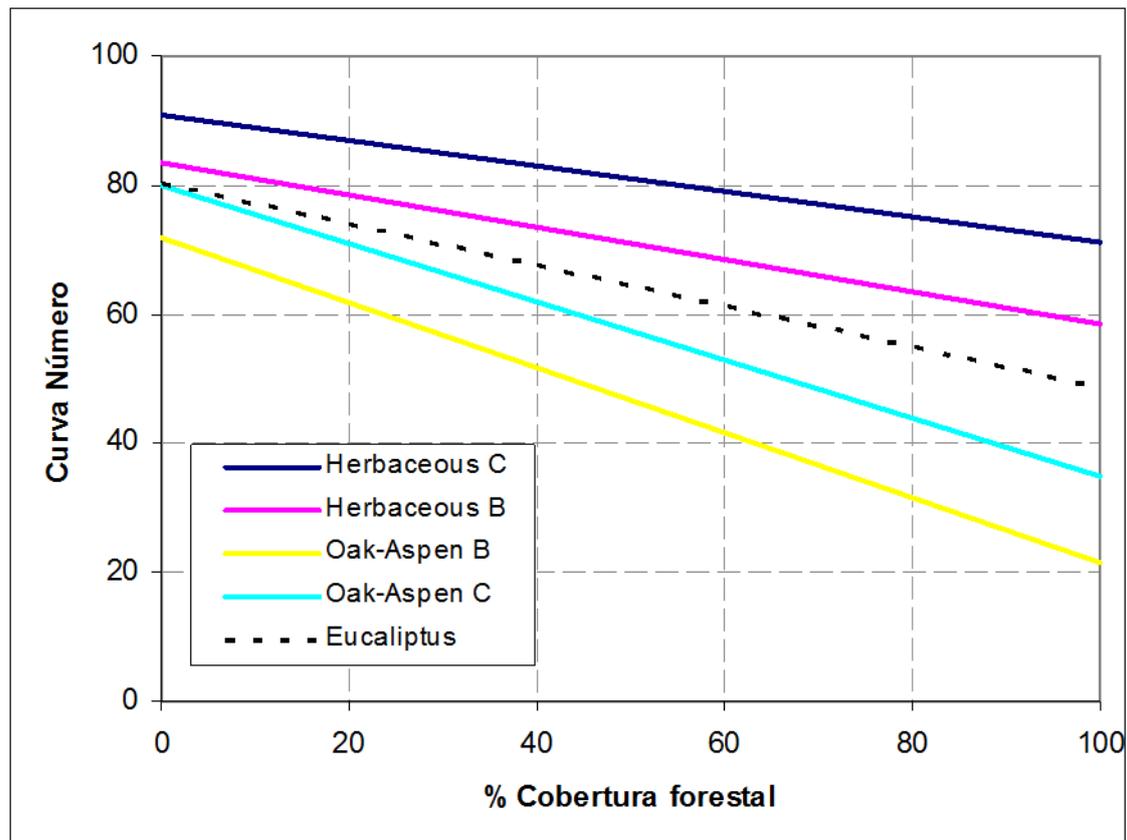


Figura 3.46 Variación del número de curva con el porcentaje de cobertura forestal para diferentes especies reportadas en Estados Unidos (NRCS). Se agrega el resultado obtenido en las cuencas La Cantera (cobertura forestal 0%) y Don Tomás (cobertura forestal 60%) como “Eucaliptus”.

Cuencas del establecimiento La Nueva Esperanza

En la Tabla 3.27 y Tabla 3.28 se presenta para cada evento recopilado la precipitación y volúmenes de escorrentía medidos en las cuencas con cobertura de pasturas y cobertura forestal respectivamente, utilizados en el análisis. Además se presenta el valor del almacenamiento máximo potencial (S) y el parámetro CN calculados a partir de la ecuación propuesta por el NRCS.

Tabla 3.27 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca con cobertura pasturas naturales- (La Nueva Esperanza)

Evento	Fecha	P total (mm)	Vesc (mm)	S (mm)	CN(NRCS)
1	Octubre 2008	14	0.09	60.25	81
2	Julio 2009	42	7.17	75.59	77
3	Agosto_2009	30	3.87	61.84	80
4	Septiembre_2009	22	2.85	46.25	85
5	Noviembre 2009	39	12.27	43.49	85
6	Noviembre 2009_2	72	36.06	46.83	84
7	Diciembre 2009	52	34.24	20.07	93
8	Diciembre 2009_2	48	38.85	8.80	97
9	Mayo 2010	42	1.07	144.94	64
10	Diciembre 2010	53	2.14	163.72	61
11	Febrero 2011	49	3.00	134.46	65

12	Abril 2011	41	1.79	125.52	67
13	Junio 2011	38	24.47	15.05	94
14	Agosto 2011	24	7.46	27.44	90
15	Octubre 2011	29	0.15	120.63	68
16	Noviembre 2011	40	1.16	133.55	66
17	Febrero 2012	57	18.63	62.08	80
18	Marzo 2012	55	3.84	146.48	63
19	Marzo 2012_2	25	4.53	42.98	86

Tabla 3.28 Eventos seleccionados para el ajuste del CN (NRCS) en la cuenca con cobertura monte forestal- (La Nueva Esperanza)

Evento	Fecha	P total (mm)	Vesc (mm)	S (mm)	CN(NRCS)
1	Octubre 2008	14	0.17	56.09	82
2	Julio 2009	42	8.79	66.47	79
3	Agosto 2009	30	3.04	69.09	79
4	Septiembre 2009	22	2.57	48.56	84
5	Noviembre 2009	39	11.58	45.91	85
6	Noviembre 2009_2	72	42.87	34.36	88
7	Diciembre 2009	52	34.82	19.24	93
8	Diciembre 2009_2	48	37.06	10.84	96
9	Mayo 2010	42	1.16	142.73	64
10	Diciembre 2010	53	1.28	183.04	58
11	Febrero 2011	49	1.56	159.65	61
12	Abril 2011	41	1.97	122.34	67
13	Junio 2011	38	19.45	23.64	91
14	Agosto 2011	24	5.35	35.98	88
15	Octubre 2011	29	0.39	108.89	70
16	Noviembre 2011	40	1.06	135.99	65
17	Febrero 2012	57	20.88	55.20	82
18	Marzo 2012	55	3.75	147.61	63
19	Marzo 2012_2	25	1.94	64.12	80

Corresponde destacar que hasta el evento de febrero de 2011, la cuenca con cobertura forestal contaba con cobertura de pasturas naturales (período pre-forestación), y a partir de dicha fecha se reconoce la cobertura de monte forestal.

A partir de estos resultados, se repitieron los mismos cálculos estadísticos realizados para las cuencas Don Tomás y La Cantera, que se presentan en la Tabla 3.29, considerando los dos intervalos temporales en la cuenca forestal (2008-2011 y 2011-2012).

Tabla 3.29 Parámetros estadísticos básicos de los resultados del CN para las cuencas de La Nueva Esperanza.

Cuenca	Media Aritmética	Media Geométrica	Mediana	Desviación Estandar
LNE Pasturas	78	77	80	11.70
LNE Forestal (2008-2011)	79	78	82	6.75
LNE Forestal (2011-2012)	76	75	75	10.80

A diferencia de lo presentado para las cuencas La Cantera y Don Tomás, no se aprecian diferencias significativas entre la cobertura de pasturas naturales y el monte forestal, en particular las diferencias encontradas son menores que la desviación estándar.

En la Figura 3.47 y Figura 3.48, se presentan la variación de CN con la precipitación para las cuencas con cobertura de pastura y forestal respectivamente. En el caso de la cuenca forestal, se distinguen los eventos correspondientes al período pre-forestación y al periodo forestado.

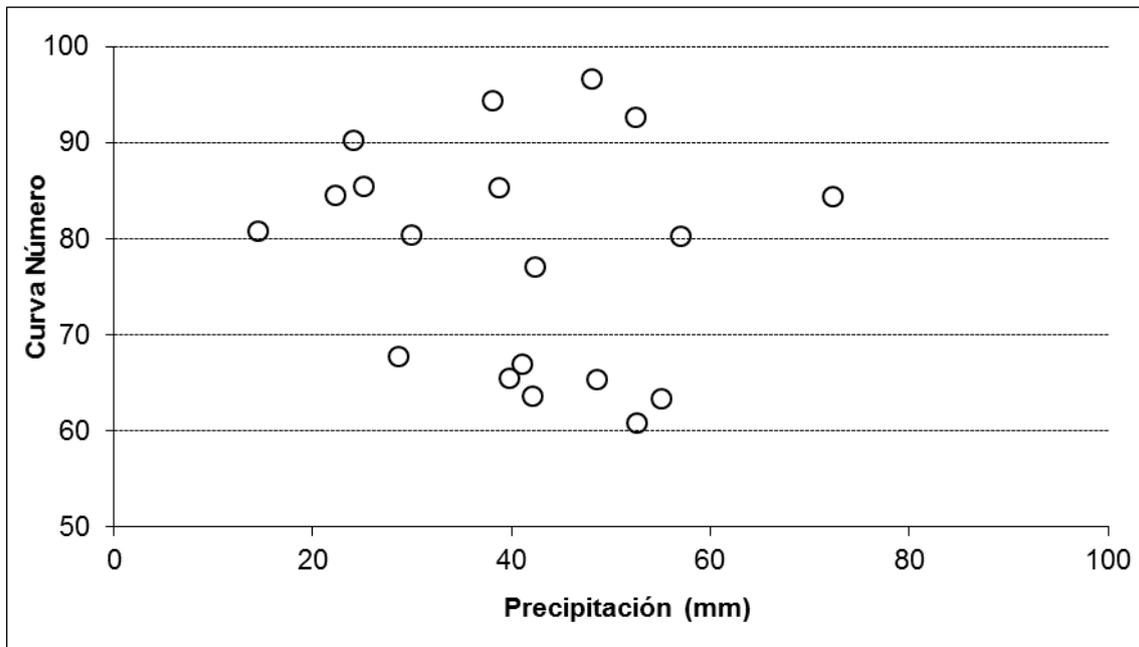


Figura 3.47 Relación $CN=f(P)$, cuenca pasturas naturales (LNE)

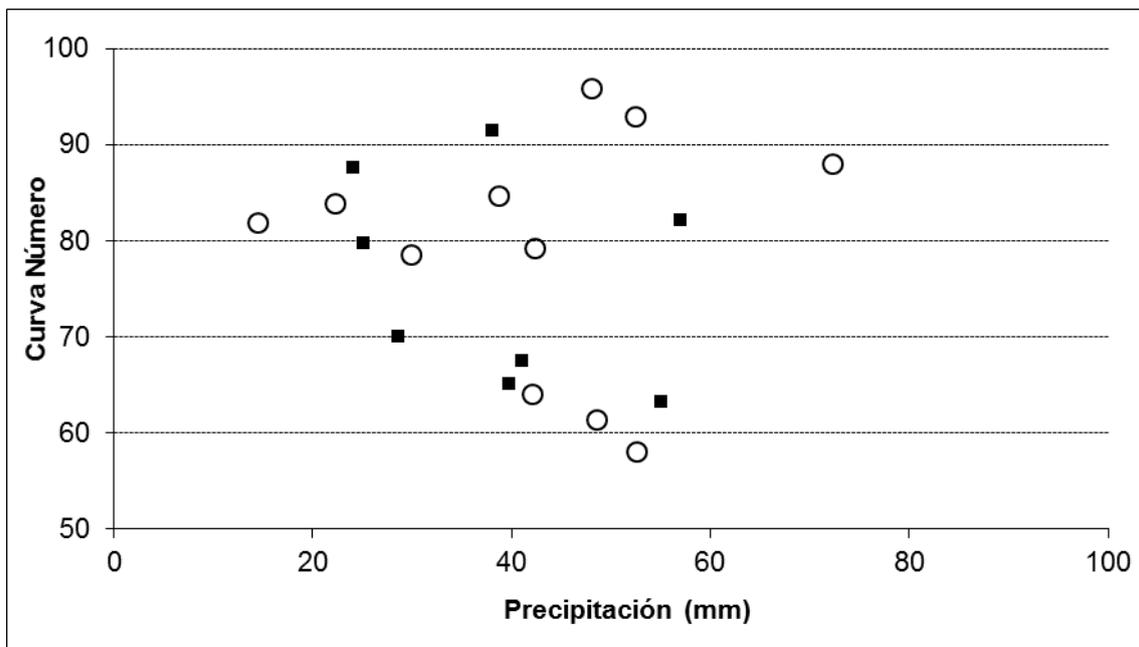


Figura 3.48 Relación $CN=f(P)$, cuenca monte forestal (LNE). Círculos blancos período pre-forestación, cuadrados negros período forestado.

A diferencia de lo encontrado en las cuencas La Cantera y Don Tomás, no se observa dependencia del CN con la precipitación en ninguna de las dos cuencas, motivo por el cual, no corresponde aplicar la metodología asintótica propuesta por Hawkins.

Los CN para ambas cuencas fueron obtenidos en base a la aplicación del método del NRCS para cada uno de los eventos registrados. Este método fue originalmente desarrollado a partir de un conjunto de eventos extremos registrados en cuencas hidrográficas cuyas superficies eran mayores a 2.5 Km^2 . En consecuencia su validez es restringida para cuencas cuyas áreas sea superior a dicho límite. En el caso de las cuencas La Cantera y Don Tomás, si bien ocupan áreas menores a 2.5 Km^2 , son próximas al límite y se mantienen en el mismo orden de magnitud. Por el contrario, las cuencas de la nueva esperanza son 2 órdenes de magnitud menor que el límite indicado, por tanto el método de NRCS carece de validez teórica, lo que explica la dispersión encontrada. En su lugar, modelos desarrollados para pequeñas cuencas, donde se represente la evolución temporal del agua en el suelo durante los eventos de lluvia son adecuados para su aplicación en cuencas del tamaño de las de LNE.

3.3.5 Modelo hidrológico SWAT

El modelo fue implementado en las cuatro microcuencas del Proyecto, considerando en cada una al menos tres subcuencas de trabajo. De acuerdo a Tripathi et al. (2006) y Muleta et al. (2007) la simulación de escorrentía del modelo no es sensible a la cantidad de subcuencas y HRU definidas en la implementación, en base a lo cual solo se realizó una prueba de esto en la microcuenca de Don Tomás encontrando que efectivamente no se mejoraba la simulación con mayor número de subcuencas. Sin embargo los mismos autores y también Bingner et al. (1997) reportan que si puede existir incidencia sobre la simulación de la producción de sedimentos de la cuenca por lo cual el análisis de sensibilidad debe ser retomado como línea futura de trabajo. De esta forma la combinación entre las subcuencas (ver Figura 3.49 a Figura 3.52), los tipos de suelo presentes y los dos niveles de pendiente que se definieron (umbral variable entre las cuencas) generaron las HRU de trabajo en cada microcuenca (ver Tabla 3.30).

Para la implementación del modelo se utilizó la interface ArcSWAT 2012, funcionando bajo ArcGIS 10.0 Los modelos digitales de terreno (MDT) utilizados para la delimitación de las subcuencas por el SWAT fueron construidos en base a la información topográfica disponible. En el caso de las cuencas del establecimiento La Nueva Esperanza construidos en base a la taquimetría con curvas de nivel cada 50 cm, mientras que en las cuencas de Don Tomás y La Cantera se utilizó el ASTER Global Digital Elevation Model (NASA-ASTER GDEM) con resolución de pixel de 30x30m. Las características de los suelos locales fueron obtenidas de los relevamientos disponibles realizados para proyectos anteriores (PDT, FPTA, Convenio Fagro-FOSA). Los mapas de uso del suelo (sitios de plantación forestal) fueron proporcionados por ambas empresas. Las variables de entrada al modelo utilizadas fueron las registradas localmente en cada cuenca transformadas a paso diario: precipitación, humedad relativa, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar y velocidad del viento, para la estimación de la evapotranspiración de referencia en el modelo se utilizó el método de Penmann-Monteith.

Tabla 3.30 Información de base y resultados para generación de los HRUs de las cuencas

Cuenca	Subcuencas	Clases de Suelo	Clases de uso de suelo	Clases de pendiente	HRUs
LNE_pastura	3	3	1	2	6
LNE_forestal	3	4	2	2	15
La Cantera	7	3	1	2	18
Don Tomás	4	4	2	2	20

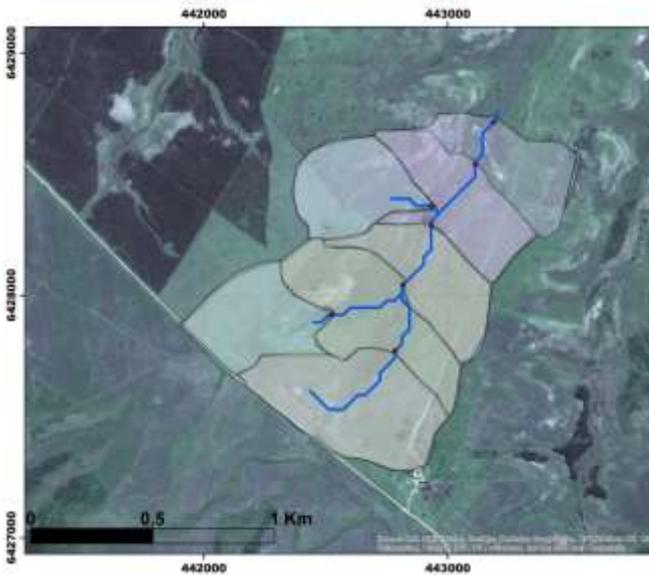


Figura 3.49 Subcuencas del modelo SWAT para La Cantera

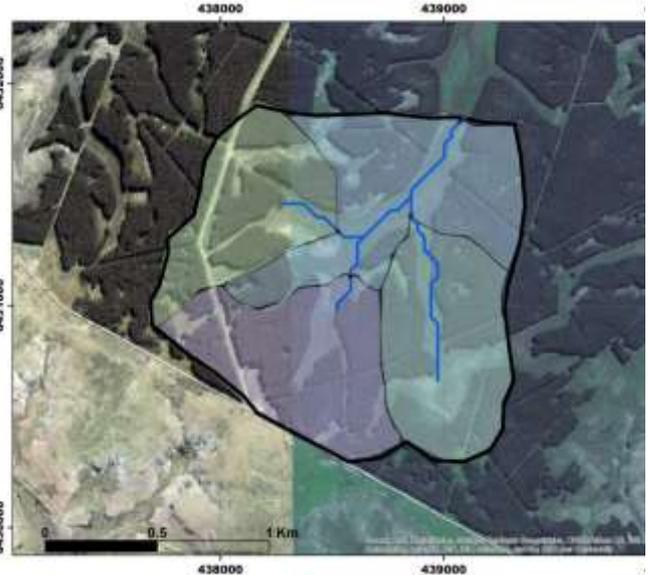


Figura 3.50 Subcuencas del modelo SWAT para Don Tomás

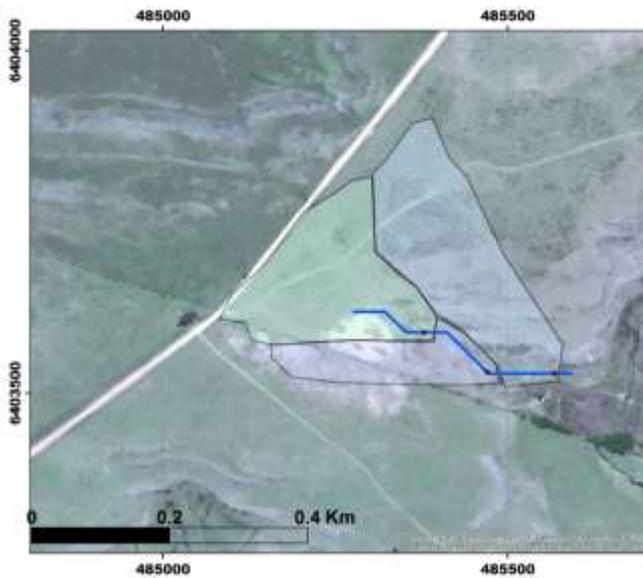


Figura 3.51 Subcuencas del modelo SWAT para LNE_pasturas

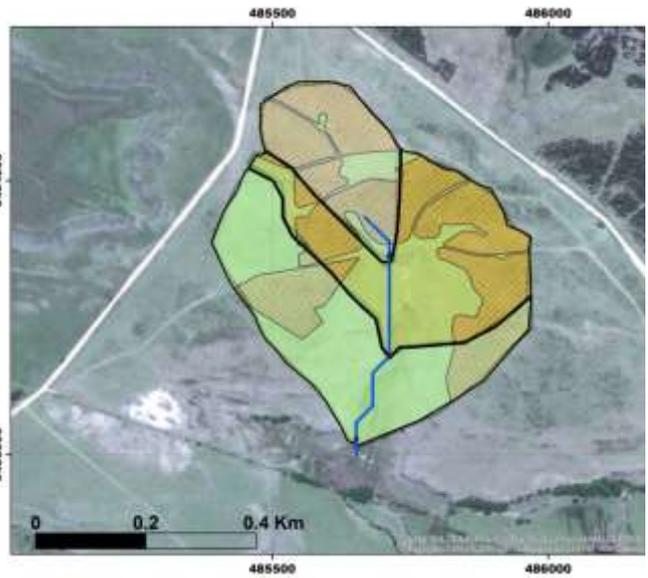


Figura 3.52 Subcuencas del modelo SWAT para LNE_forestal

Para la calibración y validación del modelo se utilizó el software SWAT-CUP (Abbaspour, 2011) y en particular el algoritmo SUFI-2 (Abbaspour et al., 2004 y Abbaspour et al., 2007). Este algoritmo mapea la incertidumbre de los distintos parámetros (expresadas como distribución uniforme o como un rango) e intenta capturar la mayor parte de las observaciones dentro del 95% de predicción de incertidumbre (95PPU) del modelo en un proceso iterativo (Abbaspour, 2015).

El modelo SWAT maneja una gran cantidad de parámetros que se usan en la descripción de los distintos procesos involucrados, algunos de ellos como el número de curva (CN) o umbrales de ocurrencia de flujos

entre los distintos almacenamientos (REVAPMN, GWQMN, etc) no pueden ser medidos experimentalmente, mientras que de otros ya se disponía de medidas como en el caso del agua disponible en el suelo (SOL_AWC) o calibrada previamente como la rugosidad de Manning en los canales (CH_N2). En base a lo anterior y a la recopilación de estudios publicados de implementación de este modelo (Van Griensven et al., 2006; Zhang et al., 2008; Arnold et al., 2012) se trabajó sobre un conjunto inicial de 9 parámetros, que se describen en la Tabla 3.31, junto con los rangos de variación inicial para cada uno, y el rango absoluto válido para el modelo.

Tabla 3.31 Descripción de los parámetros de ajuste del modelo SWAT junto con los rangos de variación inicial para cada uno, y el rango absoluto válido para el modelo.

Parámetro	Descripción	Rango válido	Rango usado
CN2	Número de curva II	35-98	50-80
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0-1	0-1
SOL_AWC	Agua disponible en el suelo	0-1	0.12-0.15
GW_REVAP	Coeficiente de re-evaporación del agua subterránea	0.02-0.2	0.02-0.2
REVAPMN	Umbral de ocurrencia de re-evaporación (mm)	0-500	0-500
GWQMN	Umbral de ocurrencia de flujo de retorno (mm)	0-5000	0-5000
GW_DELAY	Retraso del flujo subterráneo (días)	0-50	0-50
ALPHA_BF	Constante de recesión del flujo base	0-1	0-1
CH_N2	Rugosidad de Manning en el canal principal	0.01-0.3	0.3 – 0.4

El primer año de cada simulación fue usado como periodo de calentamiento del modelo con el objetivo de mitigar el efecto de las condiciones iniciales y por lo tanto no participó en el análisis del ajuste de la simulación, al igual que los periodos de datos observados faltantes. En el proceso de calibración de las microcuencas se siguió la misma secuencia que para el modelo de Temez, es decir primero fueron calibrados los parámetros en las cuencas cubiertas por pasturas y luego incorporando los resultados en las cuencas forestadas se calibraron los parámetros correspondientes a la cobertura forestal. El modelo SWAT fue implementado para todas las cuencas y en base a la información disponible con paso temporal diario, que es actualmente el mínimo paso para el cual el modelo se encuentra disponible y la variable de comparación para la calibración del modelo fue el caudal medio diario a la salida de cada microcuenca

Para evaluar la bondad del ajuste de la simulación a los datos observados se utilizaron al igual que en el caso del modelo de Temez los indicadores R², Nash Sutcliffe y diferencia de volumen. Dichos parámetros se evaluaron tanto para las series diarias resultantes del modelo como para los acumulados mensuales de estas series.

En la Tabla 3.32 se presentan los resultados de los indicadores de ajuste del modelo, tanto en calibración como en validación para las series diarias en las cuencas de Don Tomás y La Cantera. Luego en la Figura 3.53 y Figura 3.54 se observa gráficamente para un período el ajuste de la mejor simulación en la calibración.

Tabla 3.32 Ajuste de simulación diaria del modelo SWAT

Microcuenca	Calibración				Validación			
	Período	R ²	Nash	ΔV (%)	Período	R ²	Nash	ΔV (%)
La Cantera	Ene/07-Dic/13	0.86	0.70	14.6	Ene/14-Set/15	0.93	0.73	2.3
Don Tomás	Ene/07-Dic/12	0.78	0.45	2.6	Ene/13-Nov/14	0.42	0.35	-13.8
LNE_pastura	Ene/08-Dic/12	0.02	-0.46	-37.6	---	---	---	---
LNE_forestal	Abr/11-Set/15	-0.02	-0.66	-32.4	---	---	---	---

Como se observa en la Tabla 3.32, únicamente los indicadores para la cuenca La Cantera muestran un ajuste satisfactorio con paso diario de modelación, para la cuenca de Don Tomás los indicadores son apenas aceptables. Por otra parte para las cuencas de La Nueva Esperanza no fue posible obtener ajustes aceptables del modelo evaluado a nivel diario.

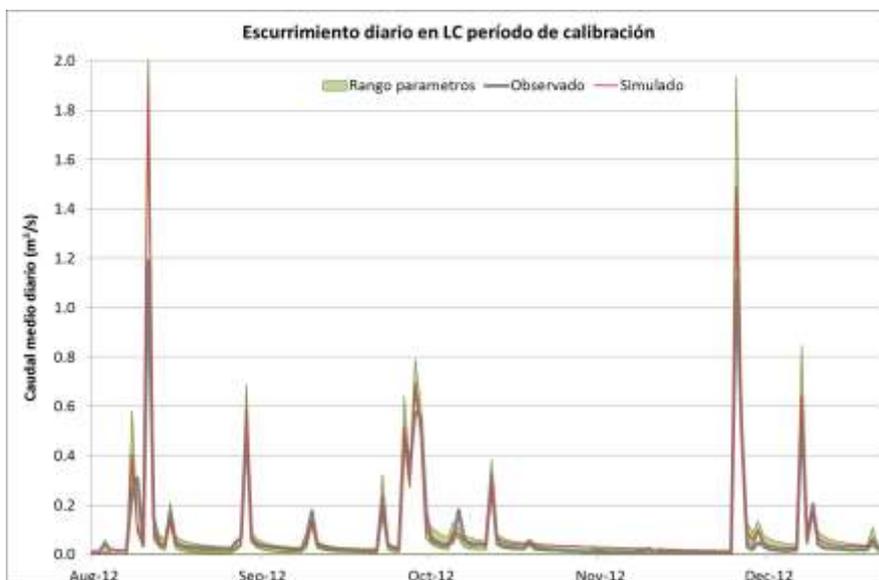


Figura 3.53 Ajuste del modelo SWAT en la microcuenca La Cantera

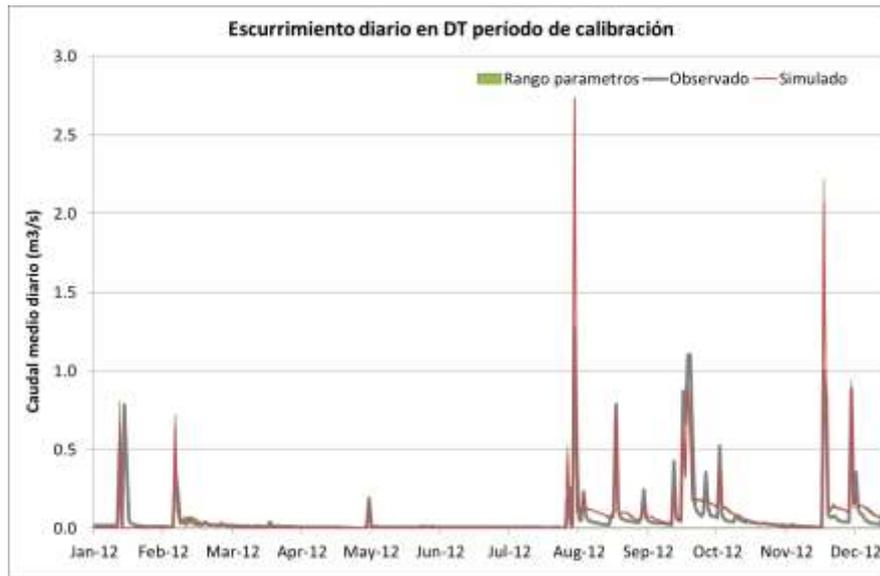


Figura 3.54 Ajuste del modelo SWAT en la microcuenca Don Tomás

Tabla 3.33 Ajuste de simulación mensual del modelo SWAT

Microcuenca	Calibración + Validación			
	Período	R ²	Nash	ΔV (%)
La Cantera	Ene/07-Set/15	0.94	0.84	-12.3
Don Tomás	Ene/07-Nov/14	0.89	0.72	2.5
LNE_pastura	Ene/08-Dic/12	0.01	-0.54	-37.6
LNE_forestal	Abr/11-Set/15	-0.13	-1.7	-32.4

El parámetro a cuya variación el modelo SWAT resulta más sensible es el CN2 (número de curva en condiciones II). Los resultados obtenidos para las microcuencas de Don Tomas y La Cantera permiten evaluar la variación entre los usos del suelo estudiados para ese parámetro. El rango de NC calibrado para la cuenca de La Cantera con cobertura de pradera natural, fue de entre 70 y 76, siendo el valor del parámetro para la mejor simulación de 73. Para la cobertura de Eucalyptus globulus presente en la cuenca de Don Tomas, el rango aceptable fue de entre 52 y 62, siendo el valor del parámetro para la mejor simulación de 59, considerando los porcentajes de cobertura de cada uso en esta microcuenca, puede asumirse que el CN medio para la microcuenca forestada es de 65.

En relación a los otros parámetros calibrados, la sensibilidad del modelo a sus variaciones resultó significativamente menor. En particular se comprobó que para los parámetros SOL_AWC (Agua disponible en el suelo) y CH_N2 (Rugosidad de Manning en el canal principal) resultaron óptimos para valores muy cercanos a los valores obtenidos por los medios mencionados al inicio de este punto. En relación al resto de los parámetros calibrados, no se cuenta aún con experiencia en el uso de este modelo ni con información de referencia local para evaluar la validez de los valores determinados, en particular la única referencia de implementación de este modelo realizada en microcuencas experimentales forestadas con Pino en el departamento de Tacuarembó (von Stackelberg et al., 2007) reporta muy buena eficiencia en el ajuste del modelo SWAT pero no explicita los valores de los parámetros calibrados.

La situación planteada en las cuencas de LNE, muestra una total discordancia entre la simulación del modelo SWAT y las observaciones de escurrimiento superficial en ambas microcuencas, no habiéndose logrado un ajuste a pesar de ampliar el rango de variación de los parámetros manejados. Este resultado concuerda con lo que se observa de analizar los datos presentados en la revisión de Gassman (2007) donde en una extensiva recopilación de 115 estudios de calibración/validación de SWAT que reportan valores de indicadores de ajuste (R2 y Nash) se puede ver que para cuencas con área de drenaje menor a 40 ha, o bien no se reportan ajustes diarios o bien estos presentan indicadores de NS negativos. De los resultados obtenidos se infiere que la escala de estas microcuencas no hace factible la representación de los procesos hidrológicos predominantes en ellas por parte de este modelo, queda abierta la posibilidad de evaluar la aplicabilidad de modelos que trabajan a menor escala espacial como por ejemplo el APEX.

Por otra parte el análisis que se presenta en la Tabla 3.33, muestra que se pueden representar en forma muy satisfactoria con el modelo SWAT los volúmenes escurridos a nivel mensual en las cuencas de Don Tomás y La Cantera.

3.4 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

- Abbaspour, K.C., 2011. Swat-Cup2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Manual Version 2, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland. 106 p.
- Abbaspour, K.C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang B. Kløve. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. Vol. 524:733-752.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A.; van Genuchten, M.Th. 2004 Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure *J. Vadose Zone*, 3 (4), pp. 1340–1352
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I. Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT *Journal of Hydrology*, 333, pp. 413–430
- Bingner, R. L., J. Garbrecht, J. G. Arnold, and R. Srinivasan. 1997. Effect of watershed subdivision on simulated runoff and fine sediment yield. *Trans. ASAE* 40(5): 1329-1335.
- Holmes J.W., Sinclair J.A. (1986) Water yield from some afforested catchments in Victoria. *Hydrology and Water Resources Symposium*, Griffith University. Brisbane, 25-27 November 1986. National Conference Publication 86/13, Institution of Engineers, Australia, Canberra.
- Muleta, M. K., J. W. Nicklow, and E. G. Bekele. 2007. Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale. *J. Hydrol. Eng.* 12(2): 163-172
- Tripathi, M. P., N. S. Raghuwanshi, and G. P. Rao. 2006. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrol. Process.* 20(5): 1137-1156.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1), 10-23.
- Von Stackelberg, N. O., Chescheir, G. M., Skaggs, R. W., & Amatya, D. M. 2007. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 455-468.
- Zhang L, Dawes WR and Walker GR. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Technical Report 99/12. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. 42 pp. CSIRO Land and Water, Canberra, Australia.
- Zhang L, Dawes WR and Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3): 701-708.

4. CALIDAD DE AGUA

4.1 RESUMEN DE ACTIVIDADES

El subcriterio 4.3.b del Proceso de Montreal (ver Cap. 2.2) establece como indicador en cuanto a la calidad del agua, *“Superficie y porcentaje de cuerpos de agua o longitud de cursos de agua en áreas forestales con cambio significativo en las propiedades físicas, químicas o biológicas, con respecto a las condiciones de referencia”*.

Uruguay aún no tiene identificado este indicador. No obstante, en las microcuencas experimentales donde se evalúa el efecto de la forestación, se analizaron y compararon las siguientes características del agua:

- Concentración de iones mayoritarios en agua (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}), así como sus parámetros asociados: pH, alcalinidad, y conductividad .
- Nutrientes de importancia biológica y ecológica (diferentes formas de fósforo y nitrógeno totales y disueltos).
- Análisis de sólidos (sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, concentración de materia orgánica).

Los sedimentos también fueron analizados en cuanto a una serie de características físico-químicas.

Con el objetivo de generar y evaluar herramientas de biomonitoreo que también permitan evaluar el impacto de la forestación en los cursos de agua, se implementaron nuevas metodologías de muestreo para el país centrándonos en la biota acuática y algunos procesos a nivel ecosistémico. El diseño se realizó de acuerdo a las características particulares de los cuatro ecosistemas estudiados (bajo caudal con frecuente ausencia de agua):

- Comunidades de macroinvertebrados potenciales que se encuentran presentes en la zona litoral de los cursos con diferentes adaptaciones para soportar la ausencia de agua.
- Tasa de descomposición de materia orgánica, utilizando hojas de *Eucalyptus globulus* (especie exótica) y *Schoenoplectus californicus* (planta emergente nativa, típica de zonas litorales), así como la fauna de macroinvertebrados asociada a dicho proceso.

Por otra parte, en el contexto de esta sección del proyecto se realizó una tesis de Maestría en Geociencias (Lic. Claudia Simón), y dos tesinas de grado (Lic. en Cs. Biológicas, Bach. Lucía Cabrera, y Lic. en Gestión Ambiental, Bach. Yamila Olivera).

4.2 METODOLOGÍA (ABREVIADA)

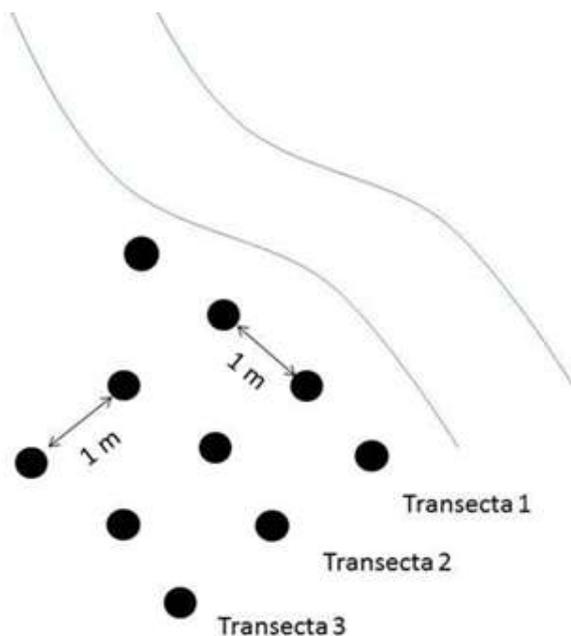
4.2.1 CALIDAD DEL AGUA Y CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO

Las muestras de agua de cada arroyo se tomaron en tres puntos equidistantes sobre un tramo de 100 metros de longitud y con una frecuencia mensual o estacional según condiciones climáticas y logísticas.

Las mismas se mantuvieron refrigeradas hasta su análisis en laboratorio. En forma inmediata se filtraron mediante filtros de papel GF/C para separar las fracciones totales de las disueltas. En laboratorio del CURE, sede Maldonado, se analizaron parámetros físico-químicos (pH, alcalinidad, conductividad, concentración de sólidos totales y de materia orgánica, según APHA, 1985), y se estimó la concentración en agua de nutrientes de importancia biológica (nitrógeno y fósforo totales, según método de Valderrama, 1980 y nutrientes en forma disuelta: PO₄, según Murphy y Riley, 1962); NO₂, según Muller & Weidemann, 1955; NO₃, según Strickland & Parsons, 1972; y NH₄, según Koroleff, 1979).

Las concentraciones de cloruros, sulfatos y de cationes (Ca, Mg, Na, K, Mn, Cu, y Zn) fueron determinadas en el Laboratorio del INIA. Se analizó un menor número de muestras de agua para la determinación de cationes, dado su menor variabilidad natural en los ecosistemas.

En julio de 2013 se tomaron muestras de sedimento de la planicie de inundación de los arroyos de las cuatro cuencas estudiadas para caracterizarlos en cuanto a una serie de parámetros básicos. En el campo se tomaron muestras de suelo de 10 cm de diámetro y 7 cm de profundidad (n= diez por arroyo; n total= 40), sobre tres transectas paralelas al curso del arroyo con 1 m de distancia entre sí (Figura 4.1). En cada punto muestreado se midió la distancia al medio del cauce del arroyo, la profundidad del arroyo en ese punto y la inclinación del terreno.



Se tomaron medidas de pH y humedad del suelo de la zona inundable de cada arroyo con sensores de campo in situ, y en el laboratorio se tomaron submuestras de 1 g para determinar el contenido de materia orgánica (APHA, 1985).

Figura 4.1 Diseño de la colecta de muestras de sedimentos en zona aledaña (zona inundable) a los arroyos para análisis de características de los sedimentos y realización de los experimentos de eclosión de estructuras de resistencia de macroinvertebrados bentónicos.

4.2.2 MACROINVERTEBRADOS “POTENCIALES”

El objetivo inicial era analizar la comunidad de organismos macroinvertebrados (típicamente larvas de insectos, microcrustáceos, arácnidos, moluscos y otros grupos de organismos) que viven asociados a los sedimentos de los cursos de agua, y evaluar la composición de la comunidad de peces. Sin embargo, el bajísimo caudal observado en varias oportunidades y asociado a los bajos órdenes de los arroyos estudiados, generó la necesidad de cambiar la aproximación definida para evaluar los cambios en la biota acuática. Esa misma razón provocó que se cancelaran los muestreos de peces planeados originalmente.

Con el objetivo de evaluar la capacidad de recuperación de la comunidad de organismos macroinvertebrados frente a disminuciones en el caudal, analizamos los sedimentos y la viabilidad de las estructuras de resistencia (huevos) en la zona inundable de cada arroyo. Para ello realizamos un experimento de eclosión en laboratorio usando las muestras de sedimento descritas anteriormente. Cabe destacar que estos experimentos son innovadores en su metodología y nunca se habían realizado para arroyos en nuestro país.

En el laboratorio, las muestras de sedimento se colocaron en contenedores individuales (oxigenados y sometidos a un fotoperíodo de 12 horas de luz: 12 horas de oscuridad) y se inundaron con aproximadamente un litro de agua (Figura 4.2). A los 4, 7, 12, 18 y 24 días se filtró el agua por una malla de 50 μm de tamaño de poro y se repuso el agua. Los organismos retenidos en el filtro fueron fijados en alcohol para su posterior identificación (n= 180 muestras).



Figura 4.2 Experimentos de laboratorio, eclosión de estructuras de resistencia de organismos macroinvertebrados a partir de sedimentos de las zonas inundables aledañas a los cauces de los arroyos estudiados.

4.2.3 DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA (HOJARASCA)

La descomposición de las hojas es un proceso integrativo a nivel de todo el ecosistema, ya que puede vincular vegetación de la zona litoral (nativa o forestada) y las actividades microbianas y de invertebrados acuáticos. Las ventajas de estudiar las tasas de descomposición de hojas como un proceso indicador de la salud del ecosistema son: la medición es relativamente simple y no requiere equipamientos costosos, varios estudios internacionales han examinado los factores que controlan a la descomposición de hojas, por lo tanto las respuestas a la variación natural y a los estresores externos pueden ser predichos con relativa confianza, y que existen criterios para vincular las tasas de descomposición y la salud ecosistémica (Gessner & Chauvet, 2002). Para ello, se colocaron en cada arroyo 30 bolsas de malla plástica fina con segmentos iguales y previamente pesados de junco (*Schoenoplectus californicus*) y 30 con hojas de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (n total=60 bolsas por arroyo) (Figura 4.3).

Cada un mes se extrajeron 3 bolsas de cada tipo y se analizó el grado de descomposición de la vegetación (midiendo cambios en peso seco del material vegetal) y se clasificó y contó a los organismos macroinvertebrados presentes.



Figura 4.3 Fotografía de los experimentos de descomposición de materia orgánica.

4.3 PRINCIPALES RESULTADOS

4.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA Y DEL SEDIMENTO

El agua de los arroyos presentó valores de pH que oscilaron alrededor de valores neutros, conductividad baja (ca. 150 $\mu\text{S cm}^{-1}$), y alcalinidad relativamente baja (ca. 115 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) en todos los casos, y sin grandes variaciones a lo largo del período de estudio. Considerando los usos del suelo en la cuenca, se registró un pH levemente mayor y una menor proporción de materia orgánica en los sólidos en suspensión en ambos arroyos de cuencas forestadas que en sus pares respectivos.

A lo largo del período de estudio las concentraciones de los principales nutrientes presentaron grandes variaciones, en algunos casos sincrónicas entre los arroyos de cuencas pareadas. Las concentraciones de fósforo total (PT) promedio a lo largo de los dos años de estudio oscilaron alrededor de los 50 $\mu\text{g L}^{-1}$, lo que resulta elevado considerando que estos arroyos son de bajo orden y se encuentran en las cabeceras de las cuencas.

Por otra parte, las concentraciones de nitrógeno total (NT) promedio a lo largo de los dos años monitoreados oscilaron alrededor de los 450 $\mu\text{g L}^{-1}$, excepto en el arroyo Nueva Esperanza no forestado, que tuvo concentraciones promedio sustancialmente mayores. La mayor parte tanto del NT como del PT estuvo en forma disuelta, como se evidenció por la alta proporción de la fracción total disuelta en ambos casos (cerca del 79% y entre 52-74%, respectivamente).

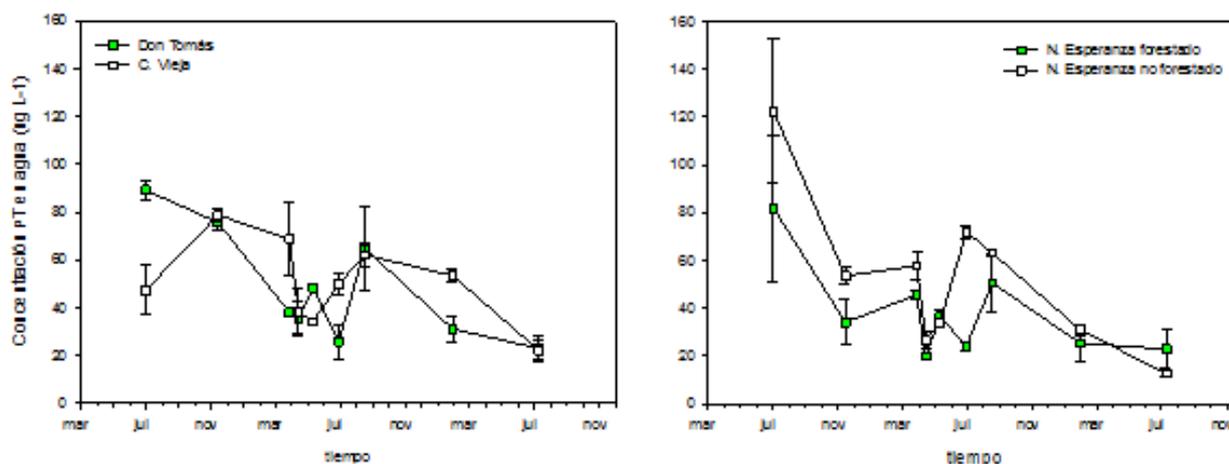


Figura 4.4 Concentración de Fósforo Total en agua en ambos pares de microcuencas, a lo largo del período de estudio (julio 2013-julio 2015). Los datos representan el promedio de las tres estaciones de muestreo por fecha y su correspondiente desvío estándar.

Las concentraciones de distintas especies de nutrientes en estado disuelto (i.e. fósforo reactivo soluble, nitrato, amonio y nitrito; excepto el nitrito, todas formas de rápida disponibilidad para los organismos acuáticos,) fueron bajas o muy bajas (Tabla 4.1). El nitrato (N-NO_3) representó aproximadamente un tercio del nitrógeno total en todos los arroyos.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de nutrientes en agua en relación al grado de forestación en la cuenca, excepto en el caso del NH_4 , que presentó concentraciones generalmente mayores en los dos arroyos con cuencas forestadas que en los de cuencas con pastizales.

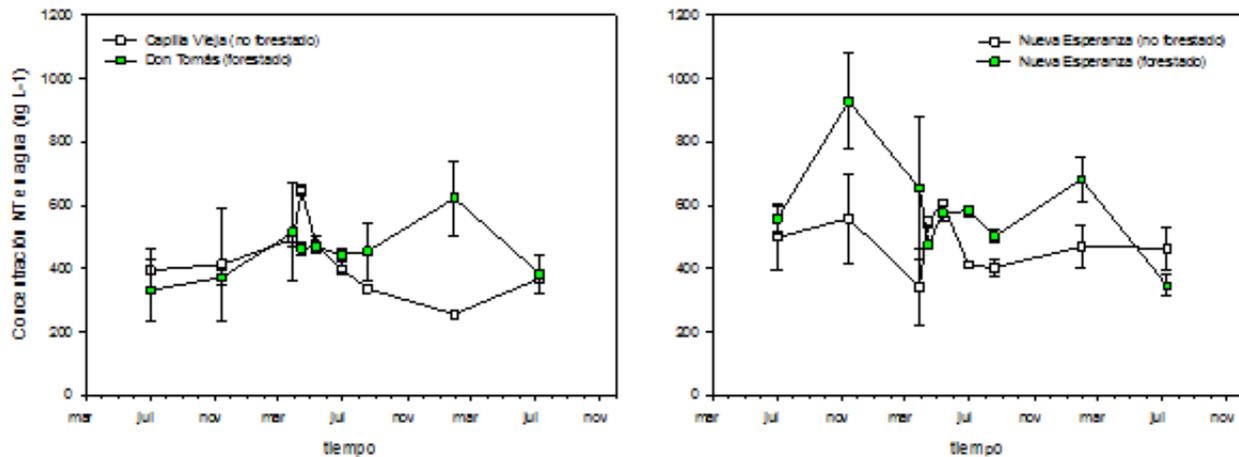


Figura 4.5 Concentración de Nitrógeno Total en el agua en ambos pares de microcuencas, a lo largo del período de estudio (julio 2013-julio 2015). Los datos representan el promedio de las tres estaciones de muestreo por fecha y su correspondiente desvío estándar.

En cuanto a la concentración de cloruros, sulfatos y cationes, en la mayoría de los casos no hubo un patrón asociable al uso del suelo, salvo que los arroyos de cuencas forestadas tuvieron mayores concentraciones de Na, Mg, Ca y sulfatos, y menores concentraciones de cloruros.

Tabla 4.1 Valores promedio de concentración de nutrientes totales y disueltos, características físico-químicas, y concentraciones de cationes, sulfatos y cloruros en los cuatro arroyos estudiados (medias de cada muestreo por arroyo, promediadas posteriormente a lo largo del período julio 2013-octubre 2015).

variable	Don Tomás	Capilla Vieja	N.E. Fores.	N.E. no Fores.
NH4 µg L-1	18,4	10,6	27,7	20,1
NO3 µg L-1	110,2	113,8	126,7	133,0
NO2 µg L-1	9,2	2,6	3,1	2,4
NTD µg L-1	345,6	334,2	378,3	479,2
NT µg L-1	450,3	420,1	478,0	588,9
PO4 µg L-1	2,6	4,4	4,8	2,6
PTD µg L-1	28,1	35,2	24,8	27,3
PT µg L-1	50,5	47,9	37,9	52,6
Alcalinidad (mg CaCO3 L-1)	153,4	130,1	85,4	97,1
Cond. (µS cm-1)	203,8	172,7	116,3	133,0
pH	7,0	6,9	7,3	7,2
STS mg L-1	75,1	42,4	35,5	48,6
MOS mg L-1	8,8	5,6	8,1	15,4
% MOS	22,2	25,2	27,6	32,7
Ca mg L-1	47,5	45,35	32,42	23,47
Mg mg L-1	4,92	3,78	4,84	3,74
K mg L-1	8,78	8,94	8,69	8,58
Na mg L-1	2,32	1,74	2,52	1,69
Cu mg L-1	0,04	0,04	0,04	0,04
Fe mg L-1	0,02	0,01	0,02	0,02
Mn mg L-1	0,01	0,01	0,02	0,02

Zn mg L-1	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfatos mg L-1	1,38	1,14	1,31	1,14
Cloruros mg L-1	1,73	2,66	1,75	2,43

El sedimento de los arroyos tuvo características relativamente similares entre sí. El % promedio de materia orgánica osciló alrededor del 10-12%, sin diferencias significativas entre los arroyos forestados y no forestados. Por otra parte, el sedimento aledaño a los arroyos no forestados tuvo un porcentaje de humedad levemente (aunque significativamente en términos estadísticos) mayor que en los arroyos forestados (9 versus 8%, respectivamente, prueba ANOVA $p=0,02$) (Figura 4.6).

En todos los arroyos, el sedimento presentó niveles de acidez (pH) cercanos a la neutralidad o levemente ácidos, sin diferencias significativas entre las cuencas forestadas y no forestadas. El arroyo forestado con menor superficie de cuenca (Nueva Esperanza) presentó sedimentos levemente alcalinos (pH medio= 7,6; pH mediana= 8).

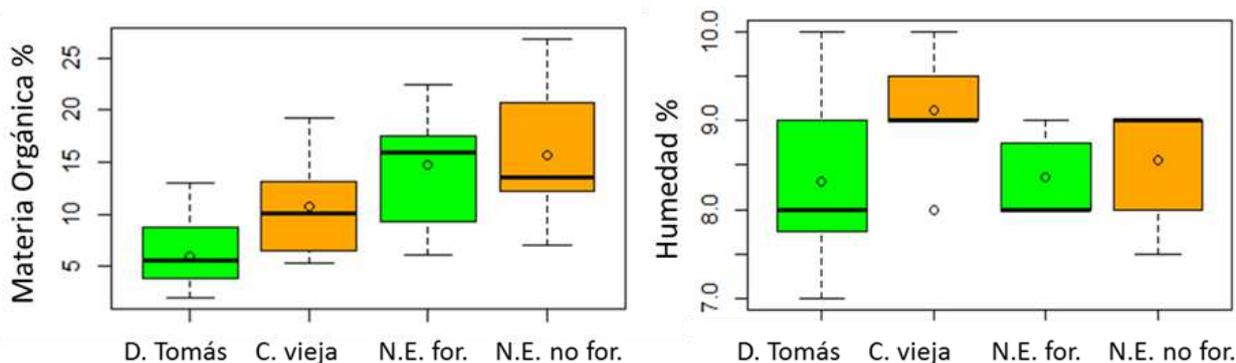


Figura 4.6 Características de los sedimentos en la planicie de inundación de los cuatro arroyos estudiados (indicando en verde los forestados). Los datos muestran la media (punto), mediana (línea horizontal) y rango de 10 réplicas para cada arroyo.

4.3.2 COMUNIDAD POTENCIAL DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS

Mediante la realización de este experimento se comprobó que la metodología diseñada fue exitosa. Asimismo, verificamos que numerosos huevos de resistencia viables y otros estadios dormantes de varias especies de invertebrados, principalmente microcrustáceos, ocurren en los sedimentos de la planicie de inundación de arroyos subtropicales de bajo orden, como los analizados en este proyecto.

A partir de las muestras analizadas (120) se identificaron 14 grandes grupos de macroinvertebrados. Los organismos oligoquetos y nemátodos fueron los más abundantes. Por otra parte, los microcrustáceos (principalmente copépodos y pocos cladóceros y ostrácodos) fueron el 18,6% de los individuos totales.

El patrón de eclosión difirió entre grupos de organismos. En el caso de los rotíferos llegaron a su mayor abundancia a los 12 días, mientras que los grupos más abundantes en general mantuvieron un patrón relativamente constante de eclosión a lo largo del experimento (Figura 4.7).

El sistema con mayor número de organismos recuperados fue el arroyo Don Tomás, mientras que los restantes presentaron un número relativamente similar de individuos eclosionados. El número de taxa totales que emergieron no tuvo diferencias significativas entre los sistemas forestados y no forestados. No se encontraron grupos taxonómicos que fueran exclusivos de los arroyos forestados o de pradera (Tabla 4.2).

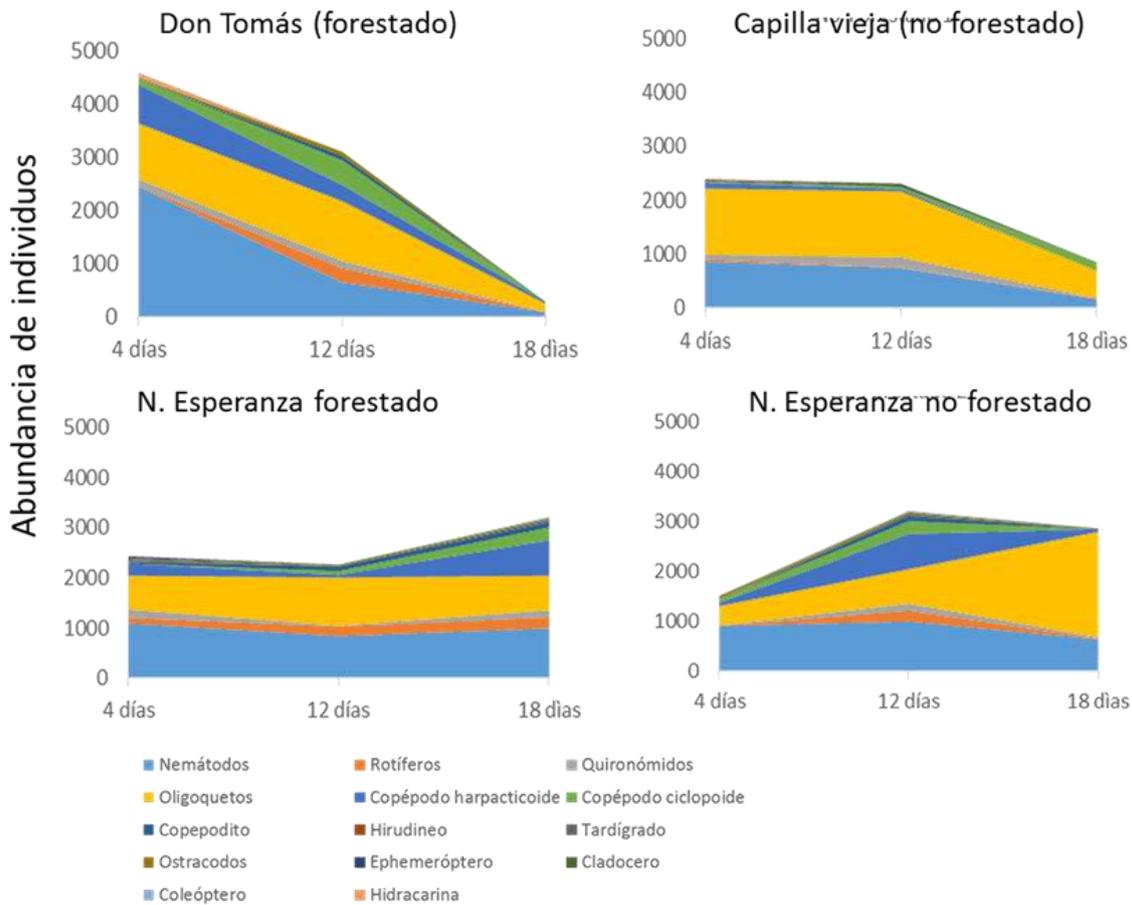


Figura 4.7 Abundancia de organismos de los distintos grupos taxonómicos eclosionados durante las distintas etapas del experimento de laboratorio, en los cuatro arroyos.

Se calcularon los índices de diversidad de Simpson y Shannon, utilizando el número de individuos de cada taxón en cada arroyo y en cada uno de los tiempos estudiados. Asimismo se calculó la dominancia y la equitatividad. Estos cuatro parámetros, además del número total de taxa y de individuos, se compararon mediante pruebas estadísticas ANOVA.

Entre los arroyos con cuencas de mayor tamaño (Don Tomás y Capilla Vieja) no hubo diferencias significativas para ninguno de los parámetros en ninguno de los tres tiempos. Sin embargo, en las cuencas de menor tamaño sí se encontraron diferencias significativas. El número de taxa encontrado fue significativamente mayor en el arroyo Nueva Esperanza forestado (ANOVA $p= 0,04$), así como también lo fueron los índices de diversidad para la eclosión en etapas iniciales del experimento (Shannon, $p=0,03$; Simpson, $p=0,03$).

Tabla 4.2 Ocurrencia de distintos grupos taxonómicos de invertebrados eclosionados de los sedimentos a lo largo del experimento (días 4, 12 y 18 posteriores a la re inmersión en agua).

Grupos taxonómicos	Don Tomás			Capilla Vieja			N. Esperanza forestado			N. Esperanza no forestado		
	4 días	12 días	18 días	4 días	12 días	18 días	4 días	12 días	18 días	4 días	12 días	18 días
Nemátodos	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rotíferos	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+
Quironómidos	+	+		+	+		+	+	+		+	+
Oligoquetos	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Copépodos harpacticoides	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
Copépodos ciclopoideos	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Copepoditos	+	+			+		+	+	+		+	
Hirudíneos		+					+					+
Tardígrados				+			+	+			+	
Ostracodos						+	+	+	+	+	+	
Efemerópteros	+	+					+					
Cladóceros		+			+					+		
Coleópteros	+								+		+	
Hidracarinas	+			+					+	+		

4.3.3 DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

El proceso de descomposición de los segmentos de vegetación nativa (*S. californicus*) mostró una gran variabilidad entre las réplicas analizadas. Considerando los valores medios, al final del experimento las cuencas forestadas presentaron menores valores de descomposición. El tamaño de la cuenca parece interactuar con el uso del suelo haber, afectado indirectamente este proceso.

La cuenca no forestada de mayor tamaño presentó una mayor capacidad de descomposición de la materia orgánica, llegando a menos del 10% de la biomasa inicial luego de un año. En el extremo opuesto, la cuenca de menor tamaño forestada fue la que presentó una menor pérdida de biomasa inicial, llegando sólo al 52% de pérdida de la biomasa inicial (Figura 4.8).

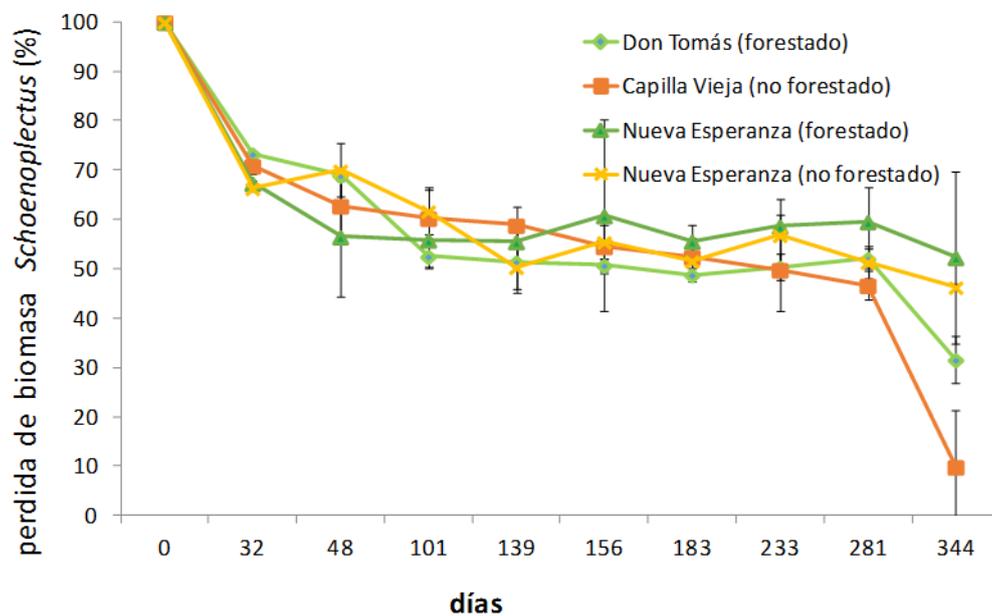


Figura 4.8 Pérdida de biomasa (descomposición de segmentos) de *Schoenoplectus californicus* a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.

Por otra parte, el proceso de descomposición de hojas de *E. globulus* mostró una variabilidad menor entre réplicas. En este caso, las cuencas forestadas presentaron valores mayores de descomposición, considerando los valores medios al final del experimento. Asimismo, la cuenca forestada de mayor tamaño tuvo una mayor capacidad de descomposición de la materia orgánica, llegando a menos del 27% de la biomasa inicial luego de un año. Por el contrario, la cuenca de menor tamaño no forestada presentó la menor pérdida de biomasa inicial, llegando sólo al 47% de la pérdida de la biomasa inicial (Figura 4.9).

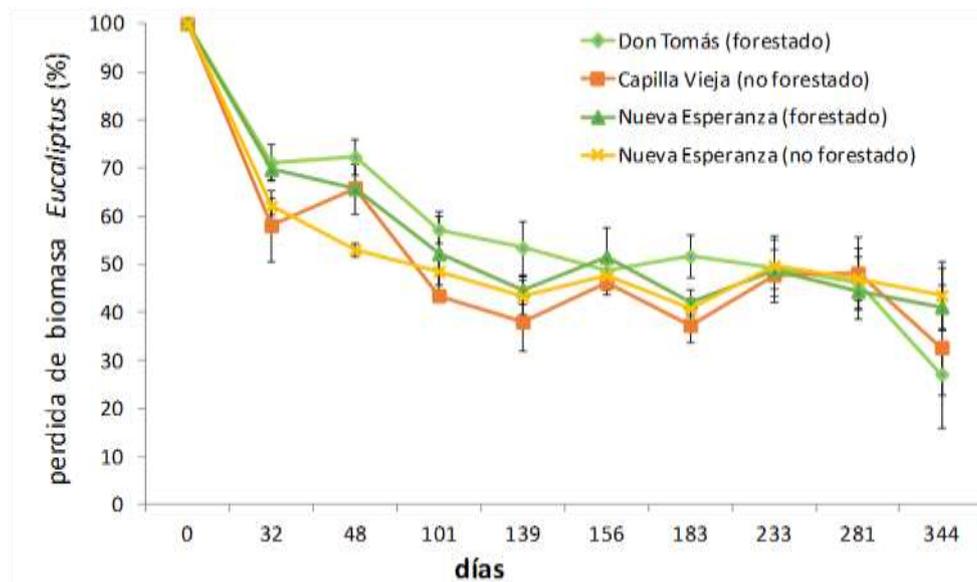


Figura 4.9 Pérdida de biomasa (descomposición de hojas) de *Eucalyptus globulus* a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.

En términos generales, las cuencas de mayor tamaño presentaron una mayor capacidad de descomposición de biomasa vegetal que las cuencas de menor tamaño, lo que podría deberse al efecto de una mayor capacidad de fragmentación la materia orgánica cuando ocurren los pulsos de alta descarga de agua. Los sistemas forestados presentaron una mayor descomposición de hojas de *E. globulus*, y por el contrario, los sistemas no forestados presentaron una mayor capacidad de descomposición de los restos de la especie nativa *S. californicus*. Esto podría indicar que la biota acuática ya ha sido modificada en su estructura o función de acuerdo a los restos vegetales que recibe cada sistema.

El uso combinado de ambas especies para el estudio de descomposición mostró un potencial claro para el estudio de efectos del uso del suelo sobre procesos ecológicos a nivel de todo el ecosistema, así como para evaluar efectos del caudal de los sistemas estudiados. Sin embargo, la gran variabilidad observada entre réplicas, muestra la necesidad de realizar estos estudios en un número significativamente mayor de cursos de agua de forma de extraer patrones más claros.

Otro factor relevante en el proceso de descomposición es la comunidad de organismos microscópicos y macroinvertebrados presente en los arroyos y que se asocia a la materia orgánica introducida experimentalmente (Tabla 4.3). Estos organismos son afectados por el uso del suelo en las cuencas, así como por otras características de los sistemas como el caudal de agua y la granulometría del sedimento.

Los resultados preliminares mostraron una gran variabilidad de la comunidad de macroinvertebrados y de los taxa asociados a las diferentes especies vegetales utilizadas. Los restos de *S. californicus* en los sistemas forestados contuvieron una mayor abundancia de organismos *Oligochaetos*, mientras que hubo una mayor abundancia de organismos *Ephemeropteros* en los arroyos no forestados (Figura 4.10). Estos dos grupos son representativos de condiciones contrastantes de calidad de agua: los Ephemeropteros son característicos de aguas de buena calidad, mientras que los *Oligochaetos* son característicos de sistemas de menor calidad de agua (con mayor cantidad de materia orgánica, y menor concentración de oxígeno, entre otros). Debido a ello, tanto éstos como otros grupos son considerados indicadores clave de buena calidad (efemerópteros, tricópteros, odonatos), mientras que otros son considerados indicadores de mala calidad de agua

(oligoquetos, quironómidos, isópodos) (e.g. Roldan, 1992; Kerans et al., 1994; DeShon, 1995; Skriver, 1999; Timm et al., 2008).

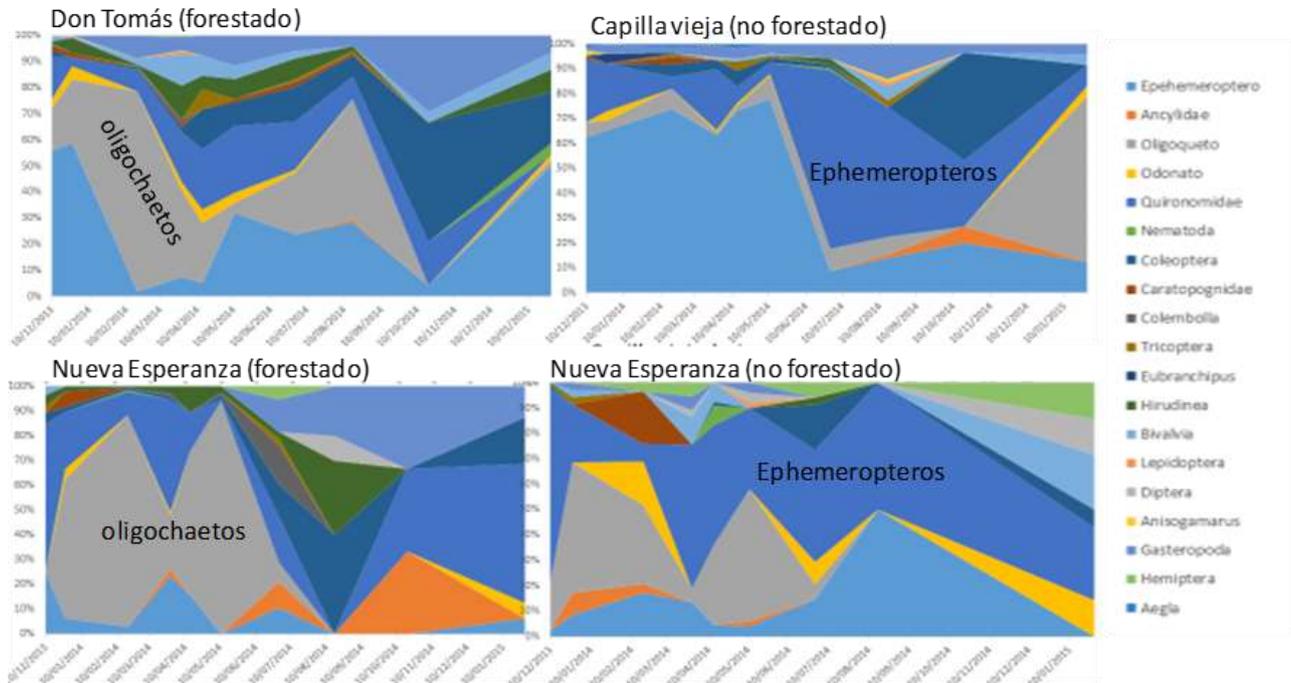


Figura 4.10 Variación temporal de la composición taxonómica relativa de la comunidad de macroinvertebrados asociados al proceso de descomposición de *S. californicus* a lo largo de un año en los cuatro arroyos estudiados.

Al igual que en los casos anteriores, es necesario poder contar con un mayor número de sistemas, monitoreados durante períodos más largos, para poder desarrollar métricas comunitarias que permitan la evaluación directa de la calidad de agua y del ecosistema en general mediante estos bioindicadores.

Tabla 4.3 Macroinvertebrados encontrados a lo largo de los experimentos de descomposición de materia orgánica y por lo tanto, presentes en los arroyos respectivos.

Taxa	Don Tomás	Capilla Vieja	Nueva Esperanza forestado	Nueva Esperanza no forestado
Ephemeroptera	x	x	X	x
Gastropoda- Ancylidae		x	X	x
Oligochaeta	x	x	X	x
Odonata -Anisozygoptera	x	x	X	x
Odonata -Zygoptera	x			x
Diptera -Chironomidae	x	x	x	x
Nematoda		x		
Coleoptera larva	x		x	x
Diptera -Ceratopogonidae		x	x	
Collembola				x
Trichoptera	x	x	x	

Crustacea-Branchiopoda-Eubbranchipus sp				
Hirudinea	x	x	x	x
Bivalvia	x	x		x
Lepidoptera		x		
Diptera		x	x	x
Amphipoda-Anisogammarus sp				x
Gastropoda	x	x	x	
Hemiptera			x	x
Crustacea-Decapoda-Aegla sp		x	x	
Coleoptera- Hydrophilidae	x		x	x
Coleoptera -Elmidae (adulto)		x	x	x
Coleoptera -Silphasae				x
Coleoptera -Dystisidae	x		x	x
Coleoptera -Lutrochidae	x			
Coleoptera -Lampyridae	x	x		

4.4 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Las diferencias en las características de los sedimentos y de la calidad del agua de los cuatro arroyos estudiados fueron, en general, menores. Salvo algunas pocas variables, no se encontraron patrones claros que pudieran asociarse a la ocurrencia de forestación en las cuencas. Esto se ha descrito en la literatura internacional, donde la tendencia es a analizar un número muy alto de cursos de agua bajo distintos escenarios de usos del suelo, con el fin de detectar de forma clara la relación entre usos del suelo específicos y la respuesta del ecosistema.

En el Uruguay, los estudios enfocados en analizar el rol de las comunidades de organismos macroinvertebrados como indicadores de calidad de agua e impactos del uso del suelo son escasos en general (Arocena & Pintos, 1988; Arocena et al., 1989; Arocena, 1996; Chalar et al., 2011), y son nulos en el caso de los efectos de la forestación, siendo este estudio el único antecedente del que tenemos conocimiento.

Cabe resaltar que el uso de medidas que evalúen procesos de alta complejidad ecológica, como la descomposición de materia orgánica, o que evalúen las comunidades de macroinvertebrados, tienen un mayor potencial para determinar cambios sobre el ecosistema acuático debido a diferentes estresores ambientales, tanto naturales (e.g. cambios en el clima) como antrópicos (e.g. cambios en el uso del suelo).

Debido a ello, tanto la Directiva Marco del Agua de Europa (Directiva 2000/60/CE) así como los lineamientos de la EPA en Estados Unidos, recomiendan su implementación (EPA, 1998, 2000) junto con estudios puntuales de la calidad de agua (medida en forma clásica a través de parámetros físico-químicos). Esto se debe a que dichos organismos o procesos integran ventanas temporales mayores y son el resultado final del funcionamiento de todo el ecosistema.

En este sentido, las metodologías diseñadas considerando el bajo caudal de arroyos de microcuencas y así compensar la ineficacia de muestreos de comunidades biológicas que requieren agua en forma permanente (i.e. macroinvertebrados asociados al lecho del curso, plantas acuáticas y peces), resultaron muy interesantes y auspiciosas. Sin embargo, los resultados son en todos los casos preliminares, tanto por la metodología en sí (nueva y en ajuste), como por la dificultad de extraer conclusiones firmes sobre los efectos de la forestación sobre la biota y los procesos ecosistémicos con el estudio de sólo dos pares de arroyos. Esto se debe a que las comunidades biológicas son muy variables en el tiempo y en el espacio, tanto como consecuencia de procesos internos (e.g. dinámica poblacional, interacciones con otras especies, etc.) como de factores externos (e.g. clima, cambios en las condiciones ambientales generadas directa o indirectamente por los cambios en el uso del suelo). Así como la estructura de la biota y el funcionamiento a nivel ecosistémico resumen más cabalmente el estado de salud de los cursos de agua que mediciones puntuales de variables físicas y químicas, dicha variabilidad impone restricciones a su interpretación.

Entonces, es sumamente necesario ampliar el número de cursos de agua a monitorear, así como los períodos de estudio, de forma de abarcar un rango más amplio de situaciones biológicas y ecológicas, para poder extraer patrones claros.

4.5 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

- Abelho, M. & Graca, M.A.S. 1996. Effects of eucalyptus afforestation on leaf litter dynamics and macroinvertebrate community structure of streams in Central Portugal. *Hydrobiologia* 324: 195-204.
- Arocena, R. & Pintos W. 1988. Antecedentes para un estudio limnológico del Arroyo Carrasco. Serie Avances de Investigación, Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo. 32.
- Arocena, R., Pintos, W., Chalar, G. & De León R. 1989. Variaciones físicas y químicas en el arroyo Toledo-Carrasco en verano. *Revista Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*. 20: 15-23.
- Arocena, R. 1996. La comunidad bentónica como indicadora de zonas de degradación y recuperación en el arroyo Toledo (Uruguay). *Revista de Biología Tropical*, 44(2): 679-671.
- APHA, 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WPCF, 16th Edition, Washington, 1265 pp.
- Chalar, G., Arocena, R., Pacheco, J.P. & Fabián, D. 2011. Trophic assessment of streams in Uruguay: a trophic state index for benthic invertebrates (TSI-BI). *Ecological Indicators* 11: 362-369.
- DeShon, J. 1995. Development and application of the invertebrate community index (ICI). Davis, W. S., & Simon, T. P. (Eds.) *Biological Assessment and criteria tools for water resource planning and decision making*. (pp 217-243) London. Lewis publishers
- EPA. 1998. Environmental Monitoring and Assessment Program (EMAP): Research Plan
1997. EPA/620/R-98/002. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- EPA. 2000. Ecological Assessment of Streams and Rivers in the Western United States:
A cooperative effort between the U.S. EPA and Western States and Tribal nations. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Gessner, M.O. & Chauvet, E. 2002. A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity. *Ecological Applications* 12:498–510.
- Kerans, B. L., & Karr, J. R. 1994. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological applications*, 4(4), 768-785.
- Koroleff, F., 1970. Direct determination of ammonia in natural waters indophenol-blue. International Conference in the Exploration of the Sea. C.M. 1969/C9. ICES. Information on techniques and methods for sea water analysis. Interlaboratory Report 3: 19–22.
- Müller, R. & O. Widemann, 1955. Die Bestimmung des Nitrat-Ions in Wasser. *Von Wasser* 22: 247.
- Murphy, J. & J.P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31–36.
- Roldan, G. 1992. Fundamentos de limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Skriver, J. 1999. Danish Stream Fauna Index (DSFI) as an indicator of rare and threatened benthic macroinvertebrates. In *Biodiversity in Benthic Ecology*, Silkeborg (Denmark).
- Timm, H., Mardi, K., & Möls, T. 2008. Macroinvertebrates in Estonian streams: the effects of habitat, season, and sampling effort on some common metrics of biological quality. *Estonian J. Ecol*, 57, 37-57.
- Valderrama, J.C., 1981. The simultaneous analysis of total N and total P in natural waters. *Marine Chemistry*, 10, 109–122.

5. PÉRDIDAS DE SUELOS Y NUTRIENTES

5.1 EROSIÓN

La evaluación de pérdida, o redistribución, del suelo por erosión se abordó durante el Proyecto mediante las siguientes líneas: i) estimación de la erosión real a partir de la cuantificación del indicador Cs137 en el perfil del suelo y ii) determinación de la carga de sedimentos mediante la evaluación de las modificaciones en los sólidos suspendidos en el escurrimiento a la salida de las microcuencas forestadas.

5.1.1 ESTIMACIÓN CON INDICADOR 137CS

El uso de indicadores como los radionucleidos ambientales, y en particular el 137Cs, que permiten establecer tasas de erosión y sedimentación así como representar espacialmente la redistribución de suelo, está extendido a nivel mundial, sin embargo la utilización de esta técnica a nivel local y en especial en suelos con cobertura forestal es incipiente.

La primer experiencia de evaluación de tasa de erosión por cosecha forestal en Uruguay, se llevó a cabo con la ejecución del Proyecto CSIC I+D “Evaluación de la producción de sedimentos en cuencas forestadas” ejecutado entre 2011 y 2013. En dicho proceso se encontró como principal limitante para la aplicación de la técnica el número de muestras a procesar y el tiempo que insume dicho procesamiento.

Se planteó por tanto en el marco de este Proyecto Alianzas la incorporación de técnicas geoestadísticas que permitirá abordar dos aspectos: 1) Caracterización de la distribución de cesio para la cuenca de estudio y 2) establecer el modelo óptimo de muestreo para el indicador. Estas actividades se enmarcan en el trabajo de tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, opción Bioestadística del Lic. Gabriel Perazza que aún está en desarrollo.

Metodología

- **Estrategia de muestreo para cuantificación del Cs-137**

Al reconocerse tres zonas bien diferentes de suelo se trabajará con 3 isosectores, con el fin de tomar sectores homogéneos que no introduzcan variabilidad en la distribución del indicador producto de la diferencia de tipo de suelo (Mabit et al 2007; Zapata, 2002).

Dentro de cada uno de estos 3 isosectores se estableció una grilla simétrica de tamaño 50x 50 metros (Figura 5.1 dentro de la cual y en forma aleatoria se tomó la muestra, totalizando 60 muestras por isosector. En la zona forestada además se tomaron muestras duplicadas en fila y entrefila dentro de algunos elementos de la grilla como insumo para la evaluación de diferencias entre ambas condiciones.



Figura 5.1 Grillas para el muestreo de ^{137}Cs en la cuenca Don Tomás

Por cada sitio de muestreo se tomaron muestras con cilindros de 5x30cm, que luego serán homogenizadas en una misma muestra. La profundidad elegida es de 30cm ya que de estudios previos surge que es la profundidad máxima a la que se ha encontrado actividad cuantificable del radionucleido (Alonso et al, 2012).

Se muestreo además en un sitio alto de la cuenca, no forestado ni arado, cecano al camino vecinal, con el objetivo de tener un sitio de referencia que permita establecer la magnitud de las pérdidas o ganancias de suelo.

- **Modelos de Conversión**

El uso de las medidas de ^{137}Cs para estimar las tasas de pérdida y acumulación de suelo, se basa en el supuesto de que una relación fiable puede ser establecida entre el grado de aumento o decaimiento del inventario de cesio-137 en el suelo en relación al inventario de la línea de base y la profundidad total de suelo perdida o agregada. Walling y Quine (1990) recomiendan la aplicación de los procedimientos de contabilidad teóricas para establecer relaciones de calibración, ya que representan el efecto agregado de todos los procesos de redistribución.

En este contexto, el valor de referencia proporciona una evaluación de la entrada total de ^{137}Cs precipitado en el sitio, corregido por el decaimiento radiactivo al momento del muestreo. Las estimaciones resultantes de la tasa de erosión o sedimentación representan una tasa promedio para el período que se extiende desde el pico de ingreso de ^{137}Cs al suelo, principios y mediados de 1960, hasta el momento del muestreo. En el caso de Uruguay el establecimiento de la plantación forestal comercial se dio a mediados de la década de 1990 por lo cual esta cobertura vegetal no interfirió en la precipitación de la lluvia radioactiva de mediados de 1960, es por eso que pueden considerarse sitios de pastura natural como referencia para el establecimiento de tasas de erosión en tierras actualmente forestadas

Para la selección de los diversos procedimientos y modelos que se pueden utilizar para convertir las medidas de actividad a estimaciones de las tasas de erosión o deposición, es fundamental poder distinguir entre suelos cultivados y tierras de pastura o tierras de pastoreo, que son esencialmente inalterados. En la zona de estudio

se considera para esta aplicación preliminar de un modelo de conversión que el suelo es imperturbado en la entrefila, ya que originalmente el predio era un establecimiento ganadero, con cobertura de pasturas nativas. Posteriormente para el establecimiento de la plantación el suelo fue intervenido con excéntrica para marcación de surcos y luego subsolado a 40cm de profundidad en la fila de plantación. Las muestras de suelo para evaluación en el estudio que fueron tomadas en la entrefila pueden considerarse por lo tanto suelo imperturbado.

He y Walling (1997) representan el efecto neto de todos esos procesos, utilizando un modelo de transporte unidimensional que se caracteriza por un coeficiente de difusión efectivo D [$\text{kg}/\text{m}^4 \cdot \text{año}$] y una tasa de migración V [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$] para el perfil del suelo. La variación temporal de la concentración de ^{137}Cs en la superficie del suelo puede expresarse como:

$$C_u(t) \approx \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t')e^{-R/H}}{\sqrt{D\pi(t-t')}} e^{-\frac{V^2(t-t')}{4D} - \lambda(t-t')} dt' \quad [1]$$

y siendo:

$$V \approx \frac{W_p}{(t-1963)} \quad y \quad D \approx \frac{(N_p - W_p)^2}{2(t-1963)} \quad [2]$$

Donde: C_u es la concentración en superficie [Bq/kg]; H es la profundidad de relajación [kg/m^2]; $I(t)$ es el flujo de depósito de ^{137}Cs en t [$\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$]; λ es la constante de decaimiento del ^{137}Cs [$1/\text{año}$]; W_p la profundidad másica de la concentración máxima de ^{137}Cs [kg/m^2]; N_p la profundidad másica donde la concentración de ^{137}Cs se reduce a $1/e$ de la máxima [kg/m^2]

Para un sitio erosionado, donde el inventario de ^{137}Cs es menor al sitio de referencia, y puede asumirse erosión laminar, la tasa de erosión R se estima a partir de la reducción del inventario de ^{137}Cs A_{ls} (Bq/m^2) y la concentración en superficie C_u , calculada anteriormente, mediante la siguiente relación:

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u e^{-\lambda(t-t')} dt' = A_{ls}(t) \quad [3]$$

Para un sitio de sedimentación, la tasa de deposición R' se estima a partir de la concentración del sedimento depositado $C_d(t')$ y el inventario en exceso $A_{ex}(t)$, calculado como el inventario total del sitio menos el de referencia, usando la siguiente relación:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_0^t C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'} \quad [4]$$

siendo

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R dS} \int_S P' \cdot P \cdot C_u(t') R dS \quad [5]$$

Resultados

- **Actividad de Cs-137**

Fueron analizadas un total de 106 muestras en el Laboratorio de Radioambiente del CIN (Facultad de Ciencias). Los principales indicadores se ven en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Medidas resumen de las 106 muestras relevadas de actividad de Cesio-137 (en Becquereles) para los tres grupos, muestras pertenecientes a la fila, entre fila y tomadas en zonas de campo despejadas.

Indicadores	Entre Fila	Fila	Campo
Máximo	592.7	841.2	1035.0
Mínimo	77.7	74.6	174.4
Mediana	294.5	330.5	281.8
Media (Bq)	291.4	334.6	333.6
Varianza	12174.2	25423.9	31095.8
Desvío (Bq)	110.3	159.4	176.3
Coef. Variación (%)	18.6	19.0	17.0
Nº observaciones	53	30	23

En dicha tabla se puede observar un mayor número de muestras analizadas para la entre fila (un total de 53), sin embargo los tres grupos presentan el mismo tipo de dispersión con coeficientes de variación del orden de 19%. Se observan los valores de medias para cada uno de los grupos, así como su desvío estándar. Podemos ver que fila y campo poseen valores más próximos en su media que entre fila. El inventario de Cesio-137 para el sitio de referencia fue de 391 Bq.

Por último podemos observar la distribución del Cesio-137 menos el valor de referencia para cada uno de los puntos muestreados para ambas grillas (Figura 5.2). Cuando tenemos valores negativos (zonas violetas) estamos por debajo del valor de sitio de referencia es decir sitios erosionados, cuando los valores son positivos estamos por encima del valor de referencia (color verde) e implica que son sitios de sedimentación. Burbujas más grandes indican mayor actividad medida en esa zona si es verde, y si es violeta indica mayor pérdida.

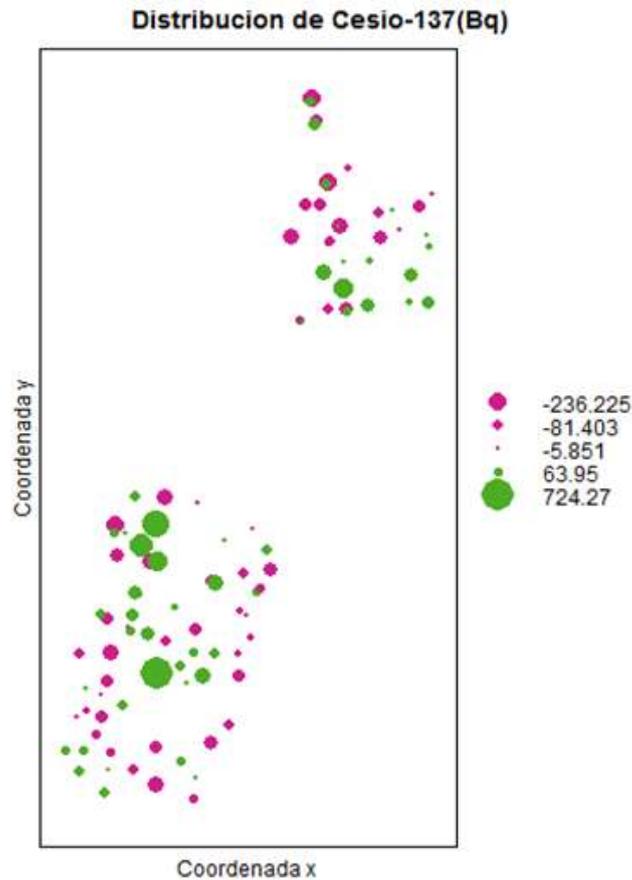


Figura 5.2 Gráfico de burbujas para Cesio-137(Bq) según la posición espacial del sitio de muestreo. La burbuja es proporcional a la actividad de cesio medida en Bq registrada en el punto menos el valor de referencia.

Vemos que para ambas grillas la distribución de zonas de pérdida o de ganancia es homogénea, sin parecer seguir un patrón espacial. Cuando se intentó ajustar un semivariograma para dichos valores no fue posible (Figura 5.3). Por lo que podemos ver que no existe una estructura espacial que explique la variabilidad asociada al Cesio-137.

Semivariograma experimental Amabas grillas

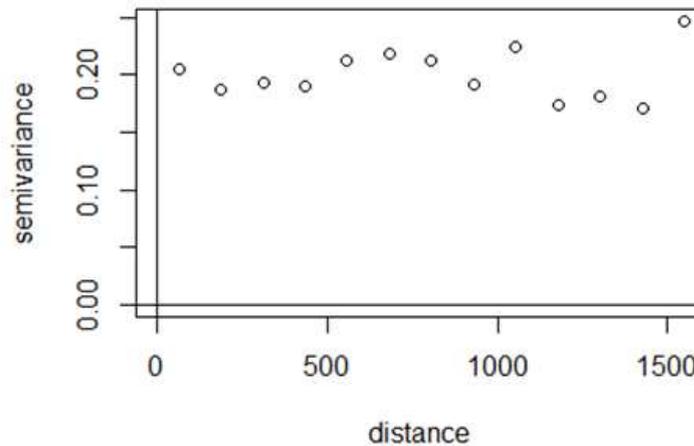


Figura 5.3 Semivariograma empírico para Cesio-137 utilizando puntos de ambas grillas para el ajuste.

Desde el punto de vista del muestreo podemos observar que cuando contemplamos los estratos de forma separada campo, fila, entrefila (Figura 5.4) podemos observar ciertas tendencias que sugieren la necesidad de considerar estratos para el muestreo.

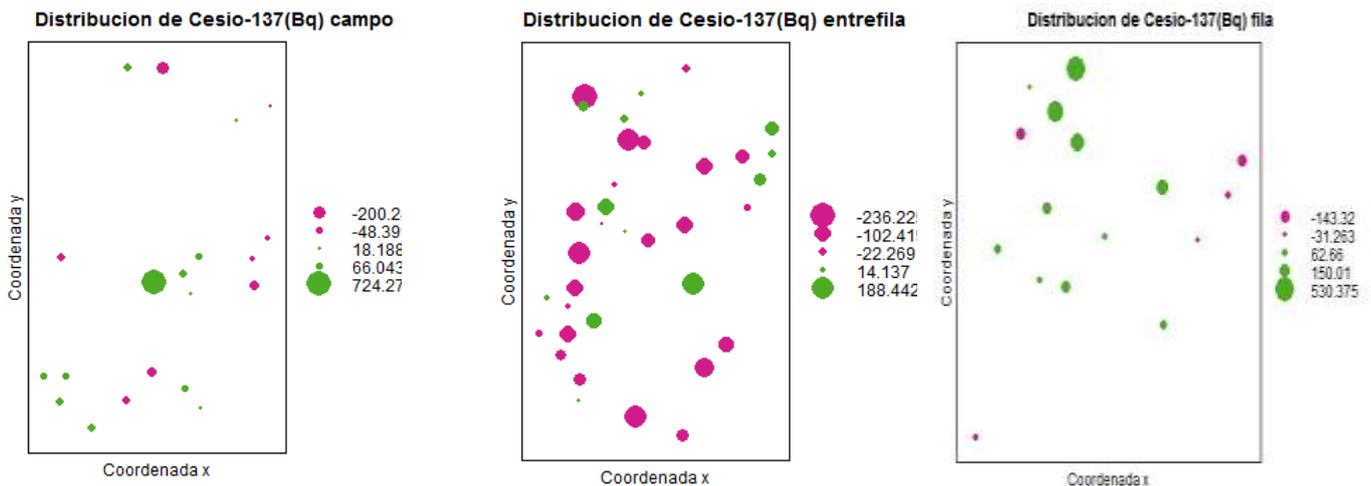


Figura 5.4 Gráfico de burbujas para Cesio-137(Bq) menos el valor de referencia en la grilla grande. A la izquierda tenemos lugares con cobertura solo de pastura o campo, al centro solo valores de la entrefila, y a la derecha valores para la fila.

Tanto para los valores de campo como fila vemos que no hay predominio ni de pérdida ni de ganancia, y que los puntos tienden a ser burbujas pequeñas (próximos al valor de referencia). Mientras que para la entrefila tenemos más zonas de pérdida y de gran valor. Esto tendría sentido ya que al realizar la plantación se toma tierra de la entrefila para colocar en los árboles en la fila.

Con estos resultados vemos que tendría sentido realizar un muestreo estratificado que diferencie entre las tres situaciones (campo, fila, entrefila) para poder capturar efectivamente a variabilidad asociada a cada uno de estos estratos.

- **Conversión Actividad-Erosión**

Dado que el muestreo del sitio de referencia se realizó preliminarmente en forma integrada en el perfil y no en detalle por profundidad, los parámetros fundamentales de los modelos reseñados anteriormente no pudieron determinarse, tomándose para esta evaluación preliminar los que surgen del sitio de referencia del proyecto CSIC (Alonso, 2013). Los valores considerados fueron $h_0=117.6$ Bq/kg, $D=267$ kg/m⁴.año y $V= 2,7$ kg/m².año.

Aplicando el modelo de difusión mediante el complemento de Excell “Radiocalc” en forma preliminar a una transecta formada por sitios de entrefila en la ladera sur de la cuenca, se estimó una erosión neta para la transecta de 1.3 Ton/ha.año.

5.1.2 CARGA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Metodología

La metodología planteada para estimar la carga de sedimentos en suspensión considera la toma de muestras en forma automática (ISCO-Sampler) durante eventos de crecida y en períodos de flujo uniforme. La concentración de sedimentos en suspensión se evalúa filtrando dichas muestras en el laboratorio (Anexo IV). En forma complementaria se instaló un sensor de turbidez desde noviembre de 2014 que permite contar con una señal continua para la estimación de la carga de sedimentos.

En la Figura 5.5 y Figura 5.6 se observan los muestreadores automáticos instalados en las microcuencas con cobertura forestal. Estos equipos por su gran versatilidad y complejidad han requerido un desarrollo y un proceso de puesta en marcha significativamente mayor al resto. Debido al alto consumo de energía del muestreador, su autonomía en campo ha sido optimizada con un sistema fotovoltaico que complementa la descarga de las baterías del equipo. Por otro lado se ha interconectado el muestreador con equipos de medición de nivel (OTT Thalimedes) con el fin de obtener muestras en momentos particulares con relación a los eventos de crecida en el cauce. Con dicha implementación se han tomado muestras en momentos donde el nivel es superior a una cota de referencia (muestras diarias), o en momentos donde se supera cierta tasa de elevación de nivel (muestras en eventos).

En base a la información disponible de las series continuas de caudal y turbidez, así como las determinaciones puntuales de concentración de sólidos en suspensión ([SST]) se establece las relaciones entre ellas que permiten estimar series continuas de [SST] y con ello la carga de sedimentos a la salida de la cuenca.

Para el caso de la relación caudal-SST, algunos autores como Iroume (1992 y 2003), sugieren una relación potencial de la forma:

$$[SST] = a \cdot Q^b \quad [6]$$

Dónde: Q es el caudal en el momento del muestreo; a y b son parámetros que dependen de la cubierta vegetal y de las características climáticas, físicas e hidrológicas de la cuenca; .



Figura 5.5 Muestreador automático de agua modelo ISCO 6712 ubicado en Don Tomas.



Figura 5.6 Muestreador automático de agua modelo ISCO 6712 ubicado en LNE-forestal.

Resultados

Para la cuenca Don Tomás en el período precosecha se cuenta con 62 muestras de SST desde noviembre del 2013 con una media de 57 mg/l y un desvío estándar de 49,95 mg/l. En el caso de la sonda de turbidez, instalada en noviembre del 2014, aun no se cuenta con suficientes muestras de SST para poder determinar relaciones con dicha variable. En base a la información disponible se ha establecido una relación preliminar entre concentración de sedimentos en suspensión totales ([SST]) y caudal (Q) para la cuenca de Don Tomás, si bien es necesario mayor cantidad de tiempo y muestras para llegar a valores confiables.

Para el caso de la cuenca de La Nueva Esperanza se realizó el mismo abordaje, si bien se cuenta con menos datos para ajustar la relación. Un total de 25 muestras de SST durante el año 2014 con una media de 50 mg/l y un desvío estándar de 48,74 mg/l. Para estas instalaciones no se cuenta con sonda de turbidez.

- **Relación lineal**

Al realizar un gráfico de Sólidos suspendidos totales con respecto a caudales medidos en la cuenca Don Tomás y La Nueva Esperanza obtenemos los ajustes lineales que se observa en la Figura 5.7 y Figura 5.8.

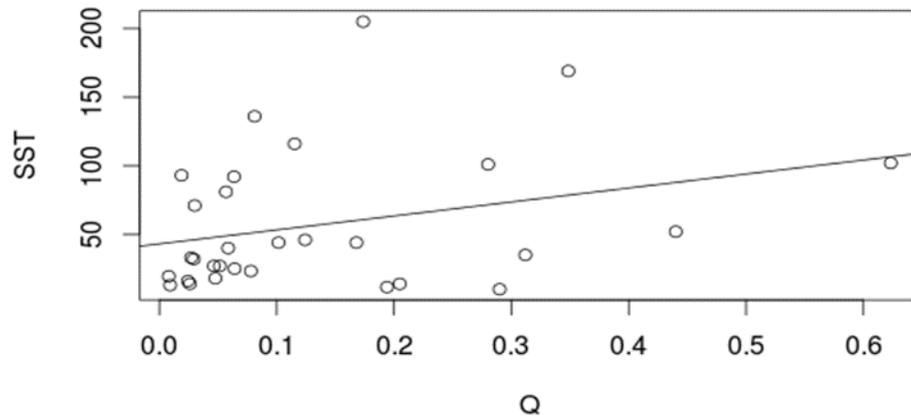


Figura 5.7 Gráfico de sólidos suspendidos totales en función de los caudales medidos con un ajuste lineal, arriba en la cuenca de Don Tomás

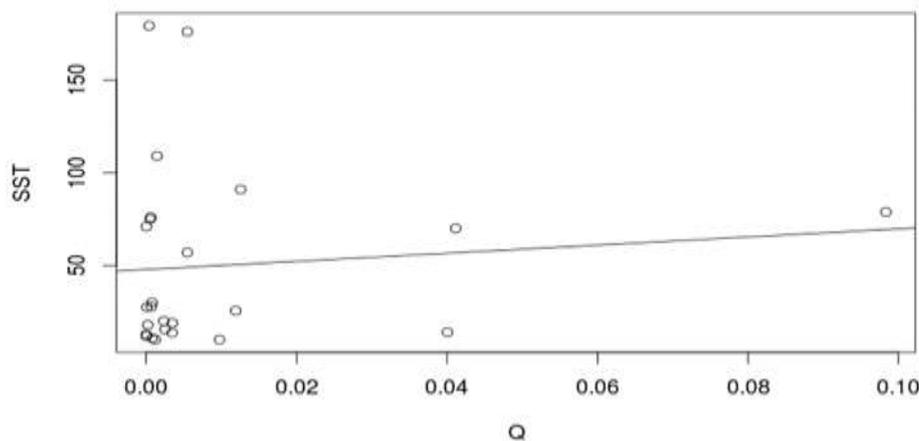


Figura 5.8 Gráfico de sólidos suspendidos totales en función de los caudales medidos con un ajuste lineal, arriba en la cuenca de LNE_forestal

Para Don Tomás se determinó el valor de R2 de 0,089, el valor del intercepto 43,11 y el valor de la pendiente 101,79 para determinar la función de conversión de caudal en [SST] de la siguiente forma $[SST]=101,79*Q+43,11$. Se utilizó una regresión lineal como primer acercamiento a la relación debido a la cantidad de puntos y gran variabilidad de los datos que no permitieron explorar gran parte de los modelos utilizados en otros trabajos. Los caudales utilizados para el ajuste de la regresión se encuentran en el entorno de 0 a 0,62 m3/s.

En el caso de La Nueva Esperanza se determinó el valor de R2 de 0,01, el valor del intercepto 47,86 y el valor de la pendiente 219,15 obteniendo la recta $[SST]=219,15*Q+47,86$. La regresión no presenta buen ajuste, a diferencia de Don Tomás se cuenta con menos valores que dificultan la realización de ajustes. Los caudales utilizados para la regresión se encuentran en el entorno de 0 a 0,10 m3/s.

En base a las regresiones realizadas y construyendo intervalos de confianza al 95% para los parámetros se obtuvo los rangos de valores de kg de suelo por ha para cada año (tabla 1). El rango de valores obtenido incluye el resultante de la recomendación de Harmel et al. (2006) que sitúa el rango probable de error en la medición de SST en 117% considerando el peor escenario debido a las malas condiciones de conservación de las muestras. En el caso de Don Tomás El año 2008 no fue incluido en la evaluación ya que la cantidad de datos de caudal faltante es significativa y no permite una estimación confiable.

Tabla 5.2 Valores de Kg de suelo/ha para cada año utilizando intervalos de confianza al 95%

Año	Kg de suelo/ha.año Don Tomás	Kg de suelo/ha.año La Nueva Esperanza
2014	346-619	284-614
2013	287-527	106-183
2012	862-1670	149-287
2011	329 - 597	255 - 572
2010	222-431	224-514
2009	103-189	376-953
2008	-	80-165
Promedio anual	358 - 672	211 - 470

Los valores de caudal para cada año en promedio se encontraron dentro del rango de valores donde se ajustó la relación lineal SST-Q, de 0 a 0,62 m³/s para Don Tomás y de 0 a 0,10 m³/s para La Nueva Esperanza. No obstante para valores extremos existieron casos donde el límite superior donde se realizó el ajuste era superado. De todos modos en la mayoría de los años nos encontramos cercanos a los límites de definición.

- **Relación potencial**

Se realizó el ajuste de una relación potencial de la forma de la ecuación [6]. En la Figura 5.9 y Figura 5.10 se muestran los ajustes obtenidos.

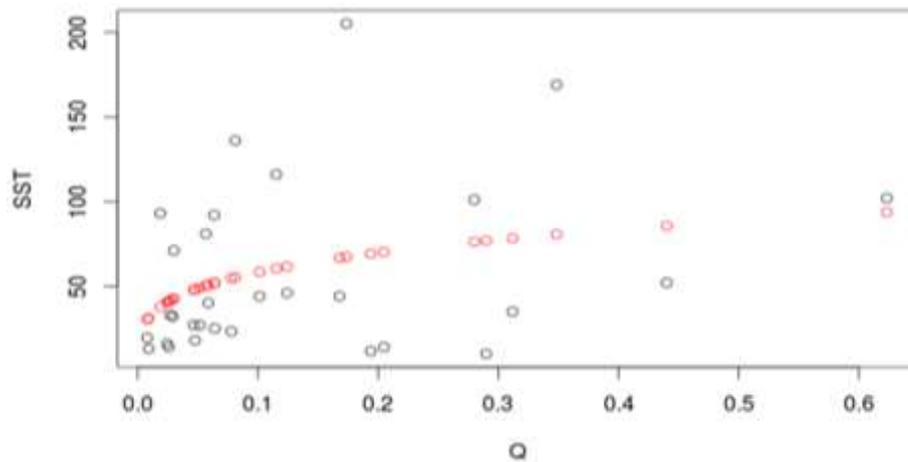


Figura 5.9 Ajuste potencial para la relación SST-Q indicado con los puntos rojos. En negro se encuentran los valores observados para Don Tomás

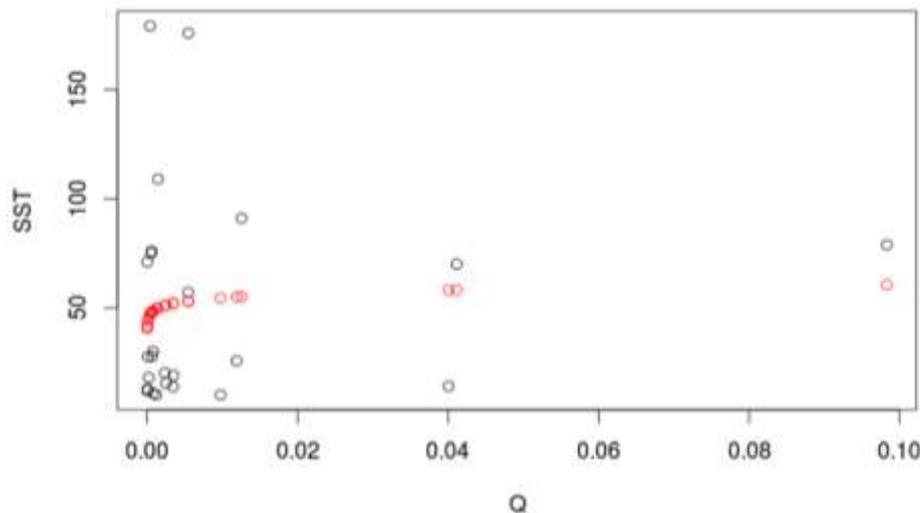


Figura 5.10 Ajuste potencial para la relación SST-Q indicado con los puntos rojos. En negro se encuentran los valores observados para LNE_forestal

Los valores encontrados para el modelo en Don Tomás son $a=17$ y $b=0,26$ para una significancia del 10%, con el caudal expresados en l/s. En el caso de b nos encontramos con valores dentro del rango reportado por Iroumé (1992) quién menciona que varía entre 0 y 2.5 y expresa la intensidad de las fuerzas erosivas, sin embargo el parámetro a determinado se encuentra muy por encima de los valores reportados en ese trabajo.

Para la Nueva Esperanza los valores encontrados para el modelo son $a=67,37$ y $b=0,047$ para una significancia del 10% en el caso de a , en el caso de b podría tomar el valor cero inclusive ya que no fue significativo. En ese caso los valores de caudal fueron expresados en m^3/s .

Por último, comparando ambos ajustes, lineal y potencial se obtienen estimaciones un 20% y 40% mayores (Don Tomás y La Nueva Esperanza) para el caso lineal. Por ejemplo para el año 2014 tenemos una estimación para Don Tomás con el lineal de 368 kg/ha por año, mientras que con el modelo potencial tenemos una estimación de 298 kg/ha por año. En La Nueva Esperanza tenemos la misma situación con valores de 284 kg/ha contra 199 kg/ha. Para valores de caudal elevados el modelo potencial tiende a crecer en menor medida que el lineal.

5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO

5.2.1 METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar el contenido de nutrientes (P, Ca, Mg, Na y K) y otros elementos de interés (materia orgánica, pH, metales pesados, etc) y su evolución entre dos períodos contrastantes en cuanto al manejo de la cobertura forestal: pre y pos cosecha se tomaron muestras de suelo en tres sitios representativos de la microcuenca Don Tomás (forestada), considerando diferentes posiciones topográficas (Sitio 1: zona alta plana, Sitio 2: ladera media y Sitio 3: ladera baja), Figura 5.11.

Las muestras de suelo pre cosecha fueron extraídas a inicios de 2014 y las profundidades consideradas fueron: 0 – 5 cm, 5 – 10 cm y de 10 – 20 cm; teniendo en cuenta que las variaciones, en caso de existir, son esperables a nivel superficial. Se extrajeron tres repeticiones por sitio y por profundidad conformando una muestra compuesta a efectos de los análisis correspondientes.

Las muestras pos cosecha fueron extraídas en setiembre de 2015, teniendo en cuenta las mismas consideraciones, en cuanto a cantidad y profundidades, que para el período pre cosecha.

Los análisis correspondientes a las muestras de ambos períodos fueron realizados en Laboratorio Oriental, los resultados obtenidos para cada elemento puede consultarse en el Anexo.



Figura 5.11 Ubicación de los sitios de muestreo de suelos pre y pos cosecha en la microcuenca forestada (Don Tomás)

5.2.2 Resultados Preliminares

Con el objetivo de evaluar la existencia de diferencias cuantitativas en los niveles de nutrientes y de otros elementos presentes en el suelo pre y pos cosecha se consideraron dos fechas de muestreo de suelo lo mas separadamente posible en el tiempo para poder cuantificar las posibles variaciones, lo cual generó el inconveniente (no previsto) de que el muestreo pos cosecha se efectuó luego de la replantación, lo cual determinó que el suelo se encontrará “contaminado” con elementos provenientes de la fertilización inicial y aplicación de fitosanitarios, afectando los resultados. Consecuencia de lo anterior las diferencias encontradas no pueden adjudicarse a los efectos de los manejos de cosecha teniendo en cuenta que es esperable que los mismos incrementen la tasa de erosión y por tanto la disminución de algunos elementos de los analizados a nivel superficial (0 – 5 cm) que se perderían adheridos a coloides orgánicos y arcillosos.

En la

Tabla 5.3 se muestran los resultados de las dos fechas de muestreo de los principales nutrientes a nivel de suelo para el sitio 1 y el 3, el sitio 2 (Figura 5.11) no pudo muestrearse en la segunda fecha por no poder acceder al mismo consecuencia de las malas condiciones de accesibilidad debido a precipitaciones ocurridas previo al muestreo.

Una consideración a tener en cuenta es que inmediatamente a las actividades de cosecha realizadas durante el otoño-invierno de 2014 se comenzaron las actividades de laboreo para la replantación que se realizó en el otoño 2015, lo cual generó una rugosidad importante a nivel superficial impidiendo que los procesos erosivos, consecuencia de escurrimientos superficiales de cierta magnitud, se vieran impedidos, evitando así el arrastre de partículas de suelo como era de esperarse. El período que transcurre entre las actividades de cosecha hasta una nueva implantación se considera uno de los más propicios en cuanto al incremento de las pérdidas de suelo por erosión dado que el mismo se encuentra descubierto favoreciendo el impacto de las gotas de lluvia sobre las partículas de suelo y su posterior arrastre por el escurrimiento superficial, sin embargo no fue lo que ocurrió en este caso (al contrario de lo esperado) y que fue confirmado por una menor concentración de sedimentos a la salida de la cuenca.

Tabla 5.3 Caracterización química pre y pos cosecha del suelo, bajo cobertura forestal, a diferentes profundidades en el horizonte superficial para los Sitios 1 (ladera alta) y 3 (ladera baja)

Parámetro	Unid.	Año	Sitio 1 - DT Redistribución			Sitio 2 - DT Tubos 1 y 2		
			0 - 5 cm	5 - 10 cm	10 - 20 cm	0 - 5 cm	5 - 10 cm	10 - 20 cm
N-Nitrato	ppmN-NO3	2014	7	3	3	9	4	3
		2015	37	38	28	49	28	11
P Bray I	ppm P	2014	3	3	3	3	3	3
		2015	3	4	4	2	4	2
P (ác. cítrico)	ppm P	2014	5	5	6	4	4	4
		2015	6	4	4	2	3	2
Nitrógeno	Total (%)	2014	0.24	0.22	0.19	0.28	0.26	0.23
		2015	0.18	0.19	0.17	0.23	0.22	0.19
pH	H2O	2014	4.86	4.72	4.95	4.98	5.01	5.31
		2015	4.74	4.59	4.91	4.89	4.79	4.92
MO	(%)	2014	4.09	3.86	3.32	4.86	4.43	3.95
		2015	4.74	3.22	2.86	4.04	3.86	3.27
Amonio	ppm N-NH4	2014	2	3	3	3	3	5
		2015	19.2	13.65	7.65	8.8	5.35	9.2
Cond. Eléct.	us/cm	2014	187	219	226	209	230	199
		2015	173	170	131	206	132	72
Sulfato	ppm	2014	<150	<150	<150	<150	<150	<150
		2015	<150	<150	<150	<150	<150	<150
Cobre	ppm	2014	0.17	0.22	0.36	0.37	0.41	0.36
		2015	1.33	1.39	1.46	1.88	2.08	1.81
Cobalto	ppm	2014	4	4	6	6	6	5
		2015	7.3	8.3	8.8	11	11	11
Potasio	cmol/kilo	2014	0.23	0.17	0.21	0.69	0.66	0.57
		2015	0.31	0.23	0.26	0.83	0.68	0.62
Sodio	cmol/kilo	2014	0.05	0.16	0.05	0.12	0.1	0.11
		2015	0.15	0.14	0.19	0.22	0.2	0.32
Calcio	cmol/kilo	2014	11.78	11.28	13.96	15.19	15.78	18.48
		2015	10.74	9.93	13.62	15.01	13.8	16.93
Magnesio	cmol/kilo	2014	1.66	1.58	1.76	2.34	2.4	2.41
		2015	1.26	1.15	1.27	1.98	1.72	2.21
Ac. Intercambiable	cmol/kilo	2014	0.4	0.7	0.45	0.5	0.4	0.4
		2015	4.7	4.7	4.3	4	4.1	4.4
CIC	cmol/kilo	2014	14.12	13.89	16.43	18.84	19.34	21.97
		2015	17.16	16.15	19.64	22.04	20.5	24.48

5.3 BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

- Alonso, J.; Audicio, P.; Martínez, L.; Scavone, M; Rezzano, E. 2012. Comparison of measured Cs-137 data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates. *Agrociencia (Uruguay), Special issue. vol.: 16 2 1, p.: 261 -267.*
- Harmel, R. D., R. J. Cooper, R. M. Slade, R. L. Haney, J. G. Arnold. 2006. Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. *Transactions of the ASABE. Vol. 49(3): 689-701.*
- He, Q., y Walling, D. E. 1997. The distribution of fallout 137 Cs and 210 Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes, 48(5), 677-690.*
- Iroumé, Andres. 1992. Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia), vol.13, no.2, p.15-23. ISSN 0717-9200.*
- Iroumé, Andres. 2003. Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia), vol.24, no.1, p.125-135. ISSN 0717-9200.*
- Mabit, L. y Fulajtar, E. 2007. "The use of 137Cs to assess soil erosion and sedimentation processes: advantages and limitations ", IAEA (Eds.), *Extended Synopsis of the International Conference on Environmental Radioactivity: From Measurements and Assessments to Regulation, p.338-339.*
- Walling, D. E., y Quine, T. A. (1990). Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation, 2, 161–175.*
- Zapata, F. 2002. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides.* KluwerAcademicPublishers, Dordrecht, 2002. ISBN: 0-306-48054-9; 1-4020-1041-9.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1 DISCUSIÓN

Este informe sintetiza, por ejemplo en términos de balance hídrico, el trabajo realizado en el marco de proyectos de investigación financiados por instituciones públicas y cofinanciados por las empresas forestales, según se describe en el capítulo inicial del presente informe. Conviene no obstante señalar que, el período de monitoreo, ha estado dominado por años anómalos, con primaveras y veranos excepcionalmente húmedos y otoños e inviernos relativamente secos. Ello incide en que, contrariamente a lo esperado, la evapotranspiración real en microcuencas forestales sea mayor en meses de otoño e invierno.

Conviene también notar que las medidas de contenido de humedad de suelo abarcan el período inicial, con muestras mensuales, y que recién en la última etapa se pudo incorporar nuevos sensores de registro continuo. Del mismo modo, en DT y LC se pudo computar la recarga a partir del cuarto año de monitoreo, mientras que en LNE no se pudo computar debido a que los piezómetros existentes interconectan a través de rejillas y prefiltro acuíferos multicapas. Si bien la magnitud de estos términos (variación del contenido de humedad de suelo y variación del almacenamiento del acuífero superior) no puede compararse con la magnitud de la precipitación, el caudal específico y la evapotranspiración estacional y anual, la no continuidad y no simultaneidad de estos términos produce una afectación en los resultados del balance hídrico.

La reducción del caudal específico se expresó en relación a la precipitación incidente, estacional y anual. No obstante, la reducción del caudal específico también depende de la distribución temporal de la lluvia, las condiciones meteorológicas (por ejemplo, nubosidad, radiación solar, temperatura) y el contenido de humedad de los suelos. Estos factores no fueron considerados, a efectos de obtener un indicador sencillo.

La falta de evidencia de patrones claros de variación de la calidad de agua en cauce que puedan asociarse a la ocurrencia de forestación en las cuencas, muestra la necesidad de analizar un número muy alto de cursos de agua bajo distintos escenarios de usos del suelo, con el fin de detectar de forma clara la relación entre usos del suelo específicos y la respuesta del ecosistema.

En relación a la producción de sedimentos en las cuencas, se cuantificaron cargas de sedimentos en suspensión menores a las esperables durante el período de monte implantado, pudiendo deberse esto al menos en parte a las malas condiciones de conservación de las muestras para el análisis de SST, así como a un número insuficiente de muestras para caudales altos. Para el período pos cosecha no fue posible establecer la relación caudal-SST debido a las pocas muestras que se obtuvieron ya que se trató de un período de acentuado déficit hídrico.

De lo señalado precedentemente, la variabilidad y/o cambio climático, muestran la necesidad de implementar programas de monitoreo de largo plazo, a efectos de validar las tendencias identificadas en cuanto a los efectos que produce la sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales.

6.2 CONCLUSIONES

6.2.1 Balance hídrico y recarga de acuíferos

Los balances estacionales y anuales correspondientes a 8 años de monitoreo (octubre 2006 a setiembre 2014), en las microcuencas Don Tomás y La Cantera permiten concluir lo siguiente:

- En años hidrológicos medios (precipitación anual 1208 mm), la reducción del caudal específico que tiene lugar en la microcuenca forestal (17,2%) es de la misma magnitud que la interceptación anual.
- La reducción del caudal específico crece hasta aproximadamente el doble (28 a 32%) en períodos estacionales (otoño-invierno o primavera-verano) caracterizados por déficit hídrico (275 a 400 mm).
- La diferencia en evapotranspiración real, entre la cobertura forestal y las pasturas naturales, alcanza hasta un 50% en estaciones con déficit hídrico, en que la lluvia es menor a 500 mm, y tiende a decrecer hasta un 10% en estaciones húmedas, en que la lluvia supera los 1208 mm.
- La recarga y descarga del acuífero superior es similar para ambas coberturas, forestal y pasturas, representando el 17 a 18% de la precipitación anual. Por lo tanto, factores locales como el clima y los suelos conducen a que la conversión de pasturas naturales a plantaciones forestales, no produzca impacto sobre la recarga de aguas subterráneas.
- El balance anual es consistente y muestra un ajuste aceptable con las relaciones desarrolladas por Zhan et al. (1999, 2001), que se basan en resultados de 250 cuencas experimentales distribuidas en 29 países del mundo.

Conviene, no obstante, señalar que los resultados basados en 8 años de monitoreo, en un período caracterizado por anomalías climáticas, con primaveras y veranos húmedos y otoños e inviernos secos, muestran que la reducción del caudal específico es mayor en otoño e invierno y menor en primavera verano. Estos resultados son opuestos a estudios previos desarrollados por el grupo, con base en 34 años de datos de precipitación y caudal de la red nacional de monitoreo en la cuenca del río Negro, que mostró que la reducción del caudal específico es mayor en primavera verano y menor en otoño invierno. No obstante, la magnitud de la reducción del caudal específico es en ambos casos del mismo orden en relación a la precipitación acumulada. Esta observación resalta la importancia de la variabilidad climática sobre los procesos de escurrimiento y evidencia la necesidad de implementar programas de monitoreo de largo plazo, de modo de representar la variabilidad climática interanual e intraestacional.

Los resultados en relación a la recarga de acuíferos requieren profundización e incorporación de nuevas medidas, de modo de disminuir las incertidumbres que se señalan en el informe técnico.

A su vez, los balances realizados en La Nueva Esperanza, abarcan un período relativamente corto pos-plantación (7 semestres después del primer año pos-plantación, en que comienza a observarse una afectación del recurso hídrico). El procesamiento permitió constatar las siguientes tendencias:

- El rango de reducción varía entre 10 a 25 % de la precipitación acumulada estacionalmente, correspondiendo el porcentaje más elevado a estaciones con déficit hídrico.
- A escala anual se cuenta con datos correspondientes a cuatro años pos-plantación, por lo que no es pertinente pretender ajustar una línea de tendencia. En tres de ellos, el rango de reducción varía entre 10 a 15%, y en el cuarto se sitúa en 21,8%.
- Los valores de ETR (evapotranspiración real) resultantes del balance hídrico en LNE, muestran un ajuste aceptable para pasturas naturales en comparación con las curvas desarrolladas por Zhang et al. (1999, 2001), mientras que la evapotranspiración real anual para la plantación forestal es próxima, pero

inferior a dicha curva desarrollada, probablemente debido a que se trata de una plantación joven, con un dosel en desarrollo.

6.2.2 Dinámica del agua en el sistema suelo-planta atmósfera

El patrón estacional y la variación del área foliar encontrada en los rodales -en las diferentes estaciones de crecimiento evaluadas- en los sitios Don Tomás y La Nueva Esperanza- reflejan una asociación con el contenido de agua en el suelo. En función del monitoreo hídrico del suelo, se puede observar en términos generales que el contenido de agua bajo rodal de Eucalyptus presenta menores valores respecto a la cobertura de pastura. A su vez se visualiza que esta tendencia es más marcada en el rodal adulto (sitio Don Tomás, en turno de corte final). En el sitio Nueva Esperanza con cobertura forestal joven (4 años) este comparativo de agua en el suelo no se presenta con diferencias tan significativas. Los valores de IAF observados en el rodal adulto (microcuenca Don Tomás) dan cuenta de una condición de dosel cerrado y máxima cobertura de suelo lo que subraya el efecto del dosel sobre la tasa de intercepción y evapotranspiración del sitio.

En la microcuenca La Nueva Esperanza se reportan valores de IAF de un rodal joven, que dan cuenta de una condición de dosel en expansión (dosel abierto) y con cobertura parcial de suelo. Esta condición altera la redistribución de la precipitación, la dinámica del agua en el suelo y la tasa de intercepción y de evapotranspiración de manera tal que permite inferir que este efecto se puede atribuir a la cobertura del dosel forestal y a la cobertura herbácea bajo dosel.

En forma preliminar se observa una directa asociación entre el almacenamiento de agua en el suelo estimado mediante el balance hídrico de Thornthwaite y Mather y el monitoreo continuo del contenido de agua en el suelo bajo pasturas. Ajustes en la calibración del sensoramiento de humedad del suelo y en los parámetros ecofisiológicos del árbol darán oportunidad de evaluar esta asociación con ambas cubiertas vegetales (pastura y forestal).

6.2.3 Intercepción

En relación a la intercepción de la precipitación en términos globales, el monitoreo del monte adulto presentó una tendencia decreciente con la edad siendo de 17% entre los 8 y 11 años de edad de la plantación y de 13% entre los 12 y los 16 años. Por su parte el monitoreo del monte joven realizado entre los 3 y 4 años de edad resultó en una intercepción del orden de 13% de la precipitación.

Se validó el modelo de Gash implementado en estudios anteriores, para el período final de la plantación adulta obteniendo un ajuste muy satisfactorio entre los valores mensuales observados en la parcela experimental y los simulados.

6.2.4 Calidad de aguas

En cuanto a la calidad del agua de los arroyos estudiados se encontraron valores semejantes en muchas de las variables medidas, sin patrones evidentes asociables al uso del suelo. Se observó una tendencia hacia una mayor conductividad, concentración de sólidos totales en suspensión y pH en los arroyos con cuencas forestadas. Por otra parte, el sedimento aledaño a los arroyos no forestados tuvo un porcentaje de humedad levemente mayor que en los arroyos forestados.

6.2.5 Pérdidas de suelos y nutrientes

La evaluación de la producción de sedimentos en las cuencas, mediante la cuantificación de la carga de sedimentos en suspensión a la salida de las mismas fue realizada en las dos microcuencas forestadas. En la microcuenca con plantación de monte adulto se estimó una producción de sedimentos de entre 358 y 672 Kg/ha.año, mientras que en la plantación joven se cuantificaron entre 211 y 470 Kg/ha.año, ambos rangos se encuentran muy por debajo de la pérdida de suelo tolerable para los suelos de la zona y también son inferiores a las estimaciones realizadas previamente de acuerdo al modelo USLE/RUSLE. La situación de déficit hídrico ocurrida en el país luego de la cosecha del monte adulto no permitió establecer una relación confiable para la estimación de la carga de sedimentos exportada luego de la cosecha y por lo tanto las variaciones no pudieron ser evaluadas.

Por otra parte la estimación de erosión neta utilizando como indicador el radioisótopo Cs-137, evaluada preliminarmente se situó en 1.3 T/ha.año para el período pre-cosecha bajo cobertura de monte adulto. Se necesita profundizar los estudios y ampliar la base de datos experimental para lograr resultados más detallados en este aspecto.

6.2.6 Modelos hidrológicos

Disponer de parámetros de los modelos hidrológicos asociados a la cobertura forestal, bajo las condiciones hidroclimáticas y de suelos de Uruguay, resulta imprescindible a la hora de utilizar la modelación hidrológica como herramienta de gestión y toma de decisiones. En este sentido se trabajó con tres herramientas de modelación de características y grados de complejidad diferentes para su implementación, obteniéndose resultados promisorios en todas ellas.

Temez

Los parámetros regionales calibrados para todo el Uruguay, resultaron válidos para el modelo de Temez implementado en las microcuencas bajo cobertura de pasturas.

Se formuló un modelo mensual, útil a los efectos de la gestión del recurso hídrico, en base a los modelos de Temez y Gash. Dicho modelo representa con un buen ajuste los volúmenes escurridos a nivel mensual en las microcuencas forestadas tomando como base la precipitación incidente en la cuenca, el ciclo medio de evapotranspiración potencial para la zona y la modelación de interceptación conociendo los parámetros estructurales del dosel.

Variación del número de curva (NRCS)

Este parámetro fue calculado a partir de la ecuación propuesta por el NRCS, en base a la precipitación y volumen de escorrentía para eventos registrados en las cuatro microcuencas.

En la cuenca La Cantera (pasturas naturales) el número de curva es aproximadamente 80, el cambio de cobertura a una plantación forestal adulta que ocupa el 56% del área de la cuenca (cuenca Don Tomás) provoca una disminución de 20 puntos, hasta un número de curva aproximadamente 60. La tendencia de disminución de NC al aumentar el porcentaje de forestación es concordante en su magnitud con tendencias publicadas en los manuales de referencia (NRCS). Se manifiesta la necesidad de continuar el monitoreo a efectos de disponer de nuevos eventos mayores a los registrados hasta la fecha.

Por otra parte en el análisis de eventos en las cuencas de LNE, no se aprecian diferencias significativas del NC entre la cobertura de pasturas naturales y el monte forestal, en particular las diferencias encontradas son menores que la desviación estándar. Estos resultados indican la necesidad de implementar otros modelos en

estas cuencas que debido probablemente a su pequeño tamaño no mostraron tendencias claras en la variación de este parámetro.

SWAT

El modelo fue implementado en las cuatro microcuencas del Proyecto, utilizando como variable de ajuste el escurrimiento diario a la salida de cada una.

Los resultados muestran que el parámetro al que el modelo resulta más sensible es el número de curva, seguido del agua disponible en el suelo. Se obtuvo un ajuste satisfactorio para la microcuenca de La Cantera y aceptable para la de Don Tomás. En base a ellos se observó una variación en el parámetro número de curva que pasó de 73 para la primera (pasturas naturales) a 65 en la segunda (56% plantación de Eucalyptus), variación menos acentuada pero comparable con la obtenida por el método del NRCS. En cuanto al segundo parámetro (agua disponible en el suelo), en los dos casos este se ubicó muy próximo al valor determinado experimentalmente.

En el caso de las microcuencas de LNE no fue posible obtener un ajuste aceptable del modelo con los registros medidos. De los resultados obtenidos se infiere nuevamente que la escala de estas microcuencas no hace factible la representación de los procesos hidrológicos predominantes en ellas por parte de este modelo, queda abierta la posibilidad de evaluar la aplicabilidad de modelos que trabajan con mayor nivel de detalle en la representación de los procesos.

6.3 FACTORES DE ÉXITO

Como principal factor de éxito del proyecto se destaca el buen funcionamiento de la Alianza, establecida en función de la confianza generada dentro del equipo y del reconocimiento por parte de los técnicos de las distintas empresas del rol de referentes en el tema del grupo académico.

Conviene también destacar:

- La generación de indicadores hidrológicos cuantitativos, de apoyo de la toma de decisiones para la gestión integral de los recursos hídricos.
- El establecer balances hídricos, comparando las coberturas forestal y pasturas, con base en información medida en el marco del programa de monitoreo.
- La implementación de modelos específicos para uso forestal (Gash).
- La incorporación de indicadores ecológicos (macroinvertebrados), que permiten pasar de datos puntuales de muestreo de aguas a una visión más integral de “salud del ecosistema”.
- La propuesta de protocolos para ampliar la actual red de monitoreo, para propender a una Red Nacional.
- La optimización de la metodología de muestreo para evaluar la pérdida de suelo utilizando Cesio como indicador.

6.4 LECCIONES APRENDIDAS

Se destaca el avance en el conocimiento nuevos equipamientos y en el funcionamiento de la instrumentación necesaria para el monitoreo de variables hidrometeorológicas, así como la incorporación de la telemetría para transmisión de datos de algunas de ellas. Un ejemplo de esto fue el funcionamiento de los registradores del contenido de humedad del suelo que resultó sumamente satisfactorio, los resultados reflejaron exitosamente el comportamiento del contenido del agua en el suelo en el tiempo y como se dan las respuestas según se esté frente a períodos de recarga (lluvias) o de disminución (principalmente debido a la extracción por parte de las raíces para satisfacer el proceso de evapotranspiración).

También se destaca el aprendizaje realizado por parte del equipo técnico en cuanto a la aplicabilidad de los modelos hidrológicos de paso temporal diario o de eventos que no resultaron exitosos en la escala espacial de las microcuencas más pequeñas (10 ha), dejando el camino abierto hacia la búsqueda de nuevos modelos (WEPP, APEX). También se resalta el aprendizaje en relación a la necesidad de la conservación refrigerada de las muestras tomadas en forma automática en campo para análisis de calidad de agua, evidenciada por la dispersión de resultados obtenidos incluso en parámetros como los SST. En relación al análisis de la biota a escala de microcuencas, el bajo caudal de los arroyos no permitió analizar componentes de la biota que requieren presencia permanente de agua y que son típicamente usados como bioindicadores de calidad del agua, tales como peces y macro invertebrados asociados al sedimento de los cauces. Por ello, diseñamos e implementamos una aproximación novedosa (eclosión de estructuras de resistencia de organismos macroinvertebrados bentónicos), que parece muy promisorio pero debe validarse en más cursos de agua para verificar su utilidad como bioindicador de calidad de agua en arroyos de microcuencas.

ANEXO I: Instrumentos de medición instalados en las microcuencas

Tabla I-1: Instrumental de medición instalado en la microcuenca Don Tomás

Equipo	Marca / Modelo	Observaciones
Estación Meteorológica	RainWise Portlog	Existente al inicio del Proyecto
Barómetro y piranometro	Watchdog	Incorporado en el marco de un Proyecto CSIC
Pluviógrafo	RainWise	Existente al inicio del Proyecto
Limnígrafo – Vertedero cauce aguas abajo	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Limnígrafo – Vertedero cauce aguas arriba	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Toma-muestras de agua automático	ISCO / Teledyne 6712	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Trampa para sedimentos	Desarrollado en IMFIA	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Logger precipitación directa	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto
Logger precipitación fustal	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto
Sensores de humedad – Parcela “Redistribución”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “Cuenca Alta”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “Margen Sur - Fila”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “Margen Sur - Entrefila”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Piezómetro - Bajo	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro - Medio	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro - Alto	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto

Cuadro I-2: Instrumental de medición en la microcuenca La Cantera

Equipo	Modelo	Observaciones
Pluviógrafo	RainWise	Existente al inicio del Proyecto
Limnógrafo – Vertedero cauce aguas abajo	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Sensores de humedad – Parcela “#8”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “#9”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Piezómetro - Bajo	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro - Medio	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro - Alto	Trutrack	Existente al inicio del Proyecto

Cuadro I-3: Instrumental de medición en las microcuencas La Nueva Esperanza

Equipo	Modelo	Observaciones
Estación Meteorológica	RainWise	Existente al inicio del Proyecto
Limnógrafo – Vertedero cauce cuenca forestal	OTT / Orpheus Mini	Existente al inicio del Proyecto
Limnógrafo – Vertedero cauce cuenca pasturas	OTT / Orpheus Mini	Existente al inicio del Proyecto
Toma-muestras de agua automático – cuenca forestal	ISCO / Teledyne 6712	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “#1”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “#2”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Sensores de humedad – Parcela “#3”	Decagon PH5	Incorporado en el marco del Proyecto ANII Alianzas
Piezómetro – Pozo #1	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro – Pozo #2	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto (Retirado en Marzo 2014)
Piezómetro – Pozo #3	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto
Piezómetro – Pozo #4	OTT / Thalimedes	Existente al inicio del Proyecto

ANEXO II: Información monitoreada en las microcuencas

Cuadro II-1: Datos mensuales de precipitación y caudal, expresados en mm, registrados en las microcuencas Don Tomás y La Cantera.

Año	Mes	Don Tomás		La Cantera	
		Prec (mm)	Esc (mm)	Prec (mm)	Esc sin flujo base (mm)
2006	jun-06	113	33,2	107	54,8
2006	jul-06	45	15,2	44	0,9
2006	ago-06	44	7,6	32	19,8
2006	sep-06	47	6,8	52	14,3
2006	oct-06	170	11,0	191	19,2
2006	nov-06	109	12,3	108	11,0
2006	dic-06	303	28,2	297	37,3
2007	ene-07	48	8,5	47	7,6
2007	feb-07	175	0,8	157	14,3
2007	mar-07	317	81,5	300	157,4
2007	abr-07	101	66,1	105	96,6
2007	may-07	98	72,8	98	102,2
2007	jun-07	38	25,4	36	50,5
2007	jul-07	19	13,9	12	30,8
2007	ago-07	60	11,2	55	29,7
2007	sep-07	106	23,8	103	59,4
2007	oct-07	184	55,2	184	97,4
2007	nov-07	64	15,9	73	27,8
2007	dic-07	65	4,0	64	10,1
2008	ene-08	97	0,0	95	3,9
2008	feb-08	152	0,1	140	6,2
2008	mar-08	52	0,0	59	7,2
2008	abr-08	50	0,0	49	7,2
2008	may-08	55	0,0	54	6,9
2008	jun-08	35	0,0	35	8,6
2008	jul-08	77	0,0	76	18,4
2008	ago-08	86	3,6	98	43,1
2008	sep-08	22	0,0	3	16,0
2008	oct-08	70	0,0	105	33,1
2008	nov-08	30	0,0	29	4,8
2008	dic-08	20	0,0	20	1,5
2009	ene-09	158	0,0	155	3,2
2009	feb-09	111	0,0	109	12,5
2009	mar-09	128	7,7	125	48,1
2009	abr-09	17	0,0	18	8,7
2009	may-09	48	0,0	50	9,0
2009	jun-09	22	0,0	21	8,8
2009	jul-09	40	0,0	40	10,2

2009	ago-09	68	0,0	66	9,1
2009	sep-09	81	0,0	79	17,8
2009	oct-09	81	0,0	80	13,6
2009	nov-09	489	81,1	479	232,0
2009	dic-09	304	95,6	278	121,1
2010	ene-10	262	59,4	238	103,5
2010	feb-10	704	248,8	690	306,8
2010	mar-10	127	35,7	124	52,0
2010	abr-10	44	5,2	43	15,4
2010	may-10	103	26,9	101	41,5
2010	jun-10	76	17,1	75	29,7
2010	jul-10	124	34,9	120	50,3
2010	ago-10	91	22,5	83	33,7
2010	sep-10	119	32,8	107	44,4
2010	oct-10	101	22,8	90	36,6
2010	nov-10	51	10,6	40	13,9
2010	dic-10	56	0,0	77	0,1
2011	ene-11	43	0,0	56	4,5
2011	feb-11	134	0,0	62	14,2
2011	mar-11	52	0,0	51	5,6
2011	abr-11	169	1,8	166	3,3
2011	may-11	138	33,5	136	51,6
2011	jun-11	112	42,2	110	38,4
2011	jul-11	143	84,8	140	58,0
2011	ago-11	182	139,8	180	142,8
2011	sep-11	48	22,5	52	48,5
2011	oct-11	162	75,9	193	83,1
2011	nov-11	84	16,5	17	3,5
2011	dic-11	35	1,2	34	14,2
2012	ene-12	61	0,0	63	14,8
2012	feb-12	247	105,6	255	124,6
2012	mar-12	96	46,0	98	50,2
2012	abr-12	75	17,4	91	38,0
2012	may-12	74	17,2	100	51,1
2012	jun-12	17	9,1	28	34,7
2012	jul-12	8	3,5	10	29,6
2012	ago-12	271	125,1	319	173,4
2012	sep-12	150	105,8	152	98,2
2012	oct-12	369	329,4	390	243,2
2012	nov-12	44	33,6	39	24,6
2012	dic-12	426	200,5	422	192,5
2013	ene-13	68	17,1	35	28,7
2013	feb-13	196	22,1	136	57,5
2013	mar-13	228	91,3	230	99,8

2013	abr-13	94	18,9	92	29,5
2013	may-13	110	86,9	108	114,1
2013	jun-13	4	25,3	4	36,3
2013	jul-13	93	46,5	91	45,9
2013	ago-13	29	14,2	28	21,3
2013	sep-13	130	21,7	123	45,0
2013	oct-13	116	13,6	103	25,6
2013	nov-13	246	80,0	186	112,3
2013	dic-13	61	33,8	60	27,0
2014	ene-14	189	1,3	185	28,7
2014	feb-14	168	21,0	165	70,3
2014	mar-14	101	7,1	99	72,9

Relleno en base a la relación de área entre el cierre aguas arriba y el cierre de la microcuenca

Relleno en base a la correlación entre precipitación y caudal

Cuadro II-2: Datos mensuales de precipitación y caudal, expresados en mm, registrados en las microcuencas La Nueva Esperanza (pasturas-forestal).

Año	Mes	Pasturas (LNEP)		Forestal (LNEF)
		Prec (mm)	Esc (mm)	Esc (mm)
2008	ene-08	75,0	1,5	6,7
2008	feb-08	113,3	5,9	7,7
2008	mar-08	45,5	0,5	4,4
2008	abr-08	28,9	0,0	2,0
2008	may-08	62,2	0,1	4,1
2008	jun-08	29,5	0,1	2,3
2008	jul-08	106,2	25,5	35,2
2008	ago-08	117,4	22,2	66,1
2008	sep-08	32,2	0,2	6,4
2008	oct-08	68,5	1,4	4,1
2008	nov-08	49,3	0,0	1,1
2008	dic-08	19,5	0,0	1,2
2009	ene-09	136,8	2,6	3,7
2009	feb-09	128,2	29,7	30,8
2009	mar-09	165,5	67,7	74,2
2009	abr-09	20,6	0,1	3,0
2009	may-09	94,8	1,3	4,2
2009	jun-09	35,5	3,4	11,4
2009	jul-09	46,9	13,5	20,3
2009	ago-09	75,4	21,3	29,0
2009	sep-09	64,8	15,9	23,7

2009	oct-09	72,0	19,6	26,7
2009	nov-09	308,1	193,2	200,3
2009	dic-09	289,8	209,2	149,7
2010	ene-10	87,5	34,8	31,1
2010	feb-10	292,6	69,1	76,7
2010	mar-10	117,9	56,0	54,5
2010	abr-10	35,5	2,3	7,9
2010	may-10	88,7	26,4	34,8
2010	jun-10	57,7	22,8	28,2
2010	jul-10	94,5	52,2	61,1
2010	ago-10	53,7	28,6	37,7
2010	sep-10	88,1	38,4	51,7
2010	oct-10	36,8	0,9	6,6
2010	nov-10	52,7	2,8	4,7
2010	dic-10	76,6	2,8	7,4
2011	ene-11	47,1	0,0	10,4
2011	feb-11	159,7	14,3	15,1
2011	mar-11	25,8	0,0	13,0
2011	abr-11	99,4	8,4	19,1
2011	may-11	103,1	73,6	89,2
2011	jun-11	90,4	51,6	57,3
2011	jul-11	121,9	89,9	81,0
2011	ago-11	150,9	96,9	71,2
2011	sep-11	31,7	1,5	3,8
2011	oct-11	143,6	64,0	59,4
2011	nov-11	81,5	5,6	5,3
2011	dic-11	38,9	0,0	5,9
2012	ene-12	43,4	0,0	3,2
2012	feb-12	288,4	72,0	81,8
2012	mar-12	60,5	18,0	16,2
2012	abr-12	82,0	50,9	12,0
2012	may-12	87,0	7,1	7,0
2012	jun-12	46,1	32,5	14,1
2012	jul-12	35,4	4,2	0,0
2012	ago-12	221,7	134,1	26,6
2012	sep-12	122,7	43,1	9,4
2012	oct-12	265,5	188,3	66,5
2012	nov-12	28,4	1,9	10,5
2012	dic-12	247,7	53,3	94,9
2013	ene-13	32,9	2,0	9,4
2013	feb-13	113,8	2,2	41,6
2013	mar-13	153,7	84,0	57,5
2013	abr-13	65,8	15,7	22,5
2013	may-13	159,8	170,5	59,9

2013	jun-13	1,2	6,9	10,0
2013	jul-13	52,5	11,9	12,9
2013	ago-13	50,9	14,1	12,9
2013	sep-13	149,2	94,1	62,5
2013	oct-13	54,5	8,6	10,0
2013	nov-13	114,7	71,2	35,0
2013	dic-13	17,0	10,4	8,4
2014	ene-14	197,7	29,8	18,4
2014	feb-14	107,2	69,2	50,8
2014	mar-14	0,0	0,0	0,0

Relleno en base a la correlación entre pluviógrafos (La Cantera - La Nueva Esperanza)

Relleno en base a la correlación entre precipitación y caudal

ANEXO III: Salidas de campo 08/2012 – 12/2014

ANEXO IV: Tablas de datos de sedimento y agua

Cuadro IV-1: Tablas de datos físico-químicos del sedimento (julio 2013)

Arroyo		Tratamiento	Transecta	% MO	humedad	pH
A1	Don Tomás	F	1	12,95938	7	6.9
A1		F	1	5,186972	7.5	6.8
A1		F	1	1,942857	8	6.5
A1		F	2	3,841808	8.5	7
A1		F	1	2,200489	7	6.8
A1		F	2	4	9.5	6.8
A1		F	1	6,013363	9	6.8
A1		F	2	9,101251	8	6.9
A1		F	1	6,079404	10	6.5
A1		F	2	8,687891	8	6.5
A2	Capilla Vieja	NF	1	5,642257	10	6.5
A2		NF	2	19,21182	9	7
A2		NF	1	5,226481	9	6.5
A2		NF	2	8,104887	9	6.9
A2		NF	3	12,62626	9.5	6
A2		NF	1	6,544755	9.5	6.8
A2		NF	2	16,29956	9.2	7.5
A2		NF	1	13,0809	9	7.5
A2		NF	2	11,47309	9	6.8
A2		NF	1	8,787011	8	7
A3	LaNuevaesperanza	F	1	17,5	8.5	8
A3		F	2	15,82278	9	7
A3		F	3	16,41286	9	8.5
A3		F	1	6,033376	8.5	8
A3		F	2	13,79801	8	8
A3		F	3	20,5036	8	8
A3		F	1	9,090909	8	6.5
A3		F	2	15,99297	9	8
A3		F	3	22,46521	8	7.5
A3		F	1	9,305761	8	7
A4	LaNuevaesperanza	NF	2	26,89592	8	7.5
A4		NF	3	12,18349	9	7
A4		NF	1	13,5009	9	7
A4		NF	2	20,70297	9	7.5
A4		NF	3	7,01953	9	8
A4		NF	1	12,55016	7.5	7
A4		NF	2	16,46804	9	6.5
A4		NF	3	8,234271	9	6.9
A4		NF	1	23,63545	8	6.6

Cuadro IV-2: Tablas de datos físico-químicos del agua

fecha-evento	arroyo	NH ₄ ug/l	NO ₃ ug/l	NO ₂ ug/l	NTD ug/l	NTug/l	PO ₄ ug/l	PTD ug/l	PTug/l	Alcal mg CaCO ₃ /l	Cond uS/cm	pH	STS mg/l
7/4/2013	Don Tomas					312.2			24.6	90	119	8.01	70.8
6/6/2013	Don Tomas					880.6			94.0	84	94	8.39	105.6
7/1/2013	Don Tomas	2.8	87.5	3.8	227.0	255.4	ind	21.5	35.7	140	180	6.94	126.7
7/1/2013	Don Tomas	3.6	60.1	5.1	227.0	444.8	ind	24.6	56.2	136	181	6.94	209.3
7/1/2013	Don Tomas	3.6	156.1	6.4	227.0	293.3	1.1	23.0	49.8	126	176	6.98	273.3
11/14/2013	Don Tomás	6.3	108.1	indetec	312.2	397.5	2.7	45.1	76.6	130	175	6.77	144.6
11/14/2013	Don Tomás	14.2	80.7	5.1	283.8	369.1	ind	32.5	81.4	130	177	6.77	103.3
11/14/2013	Don Tomás	4.5	94.4	indetec	274.3	350.1	ind	53.0	78.2	126	170	6.31	168.3
11/15/2013 10:11	Don Tomas	25.7	334.4	55.0	549.0	605.9	4.3	42.0	62.5	130	172	7.07	60.0
11/15/2013 11:01	Don Tomas	28.4	389.2	55.0	549.0	586.9	1.1	38.8	49.8	100	140	7.45	80.8
11/15/2013 11:51	Don Tomas	26.6	306.9	55.0	530.1	624.8	20.3	43.5	71.9	106	143	7.7	80.0
11/15/2013 12:41	Don Tomas	20.4	94.4	74.2	539.6	615.3	2.7	40.4	89.3	94	140	6.31	45.8
11/15/2013 13:31	Don Tomas	29.2	560.6	58.9	691.1	785.9	4.3	35.7	51.4	90	129	6.6	106.7
11/15/2013 15:11	Don Tomas	23.9	279.5	78.1	454.3	729.0	12.3	42.0	60.9	104	140	7.27	82.5
11/15/2013 16:01	Don Tomas	11.6	574.3	71.7	672.2	738.5	2.7	45.1	57.7	90	130	6.54	93.6
11/15/2013 16:51	Don Tomas	21.3	375.5	78.1	530.1	662.7	15.5	37.2	71.9	116	150	7.6	78.3
11/15/2013 17:41	Don Tomas	19.5	279.5	85.7	501.7	568.0	9.1	43.5	70.3	80	125	7.37	116.7
11/15/2013 19:21	Don Tomas	22.2	279.5	74.2	501.7	605.9	7.5	49.8	65.6	100	144	7.46	113.3
11/15/2013 21:00	Don Tomas	17.8	306.9	78.1	473.3	624.8	7.5	45.1	78.2	126	174	7.72	82.5
11/15/2013 22:40	Don Tomas	8.9	94.4	69.1	596.4	785.9	indetec	54.6	76.6	120	168	6.74	32.5
11/16/2013 0:20	Don Tomas	12.5	341.2	65.3	473.3	558.5	indetec	30.9	59.3	108	157	6.74	41.1
11/16/2013 2:00	Don Tomas	1.9	546.9	56.3	624.8	691.1	4.3	49.8	60.9	110	168	6.91	55.6
11/16/2013 3:40	Don Tomas	4.5	210.9	79.3	501.7	558.5	7.5	40.4	68.8	156	222	7.4	87.5
11/16/2013 7:00	Don Tomas	7.2	313.8	78.1	406.9	530.1	2.7	37.2	71.9	132	184	6.98	81.1
11/16/2013 10:20	Don Tomas	7.2	101.2	78.1	530.1	558.5	1.1	32.5	67.2	176	235	7.37	102.5
11/16/2013 13:40	Don Tomas	13.4	313.8	69.1	406.9	482.7	12.3	27.8	71.9	142	194	6.99	118.9
11/16/2013 15:20	Don Tomas	0.1	224.6	44.8	530.1	634.3	indetec	34.1	54.6	176	235	7.33	133.8

11/16/2013 18:40	Don Tomas	31.9	128.7	60.1	511.1	624.8	indetec	23.0	59.3	184	237	7.22	124.0
3/28/2014	Don Tomas	6.3	416.6	57.6	501.7	691.1	1.1	29.4	86.1	150	207	6.92	17.8
3/28/2014	Don Tomas	5.4	indetec	56.3	321.7	397.5	indetec	24.6	62.5	136	179	6.72	28.0
3/28/2014	Don Tomas	8.1	5.2	75.5	331.2	454.3	indetec	42.0	57.7	130	185	6.69	91.3
7/1/2013	Capilla vieja	4.5	156.1	3.8	435.4	473.3	5.9	71.9	92.4	124	178	6.88	12.1
7/1/2013	Capilla vieja	5.4	156.1	2.6	293.3	321.7	4.3	65.6	84.5	140	186	6.92	70.6
7/1/2013	Capilla vieja	5.4	128.7	indetec	359.6	388.0	4.3	70.3	90.8	108	152	6.37	137.5
11/14/2013	capilla vieja	8.1	162.9	2.6	179.6	236.4	4.3	64.0	78.2	108	145	6.36	133.3
11/14/2013	capilla vieja	12.5	217.8	7.7	264.9	359.6	2.7	60.9	76.6	116	161	6.41	62.5
11/14/2013	capilla vieja	12.5	204.1	11.5	520.6	643.8	2.7	49.8	71.9	132	194	6.82	13.2
3/28/2014	capilla vieja	8.1	5.2	3.8	321.7	397.5	2.7	24.6	38.8	140	185	6.92	7.6
3/28/2014	capilla vieja	9.8	19.0	2.6	293.3	586.9	2.7	32.5	37.2	140	186	7	40.6
7/2/2013	LNE forestal	56.6	114.9	2.6	359.6	416.4	17.1	64.0	95.6	120	154	7.23	95.8
7/2/2013	LNE forestal	8.1	142.4	2.6	227.0	463.8	29.9	78.2	103.4	110	167	7.31	43.3
7/2/2013	LNE forestal	1.9	101.2	9.0	369.1	615.3	28.3	37.2	46.7	84	114	7.69	28.2
11/14/2013	LNE forestal	36.3	327.5	7.7	425.9	549.0	4.3	10.4	26.2	112	155	6.49	37.5
11/14/2013	LNE forestal	39.8	135.5	3.8	454.3	568.0	4.3	13.6	42.0	102	138	6.48	21.7
3/28/2014	LNE forestal	25.7	128.7	2.6	298.0	312.2	1.1	11.2	43.5	124	180	7.21	45.5
3/28/2014	LNE forestal	49.5	114.9	indetec	325.0	473.3	1.1	10.6	46.7	126	181	7.17	43.5
3/28/2014	LNE forestal	41.6	156.1	3.8	210.0	236.4	1.1	14.0	46.7	120	170	7.58	64.5
7/2/2013	LNE pastura	17.8	183.5	indetec	359.6	530.1	indetec	26.2	35.7	100	140	7.65	34.2
7/2/2013	LNE pastura	263.2	73.8	2.6	681.7	3495.0	9.1	62.5	937.4	100	101	7.9	462.5
7/2/2013	LNE pastura	20.4	87.5	6.4	359.6	586.9	1.1	54.6	209.1	100	135	6.87	
11/14/2013	LNE pastura	10.7	94.4	indetec	605.9	757.4	indetec	35.7	54.6	70	99	6.71	5.0
11/14/2013	LNE pastura	43.4	66.9	6.2	729.0	975.3	5.9	34.1	49.8	86	134	6.58	17.5
11/14/2013	LNE pastura	20.4	313.8	3.8	842.7	1051.1	5.9	43.5	56.2	100	137	6.69	15.0
3/28/2014	LNE pastura	1.0	334.4	5.1	435.4	643.8	5.9	26.2	60.9	60	88	7.21	19.5
3/28/2014	LNE pastura	10.7	169.8	7.7	406.9	435.4	4.3	23.0	60.9	66	96	7.27	25.5
3/28/2014	LNE pastura	5.4	101.2	5.1	549.0	880.6	2.7	26.2	51.4	50	84	7.15	30.0

ANEXO V: Publicaciones en el marco de los proyectos desarrollados en esta línea de investigación

Capítulos de libros

Silveira, L.; Chreties, C.; Alonso, J.; Amorín, C.; De Izaguirre, P.; Crisci, M.; Symonds, S.; Martínez, L.; García Petillo; García Prechac, F.; Delgado, S.; Clérici, C.; Bentancor, L.; Hill, M.; Alliaume, F.; Iroumé, A.; Huber, A.; Cabral, P.; Audicio, P. 2011. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, Serie Técnica FPTA Nº32. ISBN: 978-9974-38-331-9. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo.

Silveira, L., Alonso, J.; Martínez, L., Chreties, C., de Izaguirre, P. (2009) Balance hídrico en dos microcuencas sometidas a distinto manejo (Forestación-Pasturas) en la zona litoral de Uruguay. Publicado en “Los recursos hídricos en la región del MERCOSUR: estudios de caso”. Publicación del Comité Académico Aguas de AUGM, impreso por la editorial de UNESP, San Pablo, Brasil.

Silveira, L., Martínez, L., Alonso, J. 2004. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los escurrimientos ocasionados por tormentas en el Uruguay. Artículo publicado en el libro “EVALUACIÓN DE PARÁMETROS Y PROCESOS HIDROLÓGICOS EN SUELOS. Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos”. CAZALAC – UNESCO.

Revistas internacionales

Silveira, L., Alonso, J. (2009) Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes*, Vol. 23, 320-329. Editorial John Wiley. Publicado Online: 31/10/2008 en Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.7156.

Revistas nacionales

Alonso, J., Audicio, P., Martínez, L., Scavone, M., Rezzano, E. (2012). Comparison of measured ¹³⁷Cs data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates. *Agrociencia, Special Issue*, 261-267. ISSN 15100839.

Silveira, L. Alonso, J., Martínez, L. (2006) Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia*, Vol. X Nº 2, 75-93.

Congresos regionales.

Alonso, J.; Silveira, L. Estimation of the water evaporation intercepted by an adult plantation of *Eucalyptus globulus* in Uruguay. Presentado en el 3rd InterRegional Conference on Land and Water Challenges “Tools for development” – Colonia, Uruguay. Septiembre 2015

Alonso, J.; Audicio, P.; Martínez, L.; Scavone, M; Rezzano, E. Comparison of measured Cs-137 data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates. 19th ISTRO Conference. Montevideo, 2012.

Scavone, M., Audicio, P., Martínez, L., Alonso, J., (2011). El Cs-137 como indicador de erosión hídrica de suelos en el Uruguay. XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores de la AUGM, Universidad Nacional del Este, Ciudad del Este, Paraguay. 2011.

- Bentancor, L., Silveira, L. (2010) Desarrollo y/o validación de metodologías para determinar el tiempo de concentración en dos microcuencas del Uruguay. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Alonso, J., Silveira, L., Martínez, L., Crisci, M., Symonds, S. (2010) Incorporación del IAF en modelos de redistribución de precipitación. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Martínez, L., Silveira, L., Alonso, J., Crisci, M., Symonds, S. (2010) Aplicación de un modelo simple para determinar la variación en el consumo de agua al modificar la cubierta vegetal. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Silveira, L., Crisci, M., Alonso, J., Martínez, L., Symonds, S., Chreties, C. (2010a) Comparación del balance hídrico en dos microcuencas (pasturas-plantación de Eucalyptus) del Uruguay. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Silveira, L., Schipilov, A., Crisci, M., Alonso, J., Martínez, L., Symonds, S., Chreties, C. (2010b) Recuperación de acuíferos en dos microcuencas (pasturas-plantación de Eucalyptus) del Uruguay. Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Amorín, C., Silveira, L. (2008) Sustitución de pasturas por plantaciones de Eucalyptus y sus efectos sobre la calidad de las aguas. Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia.
- Alonso, J., Silveira, L. (2008) Modelación del cambio de uso del suelo en Uruguay: Aplicación del modelo Shetran. Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia.
- Silveira, L., de Izaguirre, P., Visca, M. (2008) Redistribución de la precipitación incidente en una plantación de Eucalyptus en Uruguay. Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia.
- De Izaguirre, P; Alonso, J. Redistribución de precipitaciones en un monte de eucaliptos. XIV Jornadas de Investigadores Jóvenes de la AUGM, Campinas, Sao Paulo, Brasil. 2006.
- Silveira, L; Alonso, J; Martinez, L. Efecto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos. Comparación de estudios en microcuencas y macrocuencas del Uruguay. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pedro, Brasil. 2004.
- Silveira, L; Alonso. Modificación de los coeficientes de escorrentía producto del desarrollo forestal en una macrocuenca del Uruguay. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pedro, Brasil. 2004.