

**Magíster Scientiae en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas  
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales  
Universidad Nacional de La Plata**

Proyecto de Tesis

**INCIDENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL  
SOBRE LA DINÁMICA DEL AGUA EN LA CUENCA ALTA  
DEL ARROYO EL PESCADO, PARTIDO DE LA PLATA**

***Autor: Ing. Ftal. Besteiro Sebastián I.***

***Director: Dra. Fernanda J. Gaspari.***

***Co Director: Dr. Eduardo E. Kruse.***

***La Plata, fines de Junio de 2010.***

## INDICE

<b>I. PROLOGO.</b>	1
<b>II. RESUMEN.</b>	3
<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	5
<b>2. MARCO CONCEPTUAL.</b>	7
<b>2.1. CICLO HIDROLOGICO.</b>	8
<b>2.1.1. Ecuación de Balance Hidrológico.</b>	10
<u>2.1.1.1. Precipitación.</u>	11
<u>2.1.1.2. Evapotranspiración.</u>	12
<u>2.1.1.3. Escurrimiento.</u>	13
<u>2.1.1.4. Infiltración.</u>	14
<u>2.1.1.5. Intercepción.</u>	16
<b>2.2. EMISIÓN DE SEDIMENTOS.</b>	16
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.</b>	18
<b>3.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO.</b>	18
<b>3.2. OBJETIVOS GENERALES.</b>	18
<b>3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.</b>	18
<b>4. ANTECEDENTES.</b>	19
<b>4.1. INCIDENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL.</b>	19
<b>4.2. DINAMICA DEL AGUA EN CUENCAS DE LLANURA.</b>	20
<b>4.3. EXCESOS HIDRICOS.</b>	20
<b>5. CARACTERIZACION REGIONAL DEL AREA DE ESTUDIO.</b>	22
<b>6. MATERIALES Y METODOS.</b>	26
<b>6.1. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.</b>	26
<b>6.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.</b>	26
<b>6.3. GENERACIÓN DE UN MODELO CARTOGRÁFICO.</b>	30
<b>6.4. MEDICIONES DE LA SITUACIÓN HÍDRICA.</b>	31
<b>6.4.1. Precipitación.</b>	32
<b>6.4.2. Evapotranspiración.</b>	34
<b>6.4.3. Escurrimiento.</b>	35
<b>6.4.4. Infiltración.</b>	40
<b>6.4.5. Intercepción.</b>	43
<b>6.5. APLICACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS Y         PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN</b>	46
<b>6.5.1. Simulador de lluvias.</b>	46
<b>6.5.2. Perfiles del suelo.</b>	49
<b>6.5.3. Emisión de sedimentos.</b>	50

6.6. ANÁLISIS DE PROCESOS HIDROLÓGICOS Y MODELO CONCEPTUAL DE EFECTOS DE LA MASA FORESTAL.	53
6.7. CRITERIOS DE MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.	53
7. RESULTADOS.	54
7.1. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.	54
7.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	55
7.2.1. Localización Geográfica de la MALP.	55
7.2.2. Estancia El Centauro.	56
7.2.3. Morfometría de la MALP.	58
<u>7.2.3.1. Forma de la cuenca.</u>	58
<u>7.2.3.2. Relieve de la cuenca.</u>	59
<u>7.2.3.2. Red de drenaje.</u>	61
7.2.4. Suelos.	62
7.2.5. Hidrografía.	64
7.2.6. Vegetación.	65
<u>7.2.6.1. Forestación.</u>	66
<u>7.2.6.2. Pastizal modificado.</u>	69
<u>7.2.6.3. Cultivos.</u>	70
7.3. GENERACIÓN DE UN MODELO CARTOGRÁFICO.	72
7.4. MEDICIONES DE LA SITUACIÓN HÍDRICA.	74
7.4.1. Precipitación.	74
7.4.2. Evapotranspiración.	76
7.4.3. Escurrimiento.	80
7.4.4. Infiltración.	84
7.4.5. Intercepción.	90
7.5. APLICACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.	94
7.5.1. Simulador de llluvias.	94
7.5.2. Perfiles del suelo.	95
7.5.3. Emisión de sedimentos.	96
7.6. ANÁLISIS DE PROCESOS HIDROLÓGICOS Y MODELO CONCEPTUAL DE EFECTOS DE LA MASA FORESTAL.	99
7.7. CRITERIOS DE MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.	102
8. CONCLUSIONES.	104
9. AGRADECIMIENTOS.	105
10. BIBLIOGRAFIA.	106
11. ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRAFICOS.	112
12. GLOSARIO DE TERMINOS.	116

## **I. PROLOGO.**

Los ambientes llanos como los de la llanura pampeana se caracterizan por poseer cuencas de gran tamaño, escasas pendientes, capas subterráneas de agua muy superficiales, en ocasiones aflorantes. Estas características se constituyen en un ambiente afectado por largos períodos de sequías seguidos de inundaciones con severas consecuencias en la producción pecuaria.

Los procesos erosivos se encuentran relegados, en gran medida, a los cambios de uso del suelo y actividades productivas donde el efecto de las forestaciones no es tan evidente. Esto último se relaciona con el hecho de que las forestaciones extensas son escasas o prácticamente inexistentes en estos ambientes, lo cual resalta la necesidad de realizar estudios de carácter local o puntual que impulsen la actividad forestal como una nueva actividad productiva, complementaria a la actual y que es reconocida a nivel mundial como la más efectiva para palear procesos de erosión hídrica, tan comunes en la llanura pampeana.

La presente tesis representa un avance en el estudio de los efectos de las forestaciones en ambientes llanos en lo que respecta a la economía del agua tanto a nivel superficial como subterráneo y la interacción entre ambos ambientes. Su realización conforma una exigencia propia de la carrera de Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF) de la UNLP, y refleja un intenso trabajo materializado en más de 20 meses de tomas de datos semanales en condiciones naturales y sobre forestaciones de pino y eucaliptos en una cuenca típica de llanura. Con el fin de lograr una acabada caracterización y reconstrucción del comportamiento hidrológico de las forestaciones en estos ambientes, se consideraron variables tales como precipitación directa, precipitación interna, intercepción, flujo caulinar, escurrimiento e infiltración. La extrapolación de esta actividad a otras áreas, donde la actividad forestal se encuentra escasamente desarrollada, permitirá ahondar en nuevas estrategias de manejo tendientes a contrarrestar largos procesos erosivos que impiden o merman la actividad productiva tradicional.

El compromiso del autor es impulsar mediante trabajos de esta índole, nuevos conocimientos para el desarrollo de programas conservacionistas de control y ordenamiento de cuencas no típicas, donde coexisten un sinnúmero de factores cuyo control requiere el manejo de suelos, vegetación y aguas, y donde aún hoy, el conocimiento de ellos es una realidad remota.

## II. RESUMEN.

Desde el siglo XIX se ha resaltado la importancia de incluir forestaciones en la llanura pampeana, atribuyéndoles cualidades únicas para modificar la dinámica hídrica de estos ambientes al punto de ser consideradas verdaderas herramientas correctoras de los procesos naturales que degradan el ambiente. En este sentido actúan como reguladoras de los problemas ocasionados por las secas e inundaciones a través de su incidencia en la carga y descarga de napas, control del escurrimiento hacia los arroyos, elevado consumo de agua y alto poder evapotranspirante, entre otras cualidades. A lo largo del tiempo los investigadores han tratado de dilucidar estas características, siendo incipiente el estado de conocimiento al respecto. La cuenca alta del Arroyo El Pescado pertenece a la denominada subregión húmeda pampeana catalogada como una de las tierras más aptas del país para la actividad agropecuaria, sin embargo constituye un área de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, de déficit o de excedentes hídricos. La vegetación nativa se encuentra constituida por praderas, sobre las cuales se desarrollan actividades agrícola-ganaderas, y áreas con especies forestales restringidas en extensión. En este contexto, surge la necesidad de ahondar en medidas de restauración hidrológica y, particularmente, de encarar estudios de los efectos de las forestaciones en el ciclo hidrológico de zonas llanas, como una alternativa viable de rehabilitación a largo plazo. Bajo la hipótesis de que un sector forestado de una cuenca de drenaje conduce a modificaciones significativas en el régimen hidrológico natural, que se traduce en un aumento de la evapotranspiración, infiltración y una reducción del escurrimiento superficial, se plantea el objetivo general de evaluar el efecto que genera una masa forestal en las variables del ciclo hidrológico, así como sus consecuencias y aplicabilidad en el manejo de la cuenca alta del Arroyo El Pescado. Para el cumplimiento del objetivo general se fijaron los siguientes objetivos específicos: cuantificar las variables más importantes del ciclo hidrológico; analizar comparativamente las modificaciones del ciclo hidrológico en plantaciones forestales con respecto a los componentes hidrológicos de un ecosistema natural; estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca; comparar los resultados de pérdida de suelo medidas a campo con estimaciones realizadas a través de modelos matemáticos y generar propuestas de manejo para la conservación del recurso hídrico

del área de estudio con vistas a extrapolar estas experiencias a otras zonas de características similares. El plan de trabajo se ha estructurado en 5 actividades generales tendientes a responder los objetivos planteados: 1- Recopilación de antecedentes y generación de base de datos SIG; 2- Selección y caracterización de áreas de estudio mediante parcelas experimentales; 3- Mediciones de la situación hídrica de forma directa e indirecta (ecuación de balance hidrológico, modelos hidrológicos); 4- Conformación de un modelo conceptual de efectos de la masa forestal en la dinámica hídrica de la microcuenca del Arroyo La Paloma, y 5- Formulación de pautas de manejo de los recursos hídricos. Los resultados obtenidos indican que las forestaciones actúan principalmente aumentando la intercepción del agua de lluvia y disminuyendo la lámina de escurrimiento, resultando secundarios o de menor magnitud los efectos sobre los componentes de Infiltración y evapotranspiración. La forestación de Pino, con un 53.5% de cobertura del suelo y un manto de acículas de 13 cm, tiende a disminuir la lámina de agua infiltrada y los valores de evapotranspiración real, mientras que la forestación de Eucalipto, con un 36.7% de cobertura y desarrollo de vegetación herbácea, tiende a aumentarlos. La metodología implementada permitió cuantificar las variables del ciclo hidrológico. El análisis comparativo de las mismas indicó que la presencia de masas forestales promueven un aumento de los flujos verticales de agua en el suelo a través de un retardo por intercepción en el follaje, un aumento en la porosidad del suelo por acumulación de material orgánico y exploración de los sistemas radicales y un retardo del escurrimiento superficial por la acción de trabado del material vegetal en descomposición y los fustes en pie. También producen un aumento considerable en el volumen de agua evapotranspirada en períodos de excesos hídricos, atenúan el efecto degradativo de las lluvias intensas por impacto de gotas y aumento del escurrimiento y propician la acumulación de agua en condiciones de déficit hídricos por condensación de la humedad del aire y lluvia horizontal. Los valores de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la MALP resultaron ser muy pequeños y por lo tanto insignificantes.

# INCIDENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL SOBRE LA DINÁMICA DEL AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL ARROYO EL PESCADO, PARTIDO DE LA PLATA

## 1. INTRODUCCIÓN.

En el ámbito de la llanura pampeana, donde las pendientes son suaves, inferiores al 0,1 %, y los flujos hídricos predominantemente verticales, se reconoce una estrecha relación entre las aguas superficiales y subterráneas (Jobbágy *et al.*, 2008; Rojo *et al.*, 2008). La vegetación nativa no es estrictamente forestal sino más bien de pradera y predomina la actividad agrícola ganadera (Viglizzo *et al.*, 2006).

Las tierras de la *subregión húmeda pampeana*<sup>1</sup>, debido a sus condiciones ecológicas e hidrológicas, son las más aptas del país, y se considera que están entre las mejores del mundo para el cultivo de granos y forrajeras. Tal es así, que esta zona concentra alrededor del 50% del total cultivado con granos, el 50% de forrajeras y el 50% del número total de vacunos en Argentina (Carlevari y Carlevari, 2007). Estas ventajas productivas, muchas veces se encuentran condicionadas por procesos degradativos resultantes de malos manejos productivos, incorrectas políticas nacionales y por el avance de la urbanización e industrialización a lo largo de los años.

Zimmermann (1990), por su parte, afirma que las llanuras son un escenario de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, de déficit o de excedentes hídricos. Además manifiesta, la incapacidad del relieve de evacuar volúmenes importantes de agua y la fragilidad que estas presentan a los cambios artificiales, planteando una situación extremadamente compleja que debe ser abordada con mucho cuidado.

En el siglo XIX, Ameghino (1884), sostenía que la utilización de forestaciones en la llanura pampeana contrarrestaba en parte los efectos desastrosos de las inundaciones, impidiendo que se efectuasen con demasiada rapidez.



Es en este contexto que surge la necesidad de ahondar en medidas de restauración hidrológica y, particularmente, de encarar estudios de los efectos de las forestaciones en el ciclo hidrológico de zonas llanas, como una de las alternativas más viables de rehabilitación a largo plazo. La función de protección de los bosques es ampliamente conocida alrededor del mundo y constituye unos de los fundamentos conservacionistas por excelencia (Gottle y Sène, 1997; Mármol, 2006).

La incorporación de una forestación donde antiguamente no existía, puede significar una mejora productiva, no solo por su utilidad como monte de reparo o su posible orientación hacia la producción maderera (diversificación de producción), sino también para el incremento de la calidad paisajística de zonas rurales degradadas y como una herramienta de remediación de zonas inundables que de otra manera serían improductivas.

Al analizar la situación hidrológica de una cuenca y su relación con una forestación se ingresa en el campo de una disciplina denominada *Hidrología Forestal*<sup>2</sup>, la cual considera que la presencia de masas forestales en el terreno de estudio, son un factor importante para el *Manejo de Cuencas Hidrográficas*<sup>3</sup> (Mármol, 2006).

En función del panorama planteado, se destaca que la presente tesis está orientada hacia el estudio del efecto de protección de las forestaciones frente a la dinámica hídrica, como así también, hacia el rendimiento hídrico de la cuenca y de la dinámica de los flujos superficiales y subsuperficiales que en ella se desarrollan.

## 2. MARCO CONCEPTUAL.

La cubierta y el suelo forestal influyen activamente sobre todos los procesos hidrológicos: *intercepción de la lluvia*<sup>4</sup>, *variación en la evapotranspiración*<sup>5</sup>, *retardo de la escorrentía*<sup>6</sup> (por deslizamiento en los troncos, mantillo vegetal que confiere mayor rugosidad al suelo, entre otros), y el *aumento de la infiltración*<sup>7</sup>, así como la potente acción de trabado sobre las partículas terrosas del suelo por las raíces. Los sucesivos estratos del bosque generan barreras que resisten la circulación del agua, asegurando que el agua de lluvia modificará su vía de escurrimiento hacia los cursos de agua o su infiltración hacia el subsuelo (Mármol, 2006).

Los suelos denominados como forestales, muchas veces son aquellos que no reúnen las condiciones necesarias para un desarrollo distinto, como puede ser la agricultura. Las mayores exigencias de una forestación están dadas por el contenido de agua en el suelo, siendo posible encontrar suelos ricos en minerales, pero improductivos por falta de agua, y suelos como arenas empobrecidas que sostienen una forestación gracias a su condición hídrica favorable (Pritchett, 1991).

El agua resulta esencial al momento de determinar que especie vegetal es apta para desarrollarse en un sitio. Asimismo, constituye el elemento primario para el funcionamiento de la mayor parte de los procesos del suelo y de la vegetación. En el suelo, es disolvente y medio de transporte para los nutrientes de las plantas, fuente de hidrógeno, moderador de la temperatura del suelo y de la aireación, así como un agente de disolución de sustancias tóxicas (Pritchett, 1991). Además, el agua es un constituyente fundamental de las plantas y participa de forma activa en los procesos metabólicos, afectando directa o indirectamente la mayoría de las funciones vegetales (Kramer, 1969).

La instalación y manejo de masas forestales en una cuenca hidrográfica, permite amortiguar problemas de inundación como así también déficit hídricos, disminuyendo la erosión del suelo por intercepción de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, mejorando la

estructura del suelo, la infiltración y acumulación de agua en el mismo (Ameghino, 1884; Pritchett, 1991; Mármol, 2006)

Esta función de protección de los bosques es irrefutable, constituyendo los principales argumentos de los conservacionistas. Sin embargo, por ser una cobertura de alto consumo hídrico, en los últimos tiempos se ha atendido a otro aspecto, la influencia sobre la cantidad de agua que fluye desde las cuencas forestales. Por tal razón la presencia de bosques en las cuencas hidrográficas tiene dos implicancias: a) la protección contra la erosión hídrica, las crecientes y las inundaciones; b) el rendimiento hídrico de la cuenca (Mármol, 2006).

## **2.1. CICLO HIDROLÓGICO.**

El concepto de Ciclo Hidrológico hace referencia a la circulación del agua en sus diversas formas y sistemas de almacenamiento a nivel mundial.

El agua en general y la subterránea en particular, componen un recurso limitado en nuestro planeta. Más del 97% del agua en el mundo es salada y se concentra en mares y océanos. Del resto, alrededor del 2% constituye los casquetes polares en forma de hielo; le sigue en magnitud el agua subterránea, cuya reserva hasta 1000 m de profundidad se estima en el 0.5% del total, mientras que el volumen instantáneo de agua superficial llega sólo al 2% y entre el agua del suelo y la atmosférica, componen algo más del 0.01% de la total ( $1383 \times 10^6 \text{ km}^3$ ) (Auge, 2006).

Al tratarse de un ciclo no se puede hablar de un comienzo o un final del mismo, de todas maneras, es habitual comenzar con la noción de que cuatro quintas partes de la superficie terrestre se encuentra cubierta por océanos y que gracias a la energía del sol, se produce en estos, grandes cantidades de vapor de agua que los vientos transportan hasta que se condensan en forma de nubes y precipitan como lluvia, nieve o granizo (Pereira, 1973). Pritchett (1991) considera que del total de agua evaporada de los océanos, solo el 25 % llega a los continentes.

Del agua que llega a los continentes, una parte cae directamente sobre los cauces de ríos y canales de drenaje que la llevan de regreso al mar, otra parte cae en el suelo, espejos de agua, ríos y vegetación para ser almacenada y eventualmente evaporada. Una proporción del agua que llega al suelo infiltra y es almacenada en él para ser consumida por las plantas o lo atraviesa abasteciendo manantiales. El agua aprovechada por las raíces de las plantas es transportada por estas y finalmente transpiradas a través del follaje y corteza. Una parte de la humedad evaporada del suelo, de las plantas y de las superficies del agua se condensa en la atmosfera cercana a la superficie terrestre en forma de rocío, pero la mayor parte vuelve a caer en forma de lluvia o nieve y regresar al mar (Pritchett, 1991).

En la Figura 1, se esquematiza el ciclo hidrológico con todos sus componentes y porcentajes relativos de agua en cada componente. Se toma como base 100 a la lluvia incidente en la superficie terrestre; la evaporación desde la superficie terrestre consume el 61% de esta precipitación y el restante 39% conforma la escorrentía hacia los océanos, principalmente como agua superficial. La evaporación desde los océanos constituye cerca del 90% de la humedad atmosférica. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global de agua da una visión de la dinámica del ciclo hidrológico (Chow *et al.*, 1994).

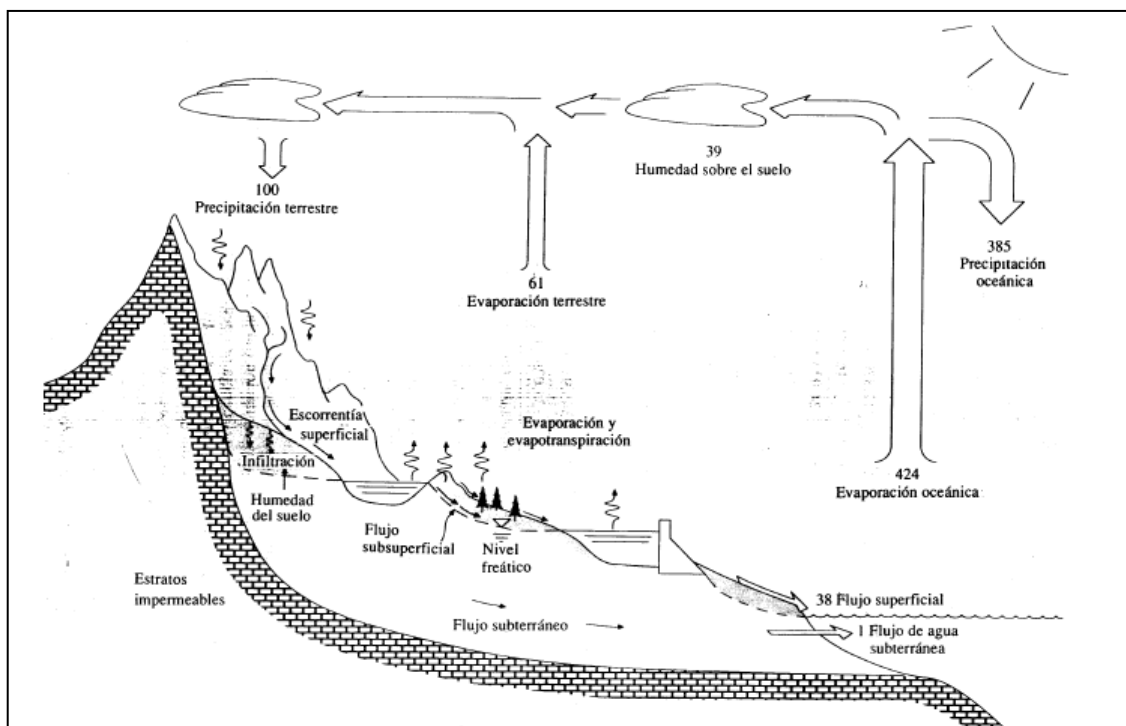


Figura 1. Esquema general del ciclo hidrológico según Chow *et al.* (1994).

El ciclo hidrológico es considerado un proceso continuo e irregular, tanto en el espacio como en el tiempo, en el que una partícula de agua que se evapora del océano regresa a él luego de haber pasado por los procesos de precipitación y escurrimiento superficial o subterráneo (Custodio y Llamas, 1996).

### 2.1.1. Ecuación de Balance Hidrológico.

La ecuación de balance hidrológico se deriva del axioma de Lavoisier “nada se crea ni se destruye”, cuya ecuación (Ecuación 1), es aplicable a cualquier región o unidad (ejemplo: un acuífero), y en cualquier período de tiempo. Cuando la unidad de tiempo es muy grande, la variación por almacenamiento se vuelve despreciable por lo que se la extrae de esta ecuación, resultando en este caso, que las entradas son iguales que las salidas (Custodio y Llamas, 1996).

$$\mathbf{Entradas = Salidas \pm variación de Almacenamiento} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Un análisis más en detalle permite presentar ecuaciones más específicas, en las cuales se considera que el volumen de agua de los ríos posee un componente de escorrentía superficial y otro subterráneo, y que, del volumen de agua que alcanza el suelo y no escurre, una parte se evapora o es transpirada por las plantas y la otra alcanza la zona saturada del suelo y termina alimentando los cauces (Ecuación 2). (Custodio y Llamas, 1996)

$$\left. \begin{aligned} P &= ES + ED + ET \\ H &= P - ED = ES + ET \\ E &= ES + ED \end{aligned} \right\} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde: *P*, es la precipitación; *ES*, el escurrimiento subterráneo o estable; *ED*, el escurrimiento directo<sup>8</sup>; *ET*, la evapotranspiración real<sup>9</sup>; *H*, el humedecimiento del suelo<sup>10</sup> y *E*, el escurrimiento total.

De todas maneras, las ecuaciones de balance hidrológico son numerosas y todas intentan reflejar el ciclo hidrológico de manera de hacerlo cuantificable a través de la medición individual y directa de alguno de sus componentes e indirecta de los otros.

A continuación se describe cada una de las variables que integran el balance hidrológico.

#### 2.1.1.1. Precipitación.

La precipitación constituye el elemento primario del ciclo hidrológico, y es, en si mismo, el componente que alimenta el ciclo. Se la define como el agua que llega a la superficie de la tierra, tanto en su estado líquido como sólido.

Custodio y Llamas (1996), indican que debe ser considerada como un fenómeno discontinuo, siendo su distribución espacial y temporal muy variable. A su vez, señalan que su formación proviene del vapor de agua contenido en las masas de aire que, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y el movimiento de las masas, ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleo de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o en cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se le oponen, hasta llegar a la superficie terrestre.

Mármol (2006), por otro lado, consigna una serie de características propias de los distintos tipos de precipitación, que permiten su correcta identificación, estas son: *tamaño*<sup>11</sup>, *velocidad*<sup>12</sup>, *volumen*<sup>13</sup>, *intensidad*<sup>14</sup>, *duración*<sup>15</sup>, *frecuencia*<sup>16</sup> y *período de retorno o recurrencia*<sup>17</sup>.

En lo que refiere a la medición directa de la precipitación, se puede distinguir, a grandes rasgos, dos tipos de instrumentales de medida: los medidores con registro y los medidores sin registro. Los primeros, son aquellos aparatos que registran de forma automática la profundidad de la lámina de lluvia a intervalos reducidos de tiempo (Ejemplo: pluviógrafo tipo Canjilones); los segundos son aquellos que registran esa misma lámina de lluvia y se miden manualmente a intervalos mayores de tiempo.

Existe un instrumental específico para la simulación de lluvias, con el cual es posible caracterizar el flujo del agua desde que llega al suelo y se convierte en escurrimiento, es retenido por el suelo o alcanza niveles profundos. Este instrumental es el simulador de lluvia y permite la medición de estos flujos por separado sin la necesidad de esperar un suceso de lluvia natural.

#### 2.1.1.2. Evapotranspiración.

Del total de agua que llega a la superficie terrestre, un gran porcentaje regresa a la atmósfera en forma de vapor por evaporación directa del agua acumulada en las capas superficiales del suelo, en espejos de agua (ríos, lagos, mares, océanos), de la interceptada por la vegetación, o por transpiración de las plantas. La influencia de la evapotranspiración sobre el ciclo hidrológico es, por tanto, evidentemente importante si se considera que en muchos lugares del mundo el 70 % de la precipitación que llega a la tierra es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y en algunos otros este porcentaje alcanza el 90 % (Custodio y Llamas, 1996).

En condiciones controladas es posible tratar a la evaporación y transpiración como procesos independientes pero, en un ambiente natural con vegetación, se debe hablar de estos dos procesos de forma simultánea bajo el concepto de evapotranspiración ya que éstos son procesos simultáneos e interdependientes. Otro argumento para agrupar estos fenómenos, uno físico como la evaporación y otro físico-biológico, la transpiración, es la dificultad que presentan para su medición por separado.

Debido a que la evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir, como ser, el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta, Thornthwaite (1948) instituyó el concepto de *evapotranspiración potencial*<sup>18</sup> o pérdidas por evapotranspiración (ETP). El mismo, se define como el agua que vuelve a la atmósfera desde un suelo cuya superficie se encuentra completamente cubierta por vegetación y carece de limitaciones de humedad, representando de esta manera, a la máxima cantidad de agua que

realmente volvería a la atmósfera por evaporación y transpiración y que se conoce con el nombre de *evapotranspiración real*<sup>9</sup> (Custodio y Llamas, 1996).

Sánchez (2006) indica la existencia de términos afines a la evapotranspiración como el *uso consuntivo*<sup>19</sup> y el *déficit de escorrentía*<sup>20</sup>. Los mismos se pueden tomar como sinónimos.

Los agentes condicionantes del fenómeno de evapotranspiración, son los mismos que afectan a los procesos individuales, evaporación y transpiración. Estos son: *Energía disponible*<sup>21</sup>, *Déficit higrométrico de saturación*<sup>22</sup>, *Temperatura del aire*<sup>23</sup>, *Velocidad y turbulencia del viento*<sup>24</sup> y *Naturaleza y estado de la superficie evaporante*<sup>25</sup> Mármol (2006).

Debido a que los métodos de medición directa de la evapotranspiración resulta un tanto complicada, ya sea por los costos del instrumental o lo laboriosa que es su implementación a campo, es común recurrir a métodos indirectos o empíricos como lo son las ecuaciones de Thornthwaite, Penmann y Blaney-Cridde, para el cálculo de la ETP. El cálculo de la evapotranspiración real (ETR), por otro lado, se realiza a través del balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Matter (1955) que permite, además, el conocimiento de los déficit y excesos de humedad disponibles para las plantas, el almacenamiento de agua en el suelo y la escorrentía superficial generada.

### 2.1.1.3. Esgurrimiento.

El esgurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo de la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Mijares, 1994).

El camino que sigue el agua una vez que cae en la superficie terrestre (descontando el agua interceptada y evaporada), hasta que alcanza el cauce es muy variable y se puede separar en tres componentes: esgurrimiento superficial, esgurrimiento subsuperficial y esgurrimiento subterráneo.



De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega primero a la salida de una cuenca y abarca tanto el flujo por la superficie del terreno como el que sigue el curso de agua. Se lo considera relacionado directamente con la precipitación y se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva, constituyendo el escurrimiento directo. Del agua que infiltra, una parte puede moverse lateralmente hacia los cauces en las capas próximas a la superficie constituyendo, de esta manera, el escurrimiento subsuperficial o epidérmico, y otra parte puede llegar hasta el nivel freático aumentando el agua subterránea que eventualmente puede descargarse en los cauces como escurrimiento subterráneo, flujo base o descarga de estiaje.

Existe un cuarto componente de la esorrentía total, la fracción que cae directamente sobre la superficie libre del agua (ríos, lagos, embalses), pero su valor es de escasa importancia (Mármol, 2006).

Existen numerosos métodos para estimar el escurrimiento superficial, uno de los que ha presentado mejores resultados en cuanto a la practicidad de su aplicación y a lo bajo de sus costos, es el simulador de lluvias.

#### 2.1.1.4. Infiltración.

Se entiende como infiltración al proceso de entrada de agua al suelo. La *infiltración instantánea real*<sup>26</sup> es la expresión, en términos de velocidad, del agua que penetra en el suelo por unidad de superficie, que cuando se encuentra encharcado, pasa a llamarse *infiltración potencial o capacidad de infiltración*<sup>27</sup>. Los valores acumulados de ambas expresiones (Infiltración acumulada real e infiltración acumulada bajo encharcamiento), tienen unidades de longitud (Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez, 2005).

En el gráfico 1 se observa el comportamiento general de la infiltración en el tiempo. En la situación inicial, acumulación de agua superficial por comienzo de una precipitación, el gradiente hidráulico en las capas superficiales es muy grande y como consecuencia, la velocidad de

infiltración máxima. A medida que el agua penetra en el perfil, el gradiente hidráulico disminuye hasta hacerse constante e igual, en teoría, al de conductividad hidráulica en suelo saturado.

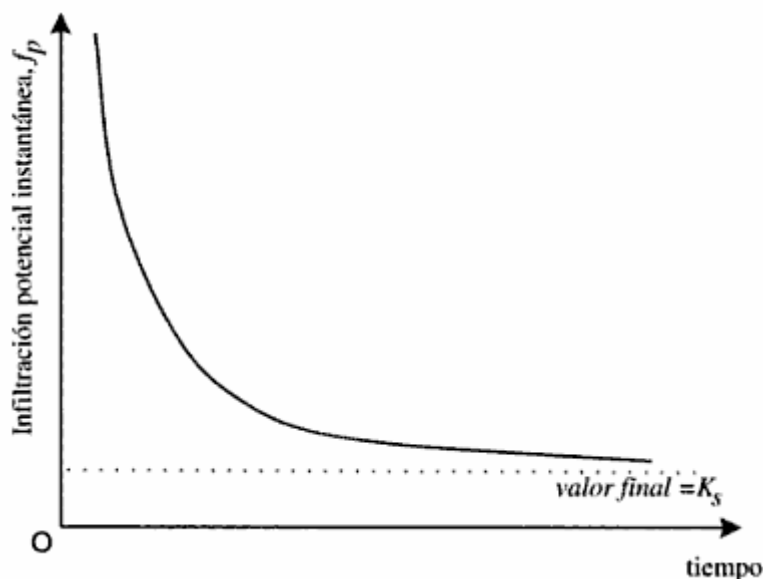


Gráfico 1. Curva de infiltración potencial instantánea en un suelo encharcado. Extraído de Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez (2005).

Mijares (1994) indica que los factores que condicionan la capacidad de infiltración son numerosos, y expone una lista de los que más se destacan en este sentido: textura del suelo, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de saturación, cobertura vegetal, usos del suelo, aire atrapado en el suelo, lavado del material fino, compactación, temperatura, sus cambios y diferencias. Por su parte, Linsley *et al.* (1993), consignan que de aquellas características del suelo que afectan a la infiltración, la porosidad es posiblemente la más importante ya que determina la capacidad de almacenamiento y también afecta la resistencia al flujo. De esta manera, a mayor porosidad corresponde un aumento de la infiltración. A la vez, argumenta que el aumento en el contenido de materia orgánica también tiende a aumentar la capacidad de infiltración, debido en gran parte al aumento de la porosidad.

La medida de la infiltración en el suelo, puede calcularse de forma indirecta por medio de la ecuación de balance hidrológico, o bien de forma directa por medio de la utilización de algún Infiltrómetro, como el infiltrómetro de anillo simple, o la utilización del simulador de lluvias.

#### 2.1.1.5. Intercepción.

La intercepción, se entiende como el agua que es retenida por las partes aéreas de la vegetación y obras de arte, como pueden ser las casas o cualquier construcción, retardando su llegada al suelo, considerando una potencial absorción por la vegetación-suelo o ser evaporada.

Pritchett (1991), indica que la pérdida por intercepción se calcula de forma indirecta, descontando de la *precipitación total*<sup>28</sup>, el *flujo caulinar*<sup>29</sup> o escurrimiento por el tallo y la lluvia que cae a través de la *canopea*<sup>30</sup> o precipitación interna.

## 2.2. EMISIÓN DE SEDIMENTOS.

Mintegui Aguirre y López Unzú (1990) explican a la erosión hídrica como el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua. Además, hacen una distinción entre la erosión hídrica superficial y en profundidad. Dentro de la erosión hídrica superficial, estos autores, presentan al efecto de las gotas de lluvia (erosión por salpicadura) y a la acción del escurrido como sus principales componentes, y nombran al proceso de infiltración hacia el perfil edáfico como generador de condiciones de inestabilidad en el suelo que propician los movimientos en masa (erosión en profundidad).

En figura 2 se muestra un esquema de Meyer y Wischmeier (1969) en el cual se presenta el proceso de erosión hídrica a través de cuatro subprocesos: 1- Disgregación de las partículas terrosas por acción del impacto de la gota de lluvia ( $D_R$ ); 2-Transporte de partículas por la acción de la salpicadura ( $T_R$ ); 3-Disgregación de las partículas terrosas por la acción del flujo superficial o escorrentía ( $D_F$ ) y 4-Transporte de partículas por escorrentía ( $T_F$ ) (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990)

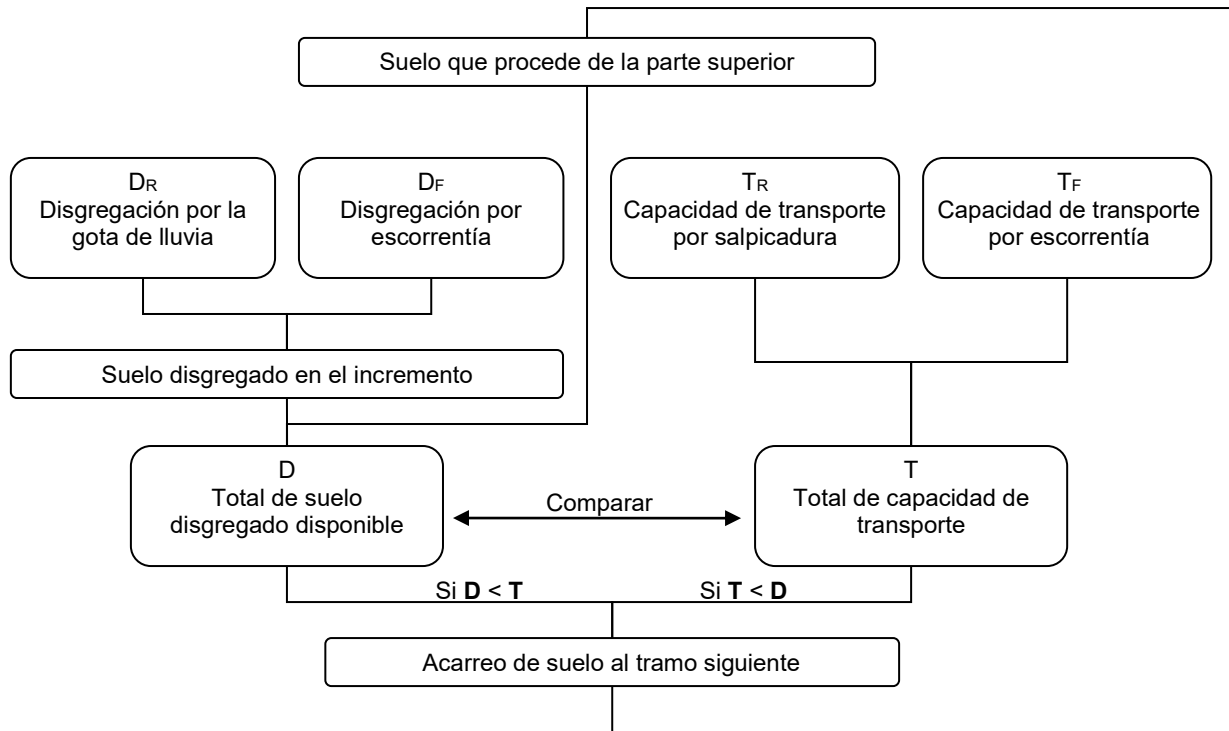


Figura 2. Modelo conceptual para el análisis del proceso de la erosión hídrica, adaptado de (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990)

### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.**

#### **3.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO.**

- Un sector forestado de una cuenca de drenaje conduce a modificaciones significativas en el régimen hidrológico natural, que se traduce en un aumento de la evapotranspiración y la infiltración y una reducción del escurrimiento superficial.

#### **3.2. OBJETIVOS GENERALES.**

- Evaluar el efecto que genera una masa forestal en las variables del ciclo hidrológico, así como sus consecuencias y aplicabilidad en el manejo de la cuenca alta del Arroyo El Pescado.

#### **3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Cuantificar las variables más importantes del ciclo hidrológico: precipitación, interceptación, evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial en la cuenca estudiada.
- Analizar comparativamente las modificaciones del ciclo hidrológico en plantaciones forestales con respecto a los componentes hidrológicos de un ecosistema natural de amplia cobertura en la zona de estudio.
- Estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca con la forestación existente.
- Comparar los resultados de pérdida de suelo medidas a campo con estimaciones realizadas a través de modelos matemáticos.
- Generar propuestas de manejo para la conservación del recurso hídrico del área de estudio, con vistas a extrapolar estas experiencias a otras zonas de características similares.

#### 4. ANTECEDENTES.

Laurencena *et al.* (2005), indican que en los ámbitos de llanura y donde la vegetación nativa no es estrictamente forestal, como es el caso de la Cuenca del Arroyo El Pescado, se reconoce el predominio de los movimientos verticales del agua (infiltración-evapotranspiración) sobre los movimientos horizontales (escurrimientos) existiendo además una estrecha interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas.

##### 4.1. INCIDENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL.

El tipo de cubierta vegetal y su manejo determinan la fracción de la precipitación incidente que regresa a la atmósfera vía evapotranspiración y por lo tanto el remanente que drena por debajo del nivel de raíces o escurre superficialmente para infiltrarse y generar recarga freática (Jobbágy *et al.*, 2007). Cuando el nivel del sistema freático es alto y las raíces pueden acceder a ella, la vegetación también puede regular la descarga freática al absorber y transpirar agua de las napas (Jobbágy y Jackson, 2004).

Las raíces de los árboles absorben grandes cantidades de agua para sustituir la que se pierde por transpiración y la que se consume en actividades metabólicas. En condiciones favorables esta puede ser hasta de 6 mm por día (75.000 litros por hectárea) a principios del verano. Los árboles consumen de 300 a 500 kg de agua por cada kilogramo de materia seca producida. Esta necesidad de agua puede ser mucho mayor para árboles de suelos infértiles que para los que crecen en los fértiles (Pritchett, 1991).

Huber y López (1993) determinaron la variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo y el consumo de agua por evapotranspiración de un rodal adulto de *Pinus radiata* D. Don, antes y después de su tala, comparándose los valores con los de una pradera natural. El agua por evapotranspiración e intercepción del bosque superó en un 80% a la consumida por la pradera; a su vez, la pradera sobrepasó en un 13% el consumo de la superficie

talada. La evapotranspiración, para este mismo período, fue equivalente al 96,6% y el 57,7% de la precipitación total para el bosque y la pradera respectivamente.

#### **4.2. DINAMICA DEL AGUA EN CUENCAS DE LLANURA.**

Verón y Paruelo (2005) afirman que la disponibilidad hídrica en los sistemas agroecológicos de la llanura Chaco-pampeana se encuentra determinada principalmente por la precipitación. Por su parte, Jobbágy *et al.* (2007), explica que las redes de escurrimiento superficial en estos ambientes son pobres, lo cual provoca que los efectos de la precipitación, sobre los sistemas agrícolas, sean mediados por el sistema hidrológico subterráneo a modo de “filtro hidrológico”. Este filtro hidrológico, presenta tanto efectos perjudiciales en la producción agrícola pampeana (inundaciones y anegamientos), como efectos benéficos (reservorio de agua disponible en épocas de sequías), demostrando que los paisajes planos con freáticas de lenta evacuación, mantienen una ceñida relación e interdependencia hidrológica entre el tipo de cubierta vegetal, el manejo de los agroecosistemas y los sistemas freáticos propiamente dichos (Jobbágy *et al.*, 2007).

#### **4.3. EXCESOS HIDRICOS.**

Los excesos hídricos, muchas veces se traducen en inundaciones (Jobbágy *et al.*, 2008). Esta problemática se encuentra agravada por la cercanía de la napa freática en este tipo de ambientes que determinan inundaciones de mayor duración y extensión geográfica (Jobbágy *et al.*, 2007).

En este contexto, Montico (2005) señala que las inundaciones generan alteraciones ambientales de difícil reversión, localidades anegadas con alta tasa de evacuados y grandes extensiones rurales inutilizadas, producen entre otros, daños en la infraestructura, interrupción de las vías de comunicación, canalizaciones anárquicas y problemas sanitarios.

De Francesco *et al.* (2001), por su parte, mencionan que las características litológicas y las geoformas desarrolladas en los ámbitos diferenciados del área de estudio, condicionan el comportamiento dinámico de las aguas superficiales, tanto en su escurrimiento, como en su permanencia sobre sectores definidos. Los anegamientos e inundaciones son producto de la interacción de factores naturales, incrementados por acciones humanas, y favorecidas por la baja permeabilidad de los "Sedimentos Pampeanos" y la presencia de un potente horizonte B textural.

Los "Sedimentos Pampeanos" contienen al acuífero libre y a otros niveles productivos, suministrando caudales más bajos que la unidad inferior, llegando a alcanzar 30 m<sup>3</sup>/h por pozo, por lo que su comportamiento es, en general, el de un acuífero de mediana productividad (Auge, 1995a), que funciona como capa receptora de los interfluvios, transmitiéndose a la formación Puelche. La descarga se produce a través del nivel freático a cursos de agua, bajo determinadas circunstancias (De Francesco *et al.*, 2001).



## 5. CARACTERIZACION REGIONAL DEL AREA DE ESTUDIO.

El área de estudio se encuentra localizada en el partido de La Plata, a unos 20 kilómetros al Sur de la ciudad, dentro del área de influencia del Arroyo La Paloma, tributario de tercer orden del Arroyo El Pescado.

La Cuenca del arroyo El Pescado comprende, por su parte, una jurisdicción compartida entre el partido de La Plata, Magdalena y Berisso. (Figura 3)

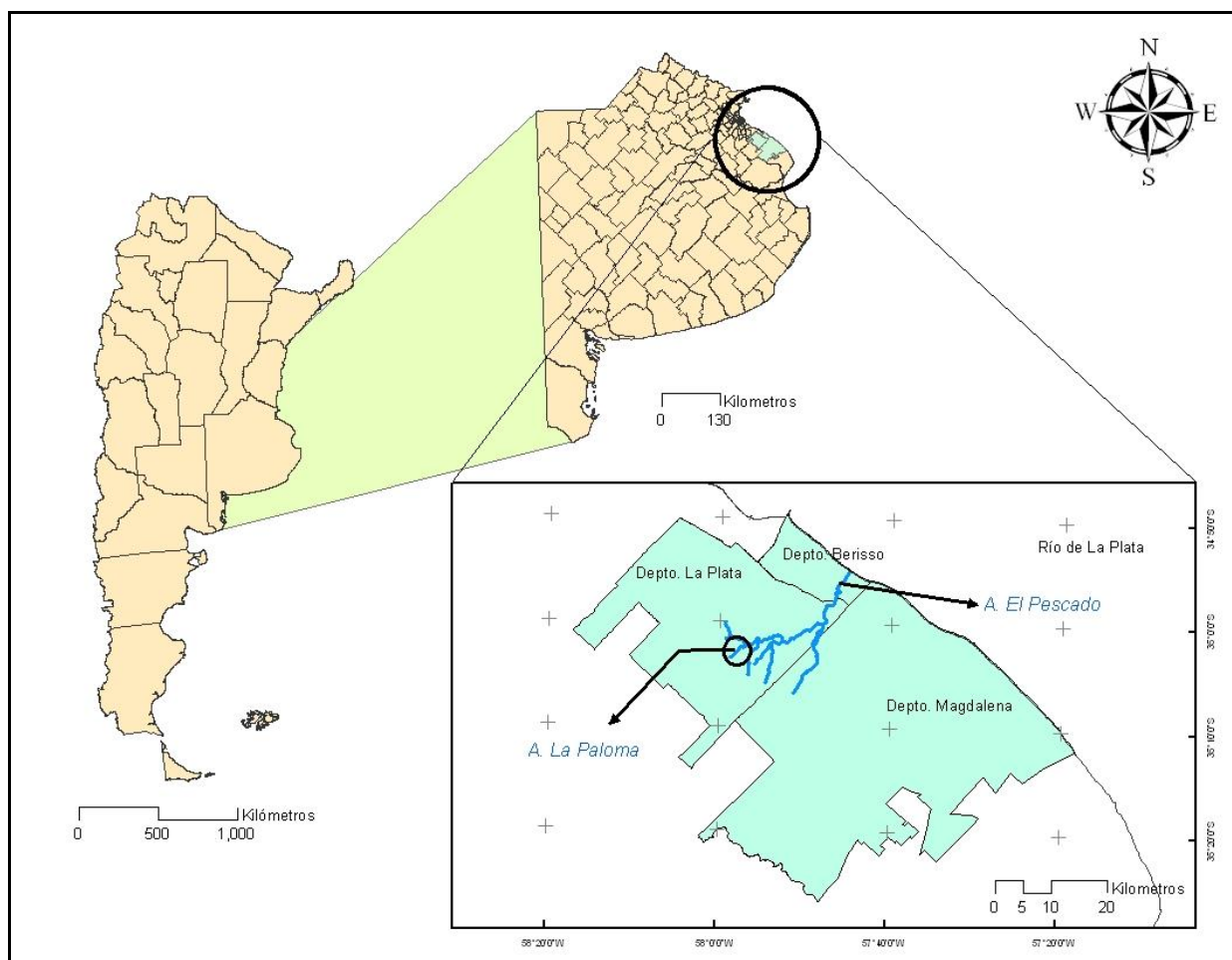


Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio, Buenos Aires, Argentina.

Hurtado *et al.* (2006) realizaron una caracterización climática general, en el Centro de Investigaciones de Suelos y Aguas de Uso Agropecuario (CISAUA), para la ciudad de La Plata, que indica para el período 1909-2005, una precipitación media anual de 1040 mm, siendo marzo

el mes más lluvioso (111 mm) y junio el menos lluvioso (63 mm). Así mismo, la distribución estacional de las lluvias se presenta bastante regular (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución estacional de las lluvias, en valores medios, para el período 1909-2005, partido de La Plata. Adaptado de (Hurtado et al., 2006)

Período	Precipitación (mm)	Porcentaje del período (%)
Verano (diciembre, enero, febrero)	289	27.8
Otoño (marzo, abril, mayo)	289	27.8
Invierno (junio, julio, agosto)	196	18.8
Primavera (septiembre, octubre, noviembre)	266	25.6

La temperatura media anual alcanza los 16,2 °C, siendo enero el mes más cálido (22.8 °C de media) y julio el más frío (9,9 °C de media) (Tabla 2). Los vientos predominantes son los del Este, con velocidades medias anuales de 12 km/h (Hurtado et al. 2006).

En la tabla 2 se observa un balance hídrico medio mensual para el Partido de La Plata, con una capacidad hídrica del suelo de 200 mm para el período 1909-2005, donde puede observarse un pequeño déficit de agua para los meses de verano y un exceso de mayor intensidad entre fines de otoño y principios de primavera (Hurtado et al. 2006).

Tabla 2. Balance hídrico medio mensual (1909-2005) para el partido de La Plata. Adaptado de Hurtado et al. (2006)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
<b>T</b>	22.8	22.1	20.2	16.6	13.3	10.4	9.9	11	12.8	15.5	18.5	21.2	16.2
<b>I</b>	9.95	9.49	8.28	6.15	4.4	3.03	2.81	3.3	4.15	5.55	7.25	8.91	73.27
<b>ETPd sa</b>	3.5	3.3	2.9	2	1.5	1	0.9	1	1.4	1.9	2.5	3.1	
<b>FC</b>	36.9	31.2	31.8	28.2	26.7	24.6	26.1	28.2	30	33.9	35.1	37.5	
<b>ETP</b>	129	103	92	56	40	25	23	28	42	64	88	116	806
<b>P</b>	101	94	111	95	83	63	66	67	77	93	96	94	1040
<b>P-ETP</b>	-28	-9	19	39	43	38	43	39	35	29	8	-22	
<b>Ppaa</b>	-50	-59										-22	
<b>Alm</b>	155	148	167	200	200	200	200	200	200	200	200	179	
<b>Valm</b>	-24	-7	19	33	0	0	0	0	0	0	0	-21	
<b>ETR</b>	125	101	92	56	40	25	23	28	42	64	88	115	799
<b>Def</b>	4	2										1	7
<b>Exc</b>				6	43	38	43	39	35	29	8		241

Donde: **T**, es la temperatura media mensual (°C); **i**, el índice calórico mensual (adimensional); **ETPd sa**, la evapotranspiración potencial diaria sin ajustar (mm); **FC**, el factor de corrección (adimensional); **ETP**, la evapotranspiración (mm); **P**, la precipitación (mm); **P-ETP**, la precipitación menos evapotranspiración (mm); **Ppaa**, la pérdida potencial de agua acumulada (mm); **Alm**, el almacenaje (mm); **Valm**, la variación de almacenaje (mm); **ETR**, la evapotranspiración real (mm); **Def**, el déficit (mm) y **Exc**, el exceso (mm).

Laurencena *et al.* (2002), indica que la cuenca en estudio se localiza en un ambiente de llanura con suaves ondulaciones y pendiente regional hacia el noreste. Además señala que la misma no supera el 1%, predominando los procesos de infiltración frente a los de escurrimiento superficial.

La región presenta una marcada monotonía en su condición geológica superficial, hecho que tipifica a los ambientes llanos (Auge y Hernández, 1984).

De Francesco *et al.* (2001), indican que la geología superficial está integrada por unidades litológicas de génesis fundamentalmente continental del Cenozoico Superior, que incluyen a los "Sedimentos Pampeanos" (Fidalgo *et al.*, 1975), Formación La Postrera, Formación Luján y Aluvio (Fidalgo *et al.*, 1973; De Francesco *et al.*, 1999), presentando además, una breve caracterización de cada una de estas unidades, como se enuncia a continuación:

- Sedimentos Pampeanos. Origen esencialmente eólico y naturaleza limo arcillosa a arcillo limosa, con concentraciones y pulverulencias de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  y color castaño, se encuentran ampliamente distribuidos, constituyendo, en gran medida, el horizonte C de los suelos en este ámbito, aunque en ocasiones subyacen a otros depósitos eólicos y fluvio/lacustres. Presenta espesores que varían entre los 35 y 45 metros. Su edad es Pleistoceno medio-superior.

- Formación La Postrera. Integrada por limos a limos arenosos eólicos, homogéneos y friables, de color castaño amarillento a grisáceo y espesores entre 0,50-0,90 m, se ubica, mayormente, en los sectores culminantes del relieve. Su edad es Pleistoceno superior - Holoceno.

- Formación Luján. Ubicada en los valles principales, está integrada por limos arenosos a limos arcillosos, de color verde - verde grisáceo a castaño amarillento en su base y gris castaño hacia el techo. Es cubierta por la Formación La Postrera y el Aluvio. La edad de esta unidad es Pleistoceno Superior - Holoceno.

- Aluvio. Constituido por sedimentos arenos arcillosos a arcillosos, de color gris a gris verdosos, generados por acción fluvial y sedimentación en cuerpos de aguas estancadas, que ocupan amplias áreas deprimidas.

Los suelos del área de estudio se presentan, en la gran mayoría de los casos (67.9 %), como suelos con moderadas limitaciones para el uso agrícola, con texturas finas, imperfectamente drenados y ubicados en vías de escurrimiento incipientes o depresiones que permanecen anegadas durante períodos significativos. El resto de estos suelos, se presentan como no aptos para cultivos, siendo posible el uso pecuario y forestal (Hurtado *et al.*, 2006).

En lo que refiere a las actividades productivas que se desarrollan en el área de estudio (uso del suelo), se puede mencionar el uso agropecuario extensivo con un 93% de participación, el forestal con el 6% y el agrícola intensivo con el 1%. El uso agropecuario extensivo, involucra cultivos extensivos (soja, trigo, maíz, girasol, lino), pasturas artificiales para ganadería, tambo, haras y cabañas; incluye además, el uso ganadero extensivo y los terrenos incultos a causa de antiguas decapitaciones con mínima recuperación, suelos degradados y planicies de inundación de arroyos. El uso forestal, por su parte, se encuentra poco desarrollado por falta de promoción e incentivos, pudiendo ser una alternativa para los suelos degradados o con limitaciones. El uso agrícola intensivo, incluye a la horticultura, floricultura, fruticultura, avicultura, apicultura y granja de pequeños animales. La horticultura es la actividad mas importante en este último uso y, a pesar de que no es muy representativa en el área de estudio, el partido La Plata constituye uno de los grandes centros horticultores del país.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **6.1. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.**

Se procedió a la recolección análisis y procesamiento de la información precedente, tanto bibliográfica como digital (en forma de base de datos y cartográfica) para una caracterización hidrometeorológica de las áreas a seleccionar, abarcando: estadística de la precipitación, estimación de la evapotranspiración potencial y real y su significado hidrológico, influencia de los almacenamientos de agua en el suelo y de los excesos de agua en los balances hidrológicos.

Se incluyó la revisión y sistematización de antecedentes bibliográficos, cartográficos, geofísicos, de perforaciones y todo otro dato relacionado con el problema, lo que resultó fundamental para la elección del área de estudio.

Se realizaron viajes de campaña a las posibles áreas de estudio planteadas, para obtener datos de campo que caractericen cuali-cuantitativamente los diferentes sitios y así definir cual de ellos analizar.

### **6.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

Se realizó la identificación de los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso del suelo a campo, de manera de definir la unidad hidrológica de estudio involucrada: microcuenca del Arroyo La Paloma (MALP). El nombre de MALP fue otorgado a partir de la identificación predial local debido a la ausencia de un nombre legal tanto en la cartografía topográfica como en la catastral.

En la microcuenca, se relevaron datos de las plantaciones forestales representativas a través de parcelas no permanentes de 100 m<sup>2</sup>. En las mismas se obtuvieron datos que permitieron caracterizar la masa forestal, tales como: DAP (diámetro a la altura de pecho), altura, cobertura del dosel, porcentaje y composición de la cobertura herbácea presente debajo del dosel.

Una primera aproximación para localizar geográficamente la cuenca y microcuenca, se hizo uso del Google Earth ®. Esta herramienta, de libre acceso, permitió una representación espacial detallada de la situación hídrica de la zona, como así también de la ocupación predial y actividades predominantes.

La visualización, unificación, procesamiento y generación de toda la cartografía se realizó con el sistema de información geográfica (SIG) Arc Gis 9.2 ®. Los límites naturales de la cuenca y microcuencas se determinaron por la aplicación del módulo ArcSWAT de Arc Gis 9.2 ®, utilizando como dato de entrada el MDT (modelo digital del terreno) del Shuttle Radar Topography Mission (NASA, 2000). La extensión ArcSWAT es una interfaz gráfica de usuario para el modelo hidrológico SWAT ® desarrollado por Arnold *et al.* (1998). El SWAT ® (Soil and Water Assessment Tool) representa un modelo hidrológico a escala de cuenca hidrográfica, desarrollado para predecir el impacto en la tierra, de las prácticas de gestión en materia de agua, sedimentos, rendimientos de productos químicos agrícolas en cuencas hidrográficas complejas con diferentes suelos, uso de la tierra, y de las condiciones de manejo durante largos periodos de tiempo (Winchell *et al.*, 2007). El modelo, además, posee un complemento o herramienta para la delimitación de cuencas y subcuencas de forma automática (Watershed Delineation), que utiliza un modelo digital del terreno (MDT) y la especificación (en caso de ser requerida por el usuario) de los posibles puntos de aforo o salidas de la cuenca y subcuencas, y de la red de drenaje correspondiente.

El resultado de esta modelación se uso como aproximación primaria del límite de la cuenca y microcuenca en estudio, siendo luego contrastada con las cartas topográficas correspondientes, a fin de obtener la delimitación definitiva de la cuenca y microcuencas.

Obtenido los límites cartográficos con SIG, se verificaron y corrigieron en función de un mosaico de cinco cartas topográficas 1:50.000 que integran la cuenca, provenientes del Instituto Geográfico Militar de la provincia de Buenos Aires (Tabla 3).

Tabla 3. Denominación de cartas topográficas 1:50.000 de la Cuenca del Arroyo El Pescado

<b>Carta</b>	<b>Denominación</b>	<b>Número de carta</b>
1	Villa Elisa	3557-13-4
2	La Plata	3557-14-3
3	Punta Blanca	3557-14-4
4	Gómez	3557-19-2
5	Ignacio correa	3557-20-1

Identificada la microcuenca en estudio (MALP), se llevaron a cabo los ensayos, tomas de muestras y mediciones a nivel de parcela. Para esto, fue necesario un intenso trabajo de búsqueda a fin de escoger un sitio apto para desarrollar actividades de investigación, a fin de evaluar el efecto que genera una masa forestal en las variables del ciclo hidrológico, y sus consecuencias y aplicabilidad en el manejo de la cuenca alta del Arroyo El Pescado.

La Ea. El Centauro es un establecimiento con forestaciones en estado avanzado de desarrollo, que además cuenta con una elevada representatividad general en la región. Debido a ello, se ha considerado esta área como microcuenca en estudio. En la Figura 4 se muestra una imagen Google Earth ® correspondiente al establecimiento mencionado, donde se realizaron las mediciones, junto con la señalización de los principales accesos, ubicación de los pozos y parcelas de muestreo donde se colocó el instrumental de medición. La imagen corresponde a un fotomosaico de imágenes Digital Globe del 2004, 2007 y 2009, y una imagen pancromática del satélite Spot 5.

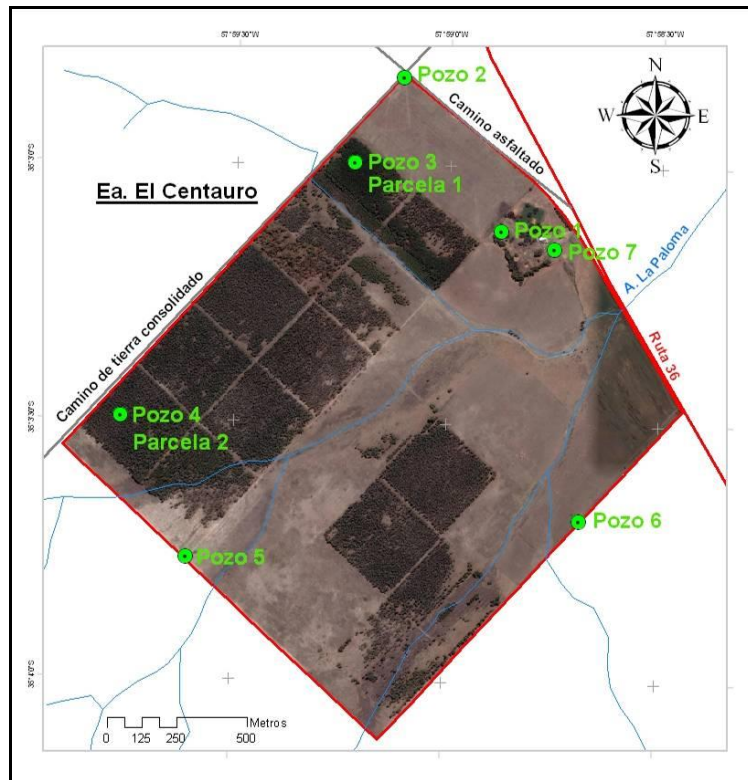


Figura 4. Fotomosaico de la Estancia El Centauro junto con los accesos viales y red hidrográfica, mostrando en verde la ubicación de los pozos y parcelas de muestreo.

Para completar la *caracterización morfométrica*<sup>31</sup> de la MALP se analizaron los siguientes parámetros de forma: perímetro<sup>32</sup> (**P**), longitud axial<sup>33</sup> (**La**), área<sup>34</sup> (**A**), factor de forma<sup>35</sup> (**Ff**) e índice de compacidad<sup>36</sup> (**Kc**); los parámetros del relieve como: curva hipsométrica<sup>37</sup>, relación hipsométrica<sup>39</sup> (**Rh**), altura media<sup>40</sup> (**Hm**), pendiente media<sup>41</sup> (**PM**), coeficiente de rugosidad<sup>42</sup> (**Ra**) y orientación de la cuenca<sup>43</sup>; y los parámetros de la red de drenaje como: densidad de drenaje<sup>44</sup> (**Dd**), pendiente media del cauce<sup>45</sup> (**J**), tiempo de concentración<sup>46</sup> (**Tc**) y número de orden de los cursos de agua<sup>47</sup>. La definición de estos parámetros morfométricos junto con su forma de cálculo, se encuentran enunciados en el apartado de Glosario de términos.

La caracterización hidrográfica de la MALP, se realizó tomando información catastral de la zona, cartas topográficas 1:50000 (Tabla 3), la dirección web de el Instituto Geográfico Nacional ([www.geoargentina.gov.ar](http://www.geoargentina.gov.ar)), información digital disponible en la web del Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria denominada GeoINTA ([www.geointa.gov.ar](http://www.geointa.gov.ar)), Atlas de suelos de la



República Argentina (Maccarini *et al.*, 1995), SIG 250 (<http://sig.ign.gov.ar>), fotografías aéreas, imágenes satelitales e imágenes procesadas del Google Earth ®.

El proceso de digitalización de la red de drenaje se realizó directamente desde el Google Earth ®, exportando los archivos de líneas en formato (\*.kml) para luego ser convertidos a vector transferible como shape (\*.shp) por el ArcGis 9.2 ® y unificados en la base de datos georreferenciada.

Con el objetivo de hacer una caracterización florística del área de estudio, se creó un archivo fotográfico de las especies vegetales predominantes, a lo largo de las mediciones, a fin de ser definidas posteriormente en gabinete.

Se realizó una recopilación de datos para la zonificación y caracterización de tipos de suelo de trabajos en los que englobaran a la MALP dentro de su unidad de estudio, logrando una gran cantidad de trabajos con descripciones edáficas muy detalladas.

### **6.3. GENERACIÓN DE UN MODELO CARTOGRÁFICO.**

Se recolectó la información disponible de todos los factores que puedan afectar directa o indirectamente la relación entre los procesos hidrológicos y la forestación. A partir de dicha información, se generó una base de datos cartográfica georreferenciada.

La generación de un modelo cartográfico cualitativo permitió obtener la secuencia cartográfica integral de elaboración de los mapas primarios de drenaje, límite de cuenca, uso del suelo y vegetación, litología, edafología, topografía y pendiente. El procesamiento de estos mapas primarios generó el mapa de índices de protección del suelo por la cobertura forestal (matriz de superposición de los mapas de uso del suelo y vegetación con el de pendiente), el mapa de grupos hidrológicos (matriz de los mapas litológicos con el edafológico) y el mapa de paisajes erosivos, que se obtiene de la confrontación de los dos anteriores.

El modelo cartográfico se definió a partir de mapas primarios elaborados de fotografías aéreas de distintas épocas (para identificar temporalidad), de imágenes satelitales, cartas topográficas, mapas de drenaje, mapas de suelo, carta imagen, entre otros. El análisis de fotografías aéreas (fotointerpretación) e imágenes satelitales permitió zonificar la cobertura vegetal, uso del suelo / geomorfología regional. Además se digitalizó y elaboró la cartografía geológica (superficie y suelo), geomorfología y drenaje del área.

Las tareas planteadas y efectuadas en gabinete, se basaron en el procesamiento de la información y elaboración de una base de datos digital, en un SIG con el programa ArcGis 9.2®, que proporcionó un manejo espacial de los datos y la posibilidad de extrapolación a sitios similares de la provincia.

#### **6.4. MEDICIONES DE LA SITUACIÓN HÍDRICA.**

Se realizaron relevamientos de las condiciones meteorológicas, aguas superficiales y subterráneas en el área de estudio. De acuerdo a los datos obtenidos, a la información hidrometeorológica disponible y generada, se elaboraron diferentes balances hidrológicos, con el fin de evaluar y comparar metodologías, y se definió la influencia regional de las variables hidrológicas en distintos ambientes analizados.

Los componentes principales del balance hidrológico analizados para la MALP son ilustrados por la ecuación del balance hídrico (Ecuación 3) de Ward y Robinson (1990):

$$P = ET + Q + \Delta S + \Delta G$$

Ecuación 3

*Donde: P, es la precipitación; ET, la evapotranspiración; Q, la escorrentía superficial; ΔS, el almacenamiento de agua en el suelo y ΔG, el almacenamiento de agua subterránea. Todos expresados en mm de agua acumulada por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).*

De la ecuación 3 se desprenden las ecuaciones 4 y 5 que representan un detalle del cálculo de la evapotranspiración y evaporación del agua interceptada, respectivamente:

$$ET = E_i + E_t + E_s \quad \text{Ecuación 4}$$

$$E_i = P - (T_f + S_f) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:  $E_i$ , es la evaporación del agua interceptada por el dosel;  $E_t$ , la transpiración;  $E_s$ , la evaporación del suelo;  $T_f$ , la precipitación interna y  $S_f$ , el escurrimiento por el tallo. Todos expresados en mm de agua acumulada por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).

Particularmente en la MALP, se aplicó el balance hidrológico presentado por López Cadenas de Llano y Blanco Criado en 1976, ecuación 6:

$$P = ET + Q + I \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,  $P$  es la precipitación directa;  $ET$  es la evapotranspiración desde el suelo, vegetación y reservorios de agua superficial;  $Q$  son los escurrimientos e  $I$  la infiltración. Todos expresados en mm de agua acumulada por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).

Cada uno de estos componentes ha sido medido semanalmente desde Julio de 2008 hasta la actualidad, en parcelas experimentales de 100 m<sup>2</sup> representantes de cada una de las especies forestales, como se detalla a continuación:

#### 6.4.1. Precipitación.

Se recopilaron los datos climáticos provenientes de la Estación Meteorológica de la Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhorn de la FCAYF, UNLP ubicada a siete kilómetros de

la MALP (centroide: Lat. 34 52 S – Long. 57 58 W). El período de toma de datos de esta estación fue de 1998 a la actualidad.

En la MALP, se colocaron dos pluviómetros testigos para medir la precipitación directa (Figura 5), que permitieron corregir las variaciones espaciales de precipitación, a fin de corroborar y adoptar los datos de lluvia de la E.E. Hirschhorn.



Figura 5. Ubicación de dos pluviómetros testigos en el campo y de la Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhorn.

El modelo de planilla adoptado para la toma de datos de los pluviómetros testigos colocados en la MALP, como así también, para la medición de los niveles freáticos (pozos 1 al 7), del flujo caular (collarines en pino y eucaliptos) y precipitación indirecta (pluviómetros bajo canopea), se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Modelo de planilla adoptado para la toma de datos semanales a campo.

Pluviómetro del Campo		Pluviómetro testigo		Día:
Pozo	Medida	Obs.		
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
Pluviómetro	Medida	Collarin	Medida	
Pino avena		Pino avena		
Pino		Pino		
Euc. Calle		Euc. Calle		
Euc.		Euc.		

#### 6.4.2. Evapotranspiración.

La evapotranspiración real se estimó a partir del cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) y posterior balance hídrico. Los métodos tomados para el cálculo fueron: el propuesto por Thornthwaite, el de Penmann modificado por la FAO y el de Blaney-Criddle. Los resultados obtenidos a partir de estos métodos se contrastaron a fin de elegir el más representativo de la MALP (López Cadenas de Llano y Blanco Criado, 1976; Mármol, 2006 y Gaspari *et al.* 2009).

Los factores, ecuaciones y coeficientes que intervienen en cada uno de los métodos se muestran en la tabla 5 a modo de resumen. Información más detallada de cada método puede extraerse de Thornthwaite (1948), Allen *et al.* (1998) y Blaney-Criddle (1950).

Tabla 5. Resumen de los tres métodos de cálculo más usados para la determinación de la ETP, indicando los parámetros o factores asociados, ecuaciones y coeficientes particulares.

Método	Factores	Ecuaciones	Referencias
Thornthwaite	-Latitud -Temperatura media	$E=ct^a=1.6\left(\frac{10t}{I}\right)^a$ $I=\sum i$ $i=\left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$ $a=675\left(I*10^{-3}\right)^3-77.1\left(I*10^{-3}\right)^2+1792*10^5*I+0.49329$	<p><b>E</b>: evapotranspiración potencial mensual en cm para un mes de 30 días de 12 hs de sol cada uno.  <b>c</b> y <b>a</b>: constantes, funciones de I.  <b>t</b>: temperatura media mensual en °C.  <b>I</b>: índice de calor anual, constante para cada lugar.  <b>i</b>: índice de calor mensual.</p>
Penman	-Radiación neta -Velocidad del viento -Presión atmosférica -Tensión de vapor -Temperatura ambiente	$E_p=E*f(u)$ $E=\frac{\Delta R_n+\gamma E_a}{\Delta+\gamma}$ $E_a=f(u)(e_s-e_a)$ $\gamma=0.665\frac{P}{1000}$ $\Delta=\frac{e_s-e_a}{t_s-t_a}$ $f(u)=0.35(0.5+0.01u)$	<p><b>E<sub>p</sub></b>: evapotranspiración potencial  <b>E</b>: evapotranspiración de una hipotética superficie de agua libre  <b>f(u)</b>: función de la velocidad del viento.  <b>R<sub>n</sub></b>: energía radiante neta  <b>Δ</b>:  <b>γ</b>: constante.  <b>e<sub>a</sub></b>: tensión de vapor cuando el aire está saturado a la temperatura t<sub>a</sub>.  <b>e<sub>a</sub></b>: tensión de vapor en el aire en milibares.  <b>P</b>: presión atmosférica en milibares.  <b>e<sub>s</sub></b>: tensión de vapor en la superficie del agua en milibares.  <b>t<sub>s</sub></b>: temperatura de la superficie del agua en °K.  <b>t<sub>a</sub></b>: temperatura de la superficie del aire en °K.  <b>u</b>: velocidad del viento en millas/hora.</p>
Blaney-Criddle	-Temperatura -% de horas de luz -Cubierta vegetal	$E=k\sum_1^m p(0.457t+8.13)$	<p><b>E</b>: evapotranspiración potencial de m meses de período en pulgadas.  <b>k</b>: coeficiente de cultivo propio de cada cubierta vegetal.  <b>p</b>: número de horas de luz del mes en % del número de hs de luz del año.  <b>t</b>: temperatura media del mes en °F.</p>

Los resultados de cada uno de los balances realizados se presentan en formato gráfico indicando, para un ciclo hidrológico promedio, los valores de precipitación media, evapotranspiración potencial (ETP) y evapotranspiración real (ETR) a fin de interpretar el déficit y los excesos de agua correspondientes a la MALP.

### 6.4.3. Escurrimiento.

El escurrimiento superficial es calculado por la aplicación del modelo hidrológico L-THIA GIS (Long-Term Hydrologic Impact Assessment and Non Point Source Pollutant Model). El modelo

hidrológico L-THIA GIS, es empleado para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, constituyendo una herramienta de gran valor para realizar estudios hidrológicos en cuencas hidrográficas. El modelo requiere del conocimiento del tipo y uso de suelo y de las características edáficas de la cuenca en estudio, así como de registros de precipitación. Se basa en la metodología del número de la curva (NC) del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos para cuantificar el escurrimiento superficial.

La metodología empleada consistió en el procesamiento, bajo entorno informático del GIS ArcView 3.2, de información referente al suelo y geología en la MALP. La misma se digitalizó y corroboró a campo y por fotointerpretación de la zona de estudio. Se determinó el uso del suelo, identificando los diversos tipos de cobertura y adaptándolos a los requerimientos del modelo. El procesamiento digital de la base de datos vectorial (usos del suelo y grupos hidrológicos), permitió obtener un mapa de valores de NC para la MALP y finalmente uno de lámina media anual de escurrimiento, tomando los registros de precipitación diaria de la Estación Experimental J. Hirschhorn, correspondientes al período 1998-2009.

El método del número de curva (NC) o curva número fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (S.C.S., 1972) (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990), como un método sencillo para calcular la lluvia efectiva (escurrimiento superficial), en aquellos casos en los que no se tienen datos de aforo, como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad antecedente (Gaspari *et al.*, 2009). Este método establece cuatro complejos denominados grupos hidrológicos (GH), en función de sus condiciones texturales y comportamiento frente a la infiltración. Además, considera las distintas coberturas vegetales y usos del suelo, los tratamientos culturales que estos reciben. La integración de las características edáficas y las de cobertura vegetal generan los denominados complejos suelo – vegetación. Estos complejos en relación a las condiciones de humedad antecedente permiten asignar distintos valores de número de curva (NC) en la MALP como se indica en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de número de curva para suelos con diferentes usos. Adaptado de Gaspari *et al.* (2009).

Uso Suelo	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Pastura, Pastizal o rango de forrajes continuo para pastoreo	Pobre	68	79	86	89
	Medio	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Bosque	Pobre	45	66	77	83
	Medio	36	60	73	79
	Bueno	30	55	70	77
Granjas, construcciones, caminos, lotes circundantes	--	59	74	82	86

En la tabla 7 se muestra la clasificación de la condición de humedad antecedente del suelo en función de la precipitación acumulada ocurrida con una anterioridad de cinco días, según Gaspari *et al.* (2009). La misma, es de gran importancia y debe tenerse en cuenta para la aplicación de este método.

Tabla 7. Condiciones de humedad antecedente en función de la precipitación acumulada de 5 días. Adaptado de Gaspari *et al.* (2009).

Condición	Humedad antecedente del suelo	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)
I	Suelo seco	0 – 12,7
II	Suelo medio	12,7 – 38,1
III	Suelo húmedo (saturado debido a lluvias antecedentes)	> 38,1

Debido a que las tablas de NC se encuentran confeccionadas para la condición de humedad antecedente II, en la tabla 8 se muestra los valores de conversión del NC, que se usaron para adaptar el NC a las otras dos condiciones.



Tabla 8. Cuadro de equivalencias entre las tres condiciones de humedad antecedente. Adaptado de Gaspari *et al.* (2009).

NC		
Condición II	Condición I	Condición III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Obtenidos los números de curva correspondientes al sitio de estudio, se procedió al cálculo del escurrimiento, según el Método del S.C.S., que se presenta en las ecuaciones 7 a 13, donde se expone la secuencia de cálculo del escurrimiento superficial (Gaspari *et al.*, 2009).

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_0} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\frac{(P - I_0 - Q)}{S} = \frac{Q}{(P - I_0)} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$P = Q + I_0 + F \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P - I_0 + S} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$I_0 = 0,2 \cdot S \quad \text{Ecuación 11}$$

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4 \cdot I_0} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{NC} - 1 \right)$$

Ecuación 13

En el gráfico 2 se observa como se descompone la precipitación en el tiempo según López Cadenas del Llano (1998), permitiendo inferir analíticamente cada una de las ecuaciones antes expuestas.

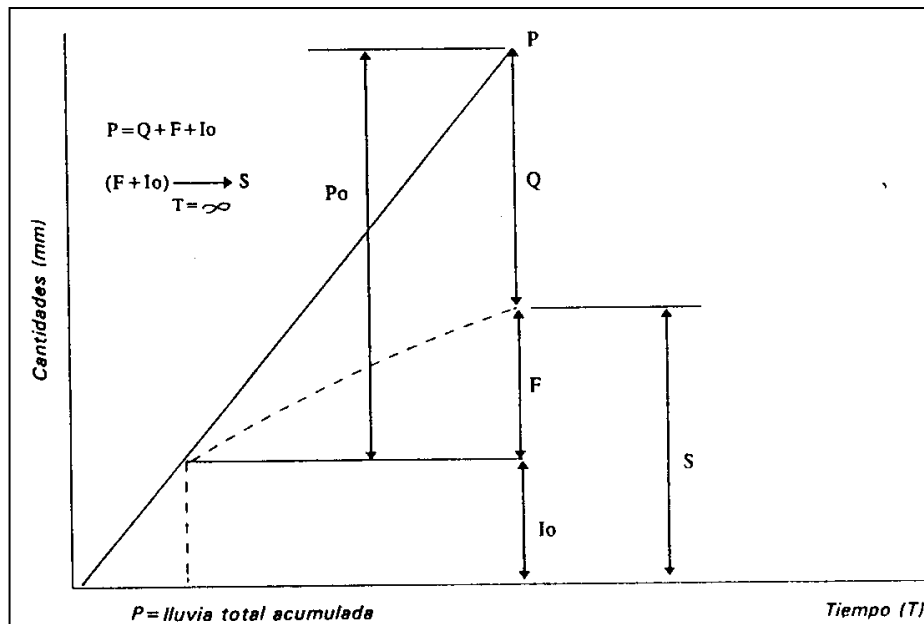


Gráfico 2. Descomposición de la precipitación en el tiempo. Adaptado de López Cadenas del Llano (1998).

Donde:  $P_0$  es la precipitación efectiva;  $P$  es la precipitación total;  $Q$  es el escurrimiento;  $F$  es la infiltración, establecida como abstracciones;  $I_0$  son las pérdidas iniciales; y  $S$  es la abstracción potencial (máxima) de una cuenca luego de producirse el exceso de lluvia.

Para completar el análisis del escurrimiento superficial de campo, se realizaron mediciones con el simulador de lluvias, que se describe en el Apartado 6.5.1.

#### 6.4.4. Infiltración.

Para la determinación de la infiltración, se instaló una red de monitoreo de niveles freáticos consistente en 6 perforaciones de profundidades variables (Tabla 9), engravadas y encamisadas de 63 mm de diámetro, y una perforación abandonada de extracción de agua para ganado. Las perforaciones fueron niveladas y supervisadas semanalmente. Las medidas del pelo de agua, correspondiente al nivel freático, se obtuvieron con una cinta métrica metálica provista de una plomada en la punta (Figura 6).

Tabla 9. Perforaciones de la red de monitoreo freático mostrando la profundidad y cotas, con y sin tapa.

Pozo	Profundidad (m)	Cota s/tapa (msnm)	Cota terreno (msnm)
1	12	24.81	24.66
2	12	26.31	26.13
3	11.75	23.54	23.3
4	10.10	25.46	25.29
5	11.5	24.53	24.36
6	11.5	24.05	23.88
7	100	25.1	24.87



Figura 6. Cinta métrica adaptada para medición de nivel freático.

El cálculo de la infiltración surge de la suposición de que los cambios en el nivel freático son debidos primordialmente al agua superficial que llega a capas inferiores por el proceso de infiltración o movimiento vertical de agua en el perfil. A este respecto, Eamus *et al.* (2006) explica que cuando hay un cambio en las reservas de agua subterránea (agua freática), ya sea por aporte o remoción, se produce un cambio en el nivel freático sustancialmente mayor que el equivalente en agua. Esto quiere decir que un aporte de agua hacia niveles profundos de por ejemplo 20 mm,

significan un aumento del nivel freático mucho mayor debido al espacio que ocupan las partículas terrosas, haciendo que ese volumen de agua de 0.02 m<sup>3</sup> por m<sup>2</sup> de superficie (2 mm), se magnifique en función de la porosidad del suelo, tal como muestra la ecuación 14:

$$\Delta H = \frac{\Delta h}{S_y} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:  $\Delta H$ , es el cambio en la altura de la capa freática;  $\Delta h$ , es la adición de agua en equivalentes de profundidad y  $S_y$ , es el rendimiento específico o porosidad efectiva (Custodio y Llamas, 1996)

Para el cálculo de infiltración en la Microcuenca del Arroyo La Paloma, se consideró como nulo el flujo horizontal a nivel subterráneo, debido a que presenta valores poco significativos, y se adoptó un valor de porosidad eficaz de los sedimentos del suelo igual a 0.1. El valor de porosidad establecido, responde a una media tomada de experiencias efectuadas en áreas circundantes a la MALP, que indican valores de 0.08 (Auge, 1995b) a 0.11 (Gonzalez *et al.*, 1997).

Los datos de Infiltración provenientes de la red de monitoreo de niveles freáticos fueron validados a campo por medio del simulador de lluvias (apartado 6.5.1) y con mediciones realizadas con un infiltrómetro de anillo simple. Este último instrumental, consta de anillos de infiltración que sirven para hacer ensayos que determinan la permeabilidad en suelos, simulando el proceso de infiltración del agua en el suelo desde áreas de inundación amplias. Bouwer (1960) asegura que los gradientes laterales, que se presentan en los anillos simples como el mayor de los errores de medición.

El infiltrómetro utilizado para la experiencia fue desarrollado en el Instituto de Suelos de Castelar – Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN) – INTA. Consiste en un anillo simple de metal, de 21 cm de diámetro interno por 12 cm de alto y 3 mm de espesor, que se clava unos 6 cm en el suelo. Sobre el cilindro clavado se coloca un frasco invertido de tipo Mariotte de 1 litro de capacidad, graduado en mm, a través del cual se eroga agua en forma de lámina continua

de 1 mm a presión constante. En la figura 7 se presenta el instrumental en el momento de medición en un ensayo realizado en la MALP.



Figura 7. Infiltrómetro de anillo simple.

Los ensayos de infiltración con anillo simple se realizaron con una humedad del suelo a capacidad de campo según la relación entre la precipitación pluvial y el contenido de humedad del suelo establecida por el USDA-SCS (1964) (Tabla 10).

Tabla 10. Relación entre la precipitación pluvial y el contenido de humedad del suelo. Adaptado de USDA-SCS (1964).

Estado de humedad del suelo	Total de lluvia caída en los Últimos 5 días	
	Invierno	verano
Bajo contenido de humedad	- de 13 mm	de 35 mm
Contenido Intermedio	13 a 28 mm	35 a 55 mm
Próximo a capacidad de campo	+ de 28 mm	+ de 55 mm

El modelo de planilla utilizado para la toma de los datos a campo, se muestra en la tabla 11:



medio de medición, en parcelas de 100 m<sup>2</sup>, del número de árboles en pie, árboles faltantes, densidad de plantación, altura media, diámetro medio y porcentaje de cobertura del dosel.

En cada parcela se colocaron dos (2) colectores del flujo caulinar en árboles representativos de los rodales seleccionados de Pino y Eucaliptus en la MALP, representados en dos parcelas con pino y dos con eucaliptos. Los colectores de flujo consisten en una banda de papel aluminio sujeta inicialmente con un hilo de carnicero a modo de corbata alrededor de una sección en bisel de los árboles elegidos, a 1,3 m de altura aproximada. Luego, se moldea el papel aluminio a modo de canaleta y se forra con masilla para evitar filtraciones. Finalmente, se coloca una manguera transparente de 8 mm de diámetro por medio de fijaciones PY de nylon, a fin de conducir el flujo caulinar hacia un colector calibrado de 60 lts de capacidad.

En la figura 8, se muestra el proceso de instalación de un colector de flujo caulinar en un árbol de pino, iniciando con una limpieza superficial de la corteza (imagen número 3 de la Figura 8, contando de arriba abajo y de izquierda a derecha), a fin de minimizar la posibilidad de filtraciones (esto no fue necesario en eucalipto), y continuando con la colocación de un cordón de masilla a modo de corte en bisel (minima inclinación para que escurra el agua, imagen 4), la colocación de una banda de papel aluminio plegada (imagen 5), la sujeción con hilo y doblado de bordes a modo de canaleta colectora (imagen 6, 7), la colocación de fijaciones PY de nylon (imagen 7 a 10), el forrado del interior de la canaleta colectora con masilla (imagen 8) y colocación de la manguera transparente que conecta al tambor graduado de 60 lts (imagen 10 a 13).



Figura 8: Secuencia de imágenes (de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha) indicando la instalación de un colector de flujo caulinar en un árbol de pino.

La medición de la precipitación interna se realizó a partir de la instalación de pluviómetros de embudo en cada parcela (dos en pino y dos en eucalipto) a 1.3 metros de altura, con un diámetro de boca de 20 cm (superficie de captación = 314 cm<sup>2</sup>), y un recipiente contenedor de 2.4 lts de capacidad aproximada.

En la figura 9 se muestra el procedimiento de instalación de los pluviómetros y todo el instrumental utilizado. Además se presenta una vista lateral de un pluviómetro dentro del rodal de



pino y otro dentro del rodal de eucalipto y, una vista de la cobertura forestal que cubre cada uno de los pluviómetros.



Figura 9: Secuencia de imágenes mostrando el instrumental necesario para la fabricación de los pluviómetros, una vista lateral en cada uno de los rodales y la cobertura forestal sobre cada uno de ellos.

Las mediciones de flujo caulinar y las de precipitación interna en las parcelas fueron tomadas semanalmente desde el 18/07/2008 lográndose datos confiables, de ajuste y logística, a partir del 26/01/2009 hasta el presente.

## 6.5. APLICACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

### 6.5.1. Simulador de llluvias.

Se realizaron ensayos de cuantificación del caudal líquido superficial emitido en sitios de interés, a fin de establecer el rango de la infiltración – escorrentía por medio del simulador de

lluvias. Esta metodología permitió obtener valores reales de escurrimiento e infiltración en la MALP, para validar a campo los datos estimados a través de los distintos modelos aplicados en gabinete.

El uso del simulador de lluvia, permitió además el registro de los sedimentos emitidos en cada ensayo, permitiendo su extrapolación espacial a nivel de la microcuenca. El agua colectada en cada parcela de muestreo fue filtrada en laboratorio para cuantificar el material en suspensión y sedimentos precipitados. Posteriormente, se secó al aire libre y se pesó en una balanza analítica. Con estos datos se obtuvo el valor promedio de sedimentos emitidos a nivel mensual y anual de la MALP y para el período estudiado.

El simulador de lluvia ha sido utilizado durante los últimos años para realizar investigaciones sobre erosión y escurrimiento, tanto a campo como en laboratorio (Delgado, 2009). Hudson (1997) caracteriza a los simuladores de lluvias como instrumentos de suma utilidad en estudios de infiltración-escurrimiento ya que, en estos, no es necesario simular lluvias con características exactamente iguales a las naturales, además, indica que los microsimitadores resultan idóneos para estudios de erosionabilidad relativa. Irurtia y Mon (1994), por su parte, mencionan que los resultados obtenidos con el microsimitador de lluvias son muy satisfactorios, debido a que reflejan el modo en que las características del complejo suelo/cobertura inciden sobre la infiltración del suelo, tratándose además, de una determinación rápida y sencilla que puede repetirse en el campo varias veces y a un bajo costo relativo.

El simulador utilizado fue desarrollado en el Instituto de Suelos de Castelar – Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN) – INTA. Consiste en una estructura de hierro de sección cuadrangular de 50 cm x 50 cm y 1.5 m de altura provista de una base de hierro reforzada de 25 cm, que conforma la microparcela de medición, que se entierra en el suelo a modo de límite de escurrimiento e infiltración. En la parte superior de esta estructura se coloca una placa con goteros de 0.5 mm de diámetro, alimentada a través de un depósito de agua, que permite la simulación de lluvias con intensidades de 0 a 300 mm/h y con una energía cinética de lluvia de 13 kJ/m<sup>2</sup>.m (13 kilojoules por m<sup>2</sup> de superficie por metro de lluvia). Los laterales de la estructura son

protegidos con polietileno transparente. Por último, en la base posee un colector de escurrimiento superficial (Irurtia y Mon, 1994), el cual permite, además, estimar la emisión de sedimentos.

En la figura 10 se muestra una secuencia fotográfica de instalación y medición con el simulador de lluvia utilizado en la MALP.



Figura 10. Simulador de llluvias. Secuencia de medición.

Las planillas para el registro de datos a campo, se presentó en la tabla 11 de la sección 6.4.4. A continuación se muestra la ubicación de los ensayos realizados (Figura 11):

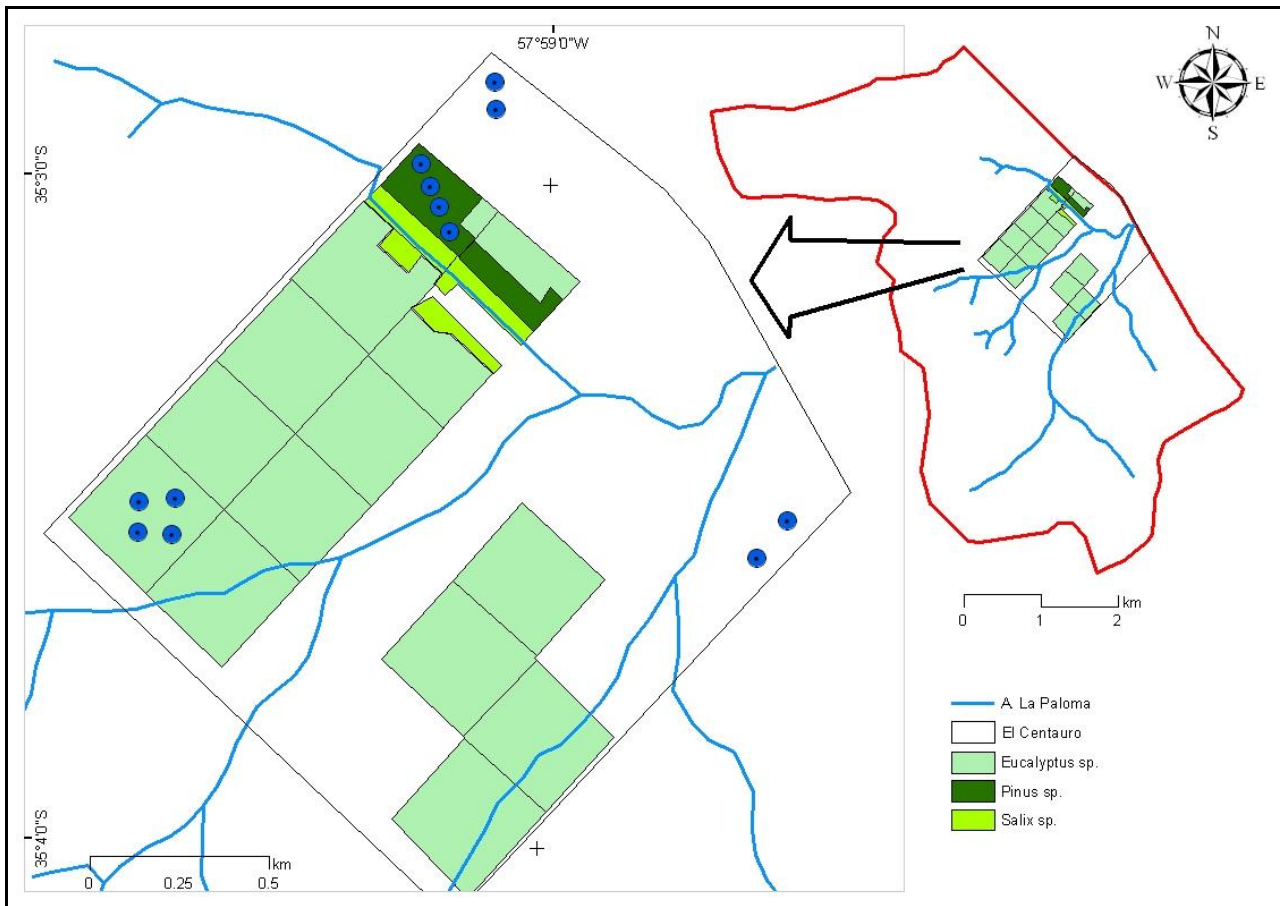


Figura 11. Estancia El Centauro mostrando las distintas forestaciones y la ubicación de los ensayos de simulación de lluvias con puntos azules.

### 6.5.2. Perfiles del suelo.

El análisis de los perfiles del suelo se realizó a partir de perforaciones realizadas con barreno de tipo Edelman (Figura 12) y la observación directa del material extraído. En la figura 13 se muestra los sitios en donde fueron realizadas las perforaciones.



Figura 12. Barreno de mano tipo Edelman con tramos múltiples de 1 m de largo cada uno.

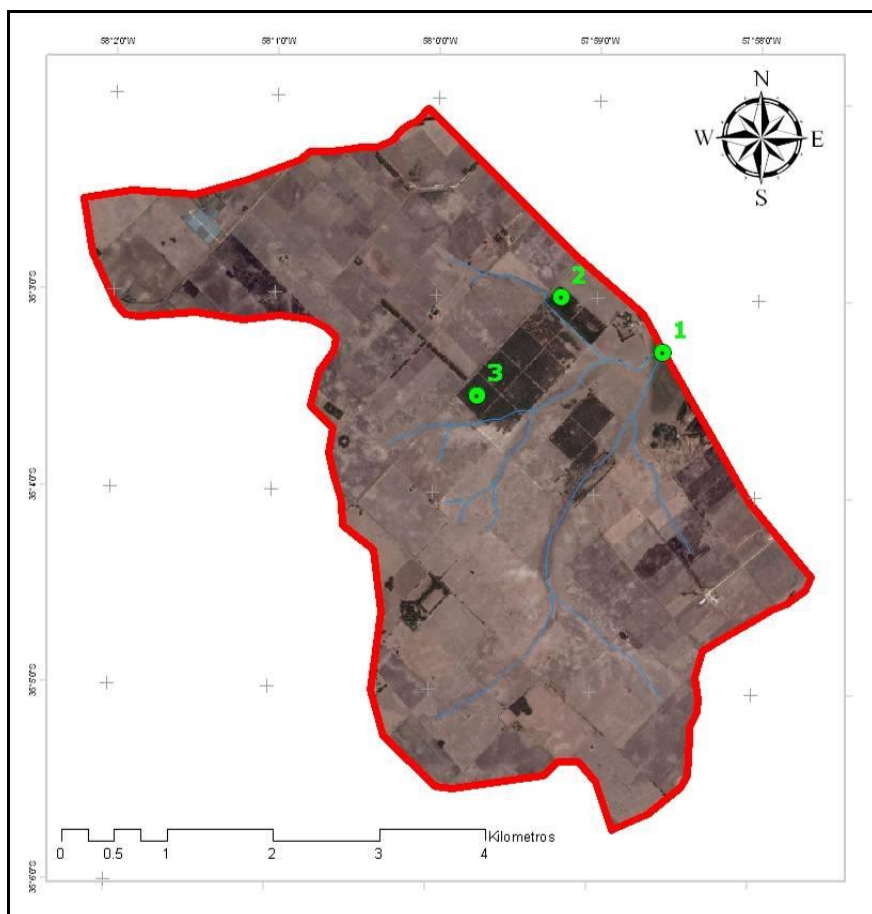


Figura 13. Ubicación de las perforaciones para análisis de perfiles.

### 6.5.3. Emisión de sedimentos.

La emisión de sedimentos espacio temporal o pérdida de suelo por erosión hídrica (en toneladas por hectárea, por año), para la microcuenca La Paloma se realizó por medio de la implementación de un modelo cartográfico cuantitativo desarrollado específicamente bajo la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE: Universal Soil Loss Equation). La USLE fue establecida por Wischmeier y Smith en el año 1978 con el objetivo de predecir la tasa de erosión hídrica, en función de parámetros de clima, suelo, relieve, cobertura del suelo y la aplicación o no de prácticas conservacionistas.

El modelo USLE responde a la ecuación 16, cuyos componentes fueron calculados y representados en formato digital a través del SIG ArcGis 9.2 ®. La utilización del programa permitió una identificación precisa de los componentes de la USLE en el espacio y su

procesamiento para la obtención de un mapa de pérdidas de suelo superficial, a fin de ser comparado con el resto de la información digital que compone la base de datos georreferenciada de la microcuenca.

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Ecuación 16

Donde: **A**, es la pérdida de suelo actual ( $t.ha^{-1}.año^{-1}$ ); **R**, el factor de erosividad de las lluvias ( $J.cm.m^{-2}.h^{-1}$ ); **K**, el factor de susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica ( $t.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$ ); **LS**, la combinación de los factores L y S (factor topográfico, adimensional); **L**, el factor de longitud de pendiente (adimensional); **S**, el factor de gradiente de pendiente (adimensional); **C**, el factor de cultivo o cobertura del suelo (adimensional) y **P**, el factor de práctica conservacionista (adimensional).

A continuación se presenta un detalle descriptivo de la determinación de cada factor que integra la USLE.

El factor **R** (índice de erosión pluvial o de erosionabilidad del aguacero) representa el potencial que posee el aguacero para erosionar la superficie del suelo (Irurtia *et al.*, 2007). Como valor **R** se tomó el publicado por Rojas y Conde (1985), correspondiente al valor promedio para el partido de La Plata.

El factor **K** (erosionabilidad del suelo) representa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la estabilidad estructural del mismo (Irurtia *et al.*, 2007). Para su cálculo se tomaron los valores granulométricos de Hurtado *et al.* (2006) para el partido de La Plata, y se aplicó la ecuación de **K** simplificada presentada por Mintegui Aguirre, J. A. y F. López Unzú (1990), ecuación 17 y 18:

$$K = 10^{-6} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - a)$$

Ecuación 17

$$M = [(\% \text{ limo} + \text{arena muy fina}) * (100 - \% \text{ arcilla})]$$

Ecuación 18

Donde **a** representa el porcentaje de materia orgánica y es igual al % de carbono \* 1.724.

El factor **LS** (factor topográfico) integra los factores **L** y **S** para su cálculo en conjunto y establece el aporte e influencia del relieve a la erosión hídrica superficial (Irurtia *et al.*, 2007). Su valor se obtuvo de aplicar la ecuación de **LS** para pendientes menores al 9% presentada por Wischmeier y Smith (1978) y modificada por López Cadenas del Llano (1998) (Ecuación 19). El valor de  $\lambda$  proviene de la ecuación propuesta por Williams y Berndt (1976) (Ecuación 20) y el valor de pendiente (**s**) fue calculado de forma automática con la función Slope del SIG ArcGis 9.2®.

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^{0.3} * \left( \frac{0.43 + 0.30 * s + 0.043 * s^2}{6.613} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\lambda = 0.5 * \frac{\Omega}{\Sigma L} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:  $\lambda$  es la longitud de la pendiente; **s** es el porcentaje de pendiente;  $\Omega$  es la superficie de la cuenca en km<sup>2</sup> y **L**, la sumatoria de la longitud total de los cauces expresada en km.

El factor **C** (ordenación de cultivos), se describe como la relación entre el valor de pérdidas del suelo en un campo con vegetación o cultivos y las pérdidas ocurridas en un suelo en *barbecho*<sup>49</sup>, siendo el resto de las condiciones iguales en ambos casos (Irurtia *et al.*, 2007). El valor de **C** surge de valores tabulados para los distintos tipos de cultivo, para lo cual fue necesario consultar las tablas publicadas por Wischmeier y Smith (1978); López Cadenas del Llano (1998); Mintegui Aguirre, J. A. y F. López Unzú (1990); Kirkby y Morgan (1994), y Gil Ribes, *et al.* (2004).

El factor **P** (control de erosión mediante prácticas de cultivo) considera las distintas prácticas de cultivo y su efecto en la reducción de la erosión (Irurtia *et al.*, 2007). Su valor en la MALP se redefinió como 1, debido a que en el sitio de estudio no se aplican prácticas de cultivo.

## **6.6. ANÁLISIS DE PROCESOS HIDROLÓGICOS Y MODELO CONCEPTUAL DE EFECTOS DE LA MASA FORESTAL.**

La evaluación del comportamiento hidrológico regional se inició sobre la base de la información antecedente y relevamientos generales de campo. Además se realizó un análisis de los datos de precipitaciones, variaciones del nivel freático y del escurrimiento fluvial tomados en las parcelas experimentales.

La definición de particularidades de la influencia local de forestaciones en los procesos hidrológicos, se realizó con especial referencia a los excesos de agua.

Se efectuó un análisis de la influencia de la masa forestal en el ciclo hidrológico, generándose un modelo comparativo entre la situación natural y la existente con la forestación. A su vez, se simularon los posibles efectos ante un incremento o disminución del área forestada en la microcuenca en estudio.

## **6.7. CRITERIOS DE MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.**

Se elaboraron pautas de gestión de los recursos hídricos y forestales tendientes a evitar la degradación del suelo y agua y prevenir aquellos que puedan presentarse en un futuro como consecuencia de las actividades humanas en la microcuenca estudiada.



## **7. RESULTADOS.**

### **7.1. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.**

Dentro de los antecedentes recopilados se pueden destacar los trabajos de carácter hidrogeológico realizados en el Partido de La Plata por el Dr. Eduardo Kruse y su grupo de trabajo de la cátedra de Hidrología General de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la UNLP; por el Dr. Auge de la UBA y del Dr. Hurtado del Instituto de Geomorfología y Suelos (IGS) - Centro de Investigación de Suelos y Aguas de Uso Agropecuario (CISAUA) UNLP. Con respecto al ciclo hidrológico e interacción entre vegetación y suelo se contó con los trabajos del Dr. Jobbágy y Dr. Zimmerman. En lo que respecta a geología superficial y geomorfología se dispuso de trabajos de las cátedras de Geología del Cuaternario y Geomorfología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo y para el uso y manejo de instrumental, con la experiencia y trabajos del Ing. Mg. Irurtia del INTA Castelar.

Se analizó, además, cuantiosa bibliografía proveniente de la Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, que contiene alrededor de 662 títulos, entre libros y publicaciones, con información vigente y actualizada, de los que al menos 300 títulos se encuentran relacionados al tema de tesis.

Se realizaron viajes para consultar las bibliotecas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Castelar, específicamente, los Institutos de Suelos y de Clima y Agua.

Se dispuso de datos meteorológicos diarios provenientes de la Estación Experimental Ing. Agr. J. Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP (Período: 1989-actualidad), y datos mensuales correspondientes al período 1911 a la actualidad. Estos incluyen: temperatura media, máxima y mínima del aire; temperatura del suelo, radiación solar, presión barométrica, velocidad y dirección del viento (h=3.6 m), precipitaciones diarias acumuladas, intensidades máximas de precipitación, ETP y humedad relativa.

La cartografía de suelos, en escala 1:50000 fue obtenida de dos fuentes distintas. Una de ellas es del estudio denominado “Análisis Ambiental del Partido de La Plata” (Hurtado, 2006); la otra, de la página GeoINTA (<http://geointa.inta.gov.ar/>), creada por el instituto de Clima y Agua del INTA Castelar, y disponible, a la vez, en el Instituto de Suelos del INTA Castelar.

Las imágenes Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM utilizadas, se obtuvieron de la página del IMPE ([http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/index\\_pt.php](http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/index_pt.php)).

Se compraron las fotos aéreas 1:20000 correspondientes al Censo Agropecuario de 1996, las cartas topográficas y cartas imágenes del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

## **7.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

### **7.2.1. Localización Geográfica de la MALP.**

La microcuenca del Arroyo La Paloma (MALP) posee su centroide en las siguientes coordenadas geográficas:

$x = 57^{\circ} 59' 35''$       Longitud Oeste

$y = 35^{\circ} 03' 45''$       Latitud Sur

En la figura 14, se muestra la ubicación de la MALP con respecto a la cuenca El Pescado y subcuenca La Escondida, con una distribución sobre la cabecera de la cuenca, limitada de forma natural por la divisoria general de aguas. Presenta un límite inferior acotado por la Ruta Provincial Nro. 36.

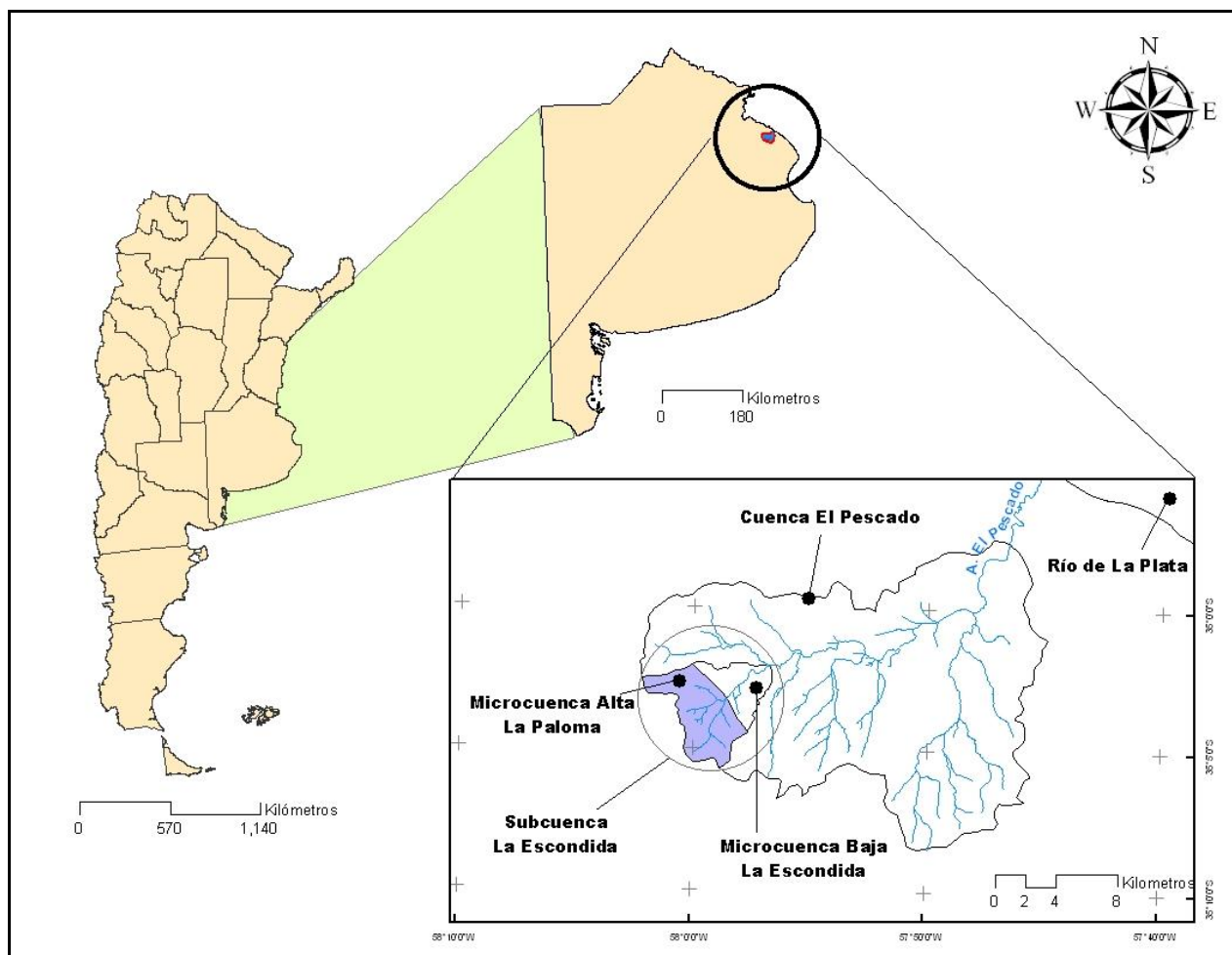


Figura 14. Ubicación de la microcuenca alta del A. La Paloma, dentro de la subcuenca La Escondida, y cuenca del A. El Pescado.

### 7.2.2. Estancia El Centauro.

La Ea. El Centauro, se encuentra situada sobre la Ruta Provincial Nro. 36 entre los kilómetros 65 y 66 a unos 20 km de la ciudad de La Plata, partido al cual pertenece (Figura 15). Antiguamente, se la conocía como “La Horquilla” y se sitúa a la salida de la microcuenca alta del arroyo La Paloma.

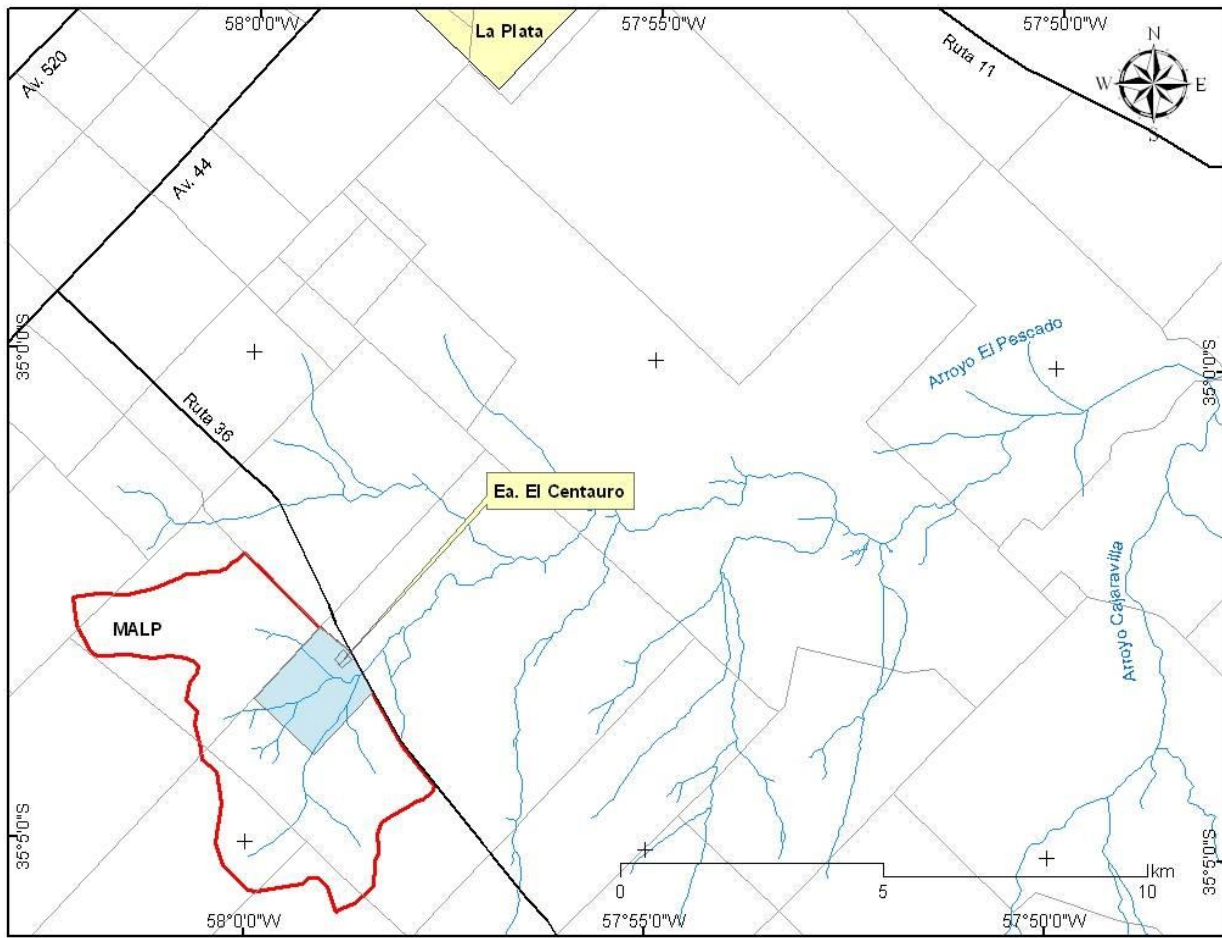


Figura 15. Estancia El Centauro, ubicación y vías de acceso en la MALP.

El predio posee una superficie de 300 ha (14 % de la superficie total de la microcuenca), de las cuales, 6.5 ha están ocupadas por plantaciones de *Pinus radiata* Don; 91 ha de *Eucalyptus viminalis* Labill y 3 ha de *Salix sp.*; 57 ha están destinadas a la rotación de especies forrajeras (avena, maíz, sorgo), y el resto de la superficie corresponde a pastizal natural modificado (Figura 16).

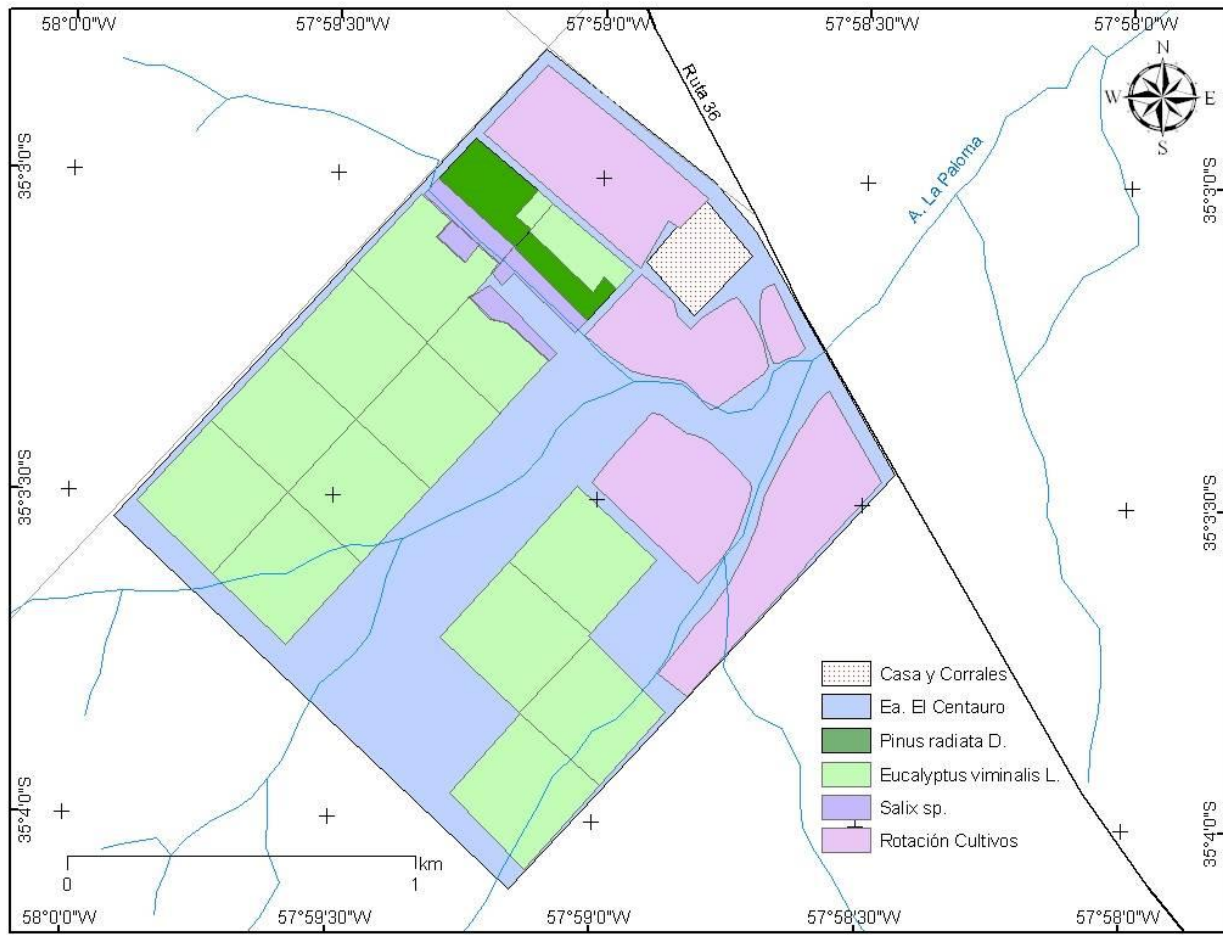


Figura 16. Ea. El Centauro y usos del suelo.

### 7.2.3. Morfometría de la MALP.

A continuación se presentan los resultados del análisis de las características morfométricas y funcionales de la MALP, establecida a través de la determinación de parámetros de forma, de relieve y relativos a la red hidrográfica.

#### 7.2.3.1. Forma de la cuenca.

$$\text{Perímetro}^{32} (P) = \mathbf{22.74 \text{ km}}$$

$$\text{Longitud axial}^{33} (La) = \boxed{5.66 \text{ km}}$$

$$\text{Área}^{34} (A) = \boxed{21.41 \text{ km}^2}$$

$$\text{Factor de forma}^{35} (Ff) = \boxed{0.668}$$

$$\text{Índice de compacidad}^{36} (Kc) = \boxed{1.382}$$

### 7.2.3.2. Relieve de la cuenca.

*Curva hipsométrica*<sup>37</sup>:

En el gráfico 3 se observa la curva hipsométrica correspondiente a la MALP, cuya lectura permite establecer las áreas comprendidas entre las distintas cotas, como por ejemplo, que el 100% de la cuenca se distribuye en cotas superiores a los 16 msnm; el 50% sobre los 23 msnm, y el 5% sobre los 26 msnm.

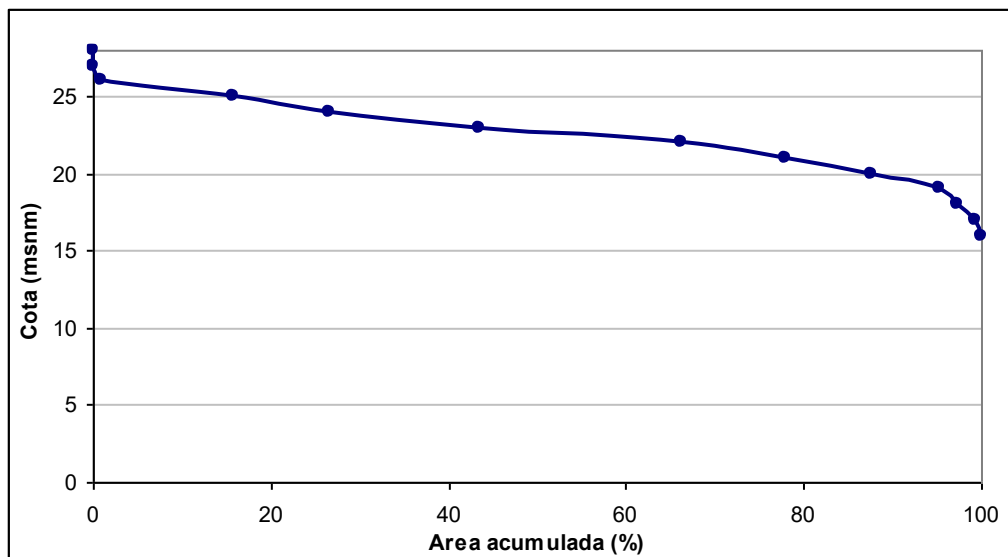


Gráfico 3. Curva hipsométrica correspondiente a la MALP.

En el gráfico 4, se muestra la *curva hipsométrica relativa*<sup>38</sup> para la MALP, a fin de compararla con las curvas hipsométricas características del ciclo de erosión según Strahler (Gaspari *et al.*, 2009). De esta comparación surge una aproximación de la fase de vida en la que se encuentra el Arroyo La Paloma, siendo lo más acertado, asignarle una clase B intermedia, indicativa de una cuenca en equilibrio o fase de madurez (Glosario de términos).

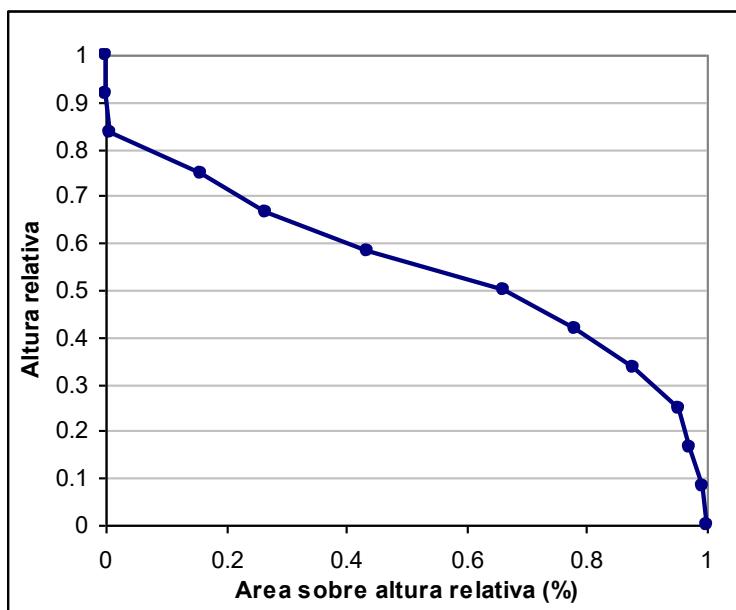


Gráfico 4. Curva hipsométrica relativa correspondiente a la MALP.

Relación hipsométrica<sup>39</sup> (*Rh*): **0.67**

Altura media<sup>40</sup> (*Hm*): **21.55**

Pendiente media<sup>41</sup> (*PM*): **0.5 %**

Coefficiente de rugosidad<sup>42</sup> (*Ra*): **0.32**

Orientación de la cuenca<sup>43</sup>: **Noreste-Este**

### 7.2.3.2. Red de drenaje.

Densidad de drenaje<sup>44</sup> ( $Dd$ ): **0.6839 km<sup>-1</sup>**

Pendiente media del cauce<sup>45</sup> ( $J$ ): **0.1811 %**

Tiempo de concentración<sup>46</sup> ( $Tc$ ): **9.61 hs**

Número de orden de los cursos de agua<sup>47</sup>, según el criterio de Schumm: Figura 17

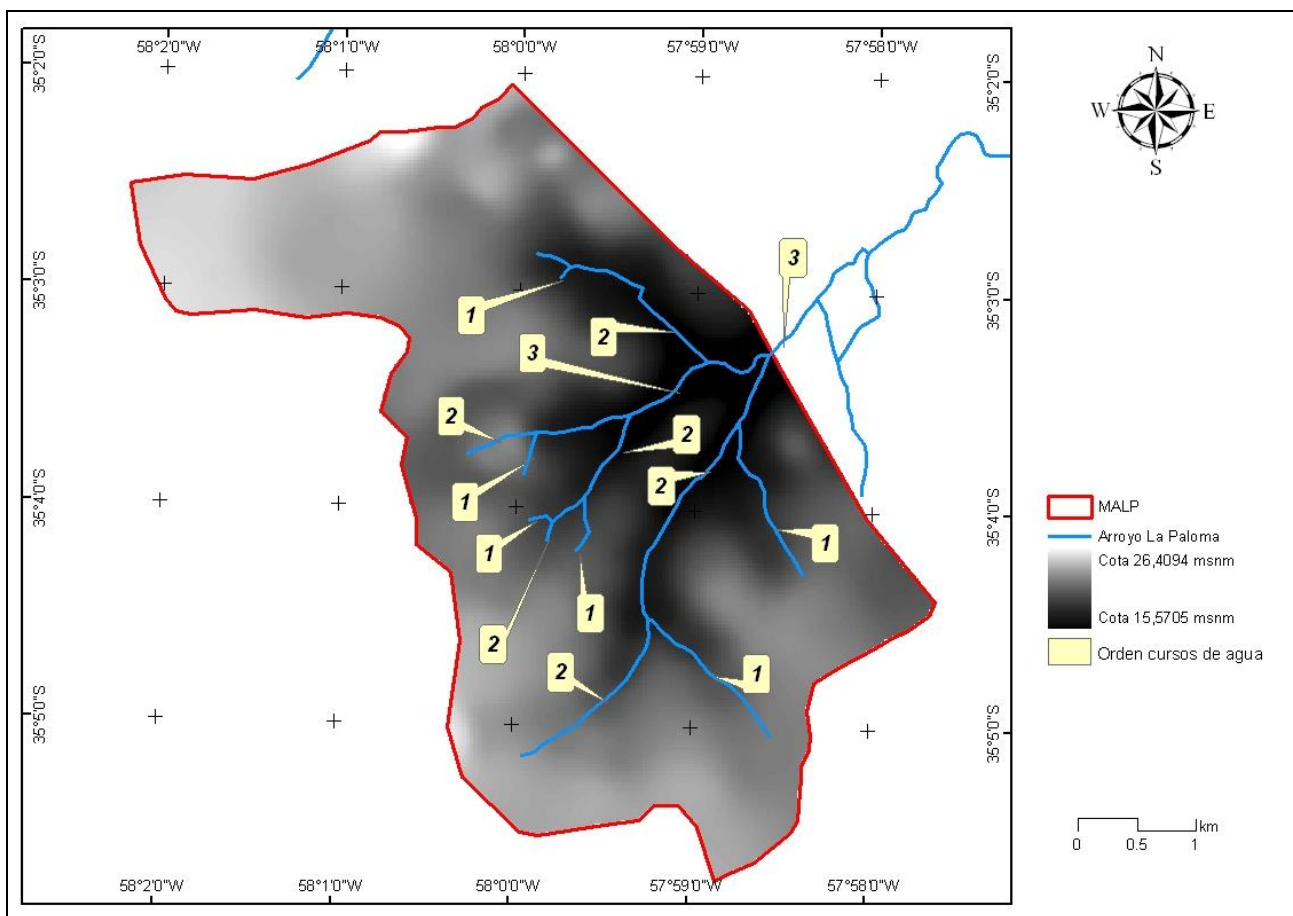


Figura 17. Microcuenca Arroyo La Paloma mostrando el modelo de elevación del terreno (dem), la red hidrográfica y el orden de los cursos de agua según la metodología de Horton.

Los resultados alcanzados con el análisis morfométrico permitieron definir la influencia de la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia. Estos resultados indican una concentración del escurrimiento característico de una cuenca oval - oblonga, con sus tributarios dispuestos radialmente que desembocan en un punto central.



Según López Cadenas de Llano (1998), la clasificación de pendientes medias de la MALP, se corresponden a un tipo de pendiente plano a muy plano, expresado al mismo tiempo en la baja rugosidad ( $R_a$ ). La orientación de la cuenca queda expresada hacia el NEE, con la pendiente natural hacia el Río de La Plata.

En relación a los parámetros relativos a la red hidrográfica, la MALP exhibe una densidad de drenaje media con pendientes medias bajas y alto tiempo de concentración lo que determina caudales picos más atenuados y por lo tanto mayor tiempo de permanencia de agua en el campo (mayor tiempo de recesión).

#### **7.2.4. Suelos.**

En la figura 18 se muestra un mapa georreferenciado de los suelos correspondientes a la Microcuenca de La Paloma en escala 1:50000. Un detalle de los códigos utilizados para la diferenciación de los tipos de suelo, junto con el porcentaje de ocupación ellos en la microcuenca, se muestran en la tabla 12.

La Microcuenca del Arroyo La Paloma ocupa el Dominio Edáfico 9 (I.N.T.A., 1989). El paisaje está representado por planicies muy suavemente onduladas que presentan, como característica particular, un complejo edáfico compuesto por los tipos de suelos Natracualf típico, fino, y Cromudert acuéntico, muy fino, con limitaciones de alcalinidad sódica a menos de 50 cm de profundidad y drenaje deficiente por impermeabilidad.

Los suelos presentan moderadas limitaciones para el uso agrícola, que se expresan a través de un drenaje imperfecto ubicados en vías de escurrimiento incipientes o depresiones que permanecen anegadas durante períodos significativos. (Hurtado *et al.*, 2006)

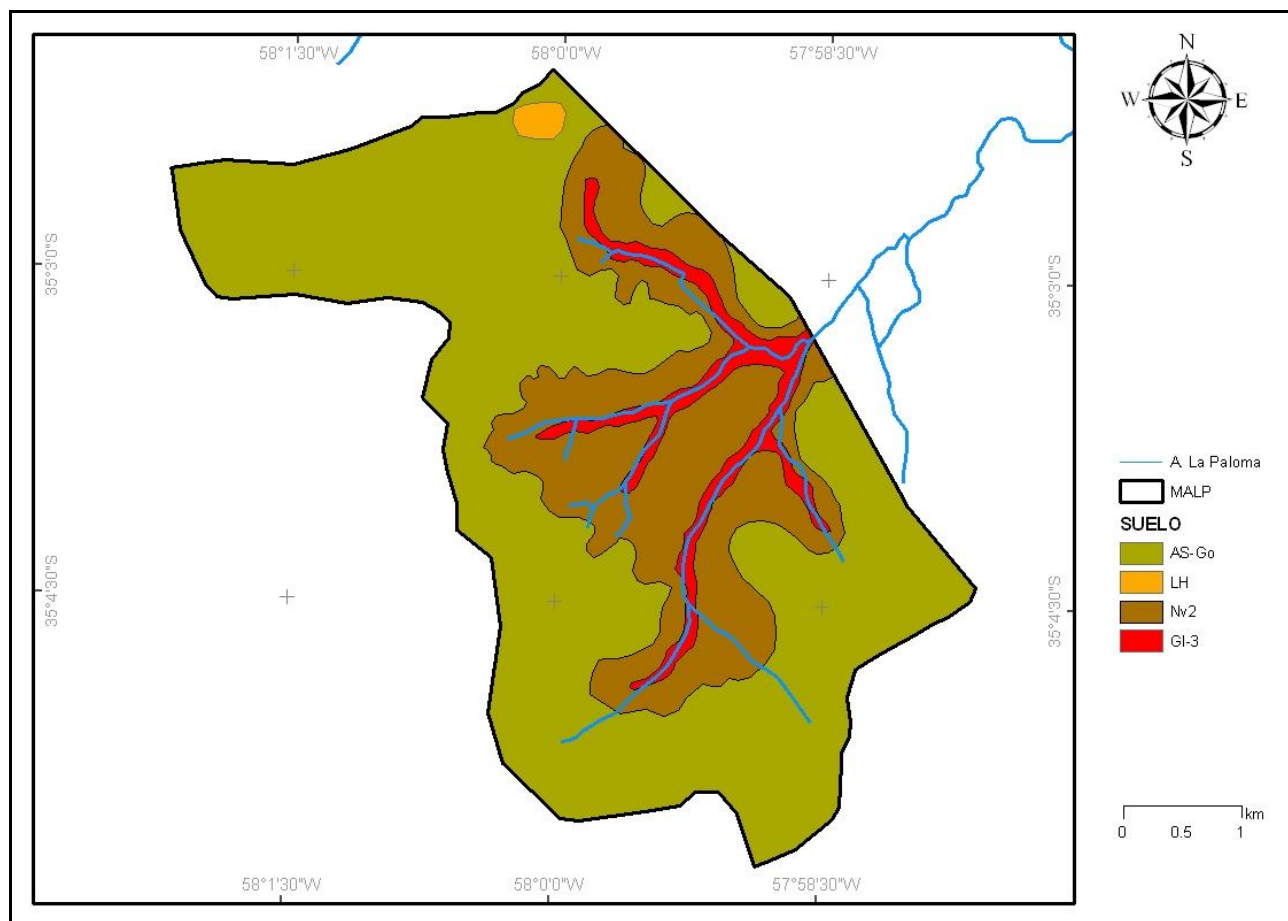


Figura 18. Mapa georreferenciado de los suelos pertenecientes a la MALP.

Tabla 12. Detalle de los distintos códigos utilizados para diferenciar los suelos de la MALP.

Unidad cartográfica	Unidad taxonómica	Superficie (%)
AS-Go	Unidad propia de divisorias de cuenca. Constituida por interfluvios planos a muy suavemente ondulados, donde alternan microcubetas y lomas convexas. Drenaje moderadamente bueno con restricciones por cercanía de horizonte B arcilloso de lenta permeabilidad con la superficie, provocando anegamientos por períodos significativos de tiempo.	68
LH	Unidad correspondiente a suelos ubicados en cubetas y áreas plano-cóncavas. Presentan anegamientos prolongados y alta expansividad de los horizontes Btss. Por lo que la actividad agrícola se encuentra limitada gravemente.	1
Nv2	Unidad propia de interfluvios planos con pendientes suaves y muy extensas. Presenta franjas ligeramente deprimidas con suelos erosionados a pesar de las bajas pendientes, producto de la baja estabilidad estructural derivada del efecto dispersante del sodio y la baja velocidad de infiltración, sobre todo por encostramiento superficial. Susceptible a anegamientos prolongados.	26
GI-3	Unidad correspondiente a suelos ubicados sobre planicies de inundación, caracterizados por una planicie aluvional muy extensa. Suelos de fuerte desarrollo, generalmente con horizontes Bt bien expresados y rasgos vérticos. Rasgos hidromórficos bien marcados, moteados y concreciones en superficie y horizontes gleizados por niveles altos de freática gran parte del año.	5

### 7.2.5. Hidrografía.

La red hidrográfica de la cuenca del Arroyo El Pescado y en especial, la de la MALP, se definió a partir de la digitalización en pantalla sobre imágenes procesadas del Google Earth ®. Esta red hidrográfica digital se trabajó mediante comparación y solapamiento con toda la cartografía disponible y generada con la misma referencia, como ser: cartas topográficas digitalizadas y georreferenciadas provenientes del IGN (escala 1:50000), información digital de GeoINTA ([www.geointa.gov.ar](http://www.geointa.gov.ar)), Atlas de suelos de la República Argentina, SIG 250, fotografías aéreas e imágenes satelitales. Este procesamiento permitió delimitar una red hidrográfica en forma completa y definida geográficamente, la cual puede ser representada fielmente en el terreno, como se expresa en la figura 19.

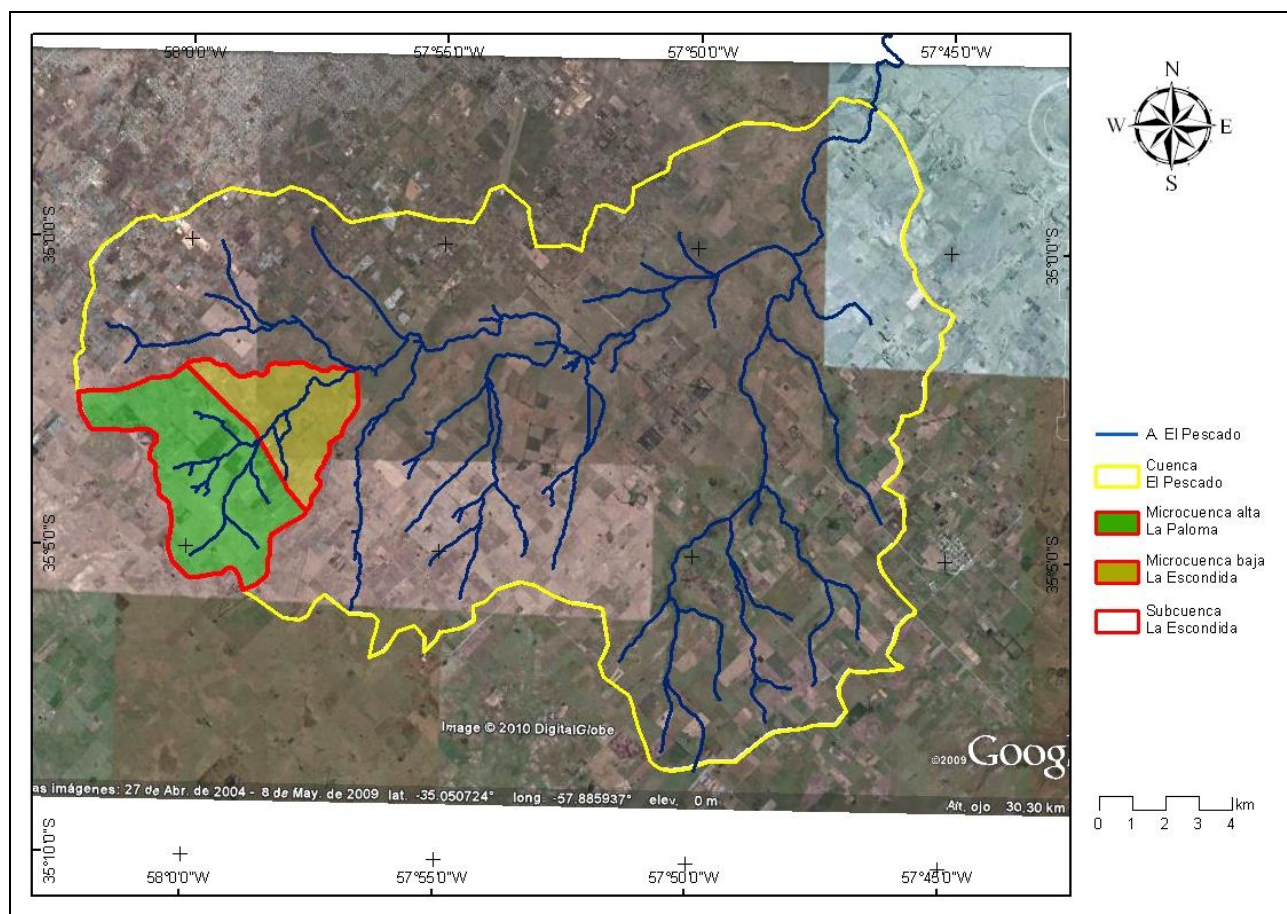


Figura 19. Cuenca del Arroyo El Pescado y Microcuenca del A. La Paloma mostrando la red hidrográfica sobre una imagen procesada del Google Earth ®.

### 7.2.6. Vegetación.

Se confeccionó un mapa de vegetación general para la microcuenca del Arroyo La Paloma (Figura 20), en donde se identificaron 4 tipos de cubierta: forestación, cultivos forrajeros en rotación (Avena/Trigo/Sorgo), hortalizas cultivadas al aire libre y en invernáculos (Cultivos agrícolas), y pastizal natural modificado. Los porcentajes de cobertura de cada uno de estos grupos vegetales, en relación a la superficie total de la MALP, se muestran en la tabla 13.

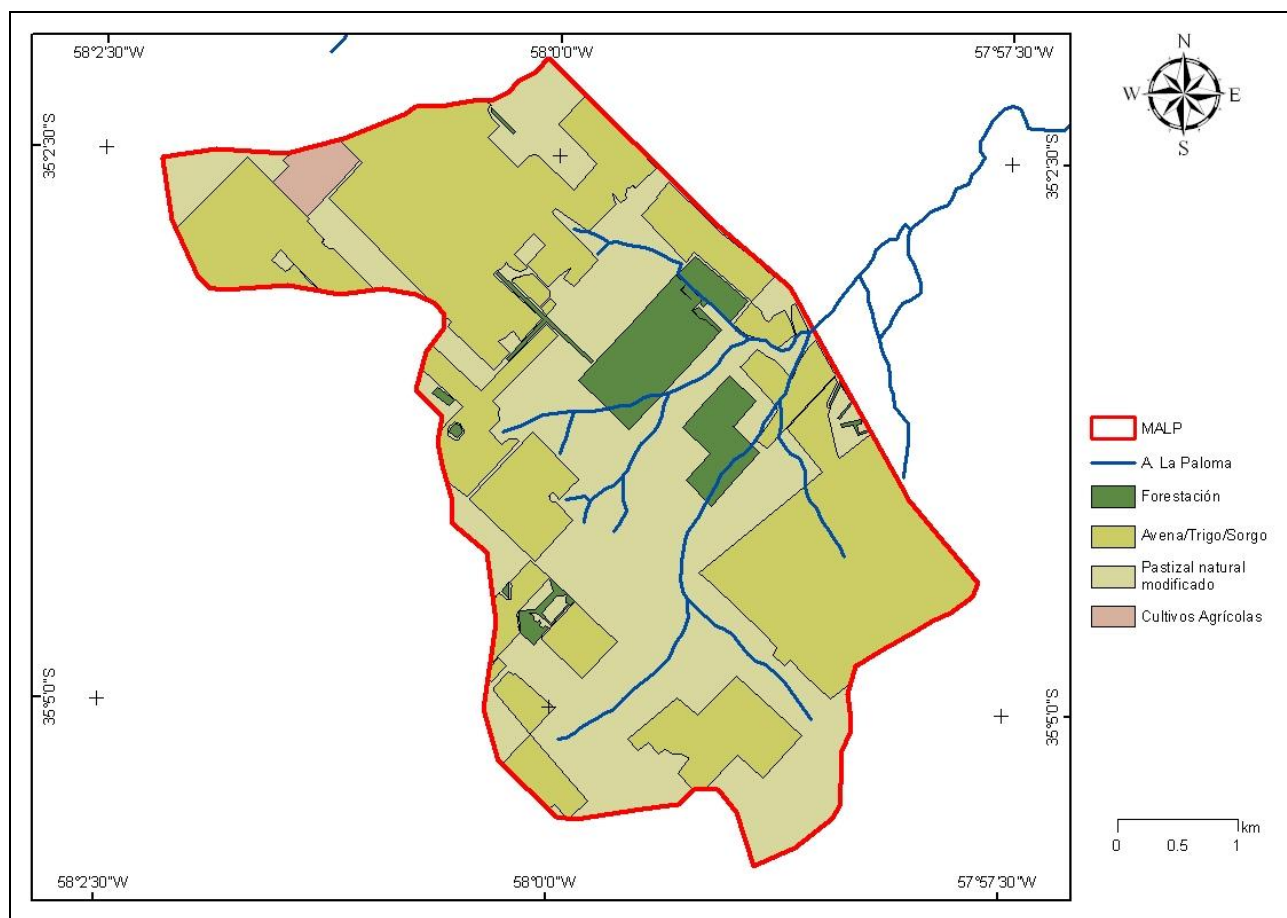


Figura 20. Mapa de tipos de cubierta vegetal.

Tabla 13. Porcentajes de cobertura vegetal en relación a la superficie total de la MALP.

	Superficie (ha)	Superficie (%)
<b>Forestación</b>	137.6	6
<b>Avena/Trigo/Sorgo</b>	1005.9	47
<b>Pastizal natural modificado</b>	972.8	46
<b>Cultivos agrícolas intensivos</b>	25	1

A continuación se muestra un detalle descriptivo de cada una de las coberturas vegetales.

### 7.2.6.1. Forestación.

En la figura 21 se muestra la distribución espacial de la cobertura forestal existente en la MALP, indicando las tres especies forestales predominantes.

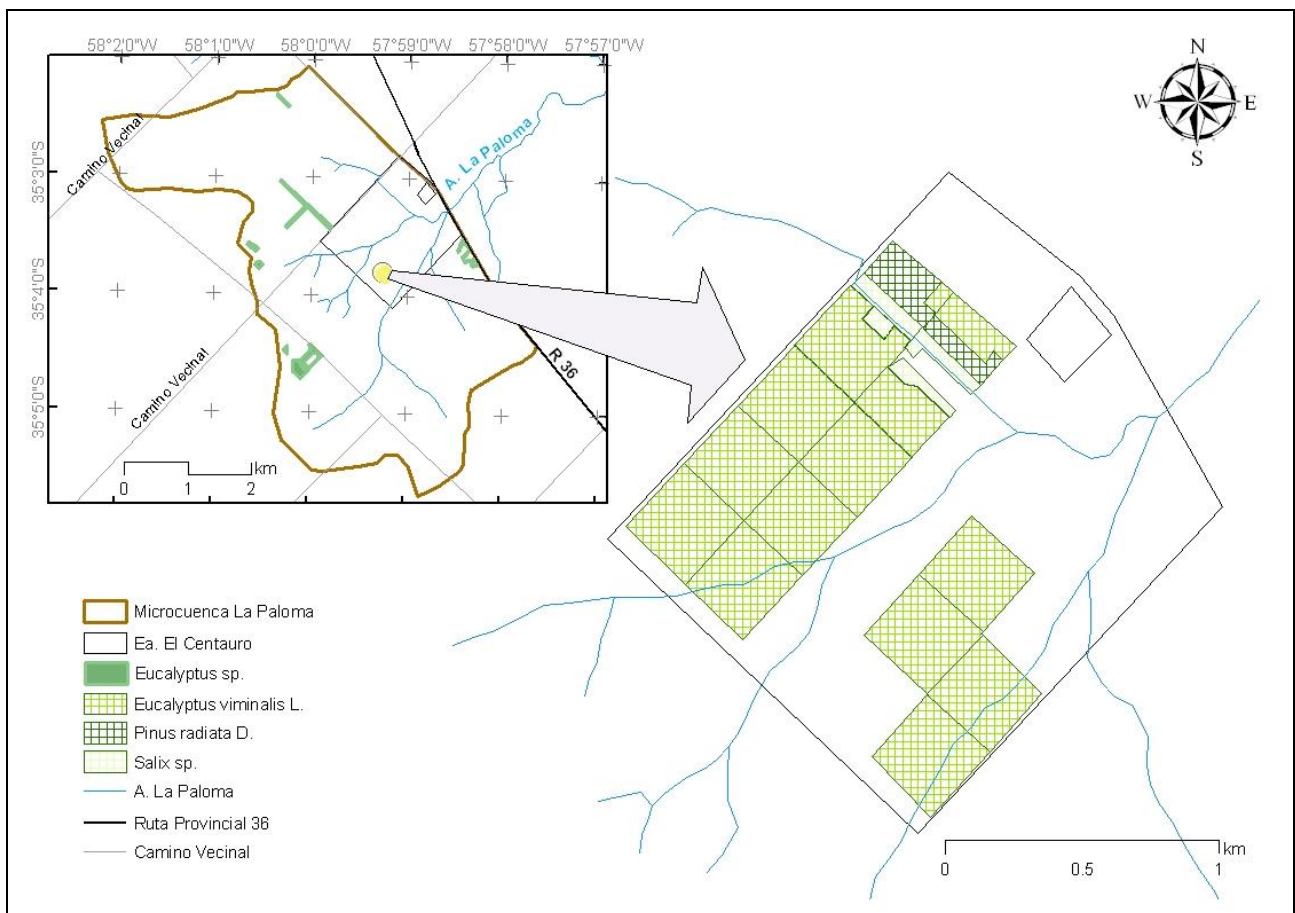


Figura 21. Mapa de la cobertura forestal de la MALP, diferenciando las especies de los géneros Pinus, Eucalyptus y Salix respectivamente.

En la tabla 14, se detalla la superficie de ocupación (en ha y porcentaje), de cada una de las especies forestales en relación a la superficie total de forestación y superficie total de la microcuenca.

Tabla 14. Superficie de ocupación en ha y porcentaje, de cada una de las especies forestales en relación a la superficie total de forestación y superficie total de la MALP.

	Superficie (ha)	Forestación	MALP
		Superficie (%)	
<b>Eucalipto</b>	127.4	92	5.87
<b>Pino</b>	6.6	5	0.30
<b>Sauce</b>	3.6	3	0.17

El detalle fotográfico de los distintos rodales de especies forestales implantados en la MALP, se muestra en la figura 22.



Figura 22. Detalle fotográfico de las forestaciones en estudio, con los géneros Pinus, Eucalyptus y Salix respectivamente.

La forestación de *Pinus radiata* Don posee una edad estimativa en 30 años y se encuentra plantada con un espaciamiento de 2 por 2 con un porcentaje de fallas actuales del 25%. Carece de prácticas silvícolas como podas y raleos, encontrándose un 5% de los individuos (árboles) suprimidos (muerto y/o caídos) por competencia. El diámetro a altura de pecho (DAP) promedio es igual a 28.9 cm, y la canopea se distribuye en un solo estrato de copas con una altura media de 22 m sin desarrollo de un estrato vegetal inferior. El suelo se encuentra cubierto por un manto de acículas, ramas y conos de 13 cm de espesor.

El porcentaje de cobertura de la forestación de Pino es de 53.5%, cuyo calculo se realizó a partir del procesamiento digital, en ArcGis 9.2 ®, de imágenes del follaje, tomadas con una cámara Kodak de 5 Mb desde el nivel del suelo y en forma vertical. Esas imágenes fueron transformadas a formato GRID y reclasificadas con el fin de lograr dos valores de píxel, uno que representa la cobertura y otro el cielo libre. Finalmente se contabilizaron, del total de pixeles de la

imagen, los que representan la cobertura forestal, y mediante el promedio de ellas se obtuvo el valor medio de cubierta forestal del terreno. En la figura 23 se muestra la imagen original y la procesada junto con los porcentajes de cobertura forestal del terreno.

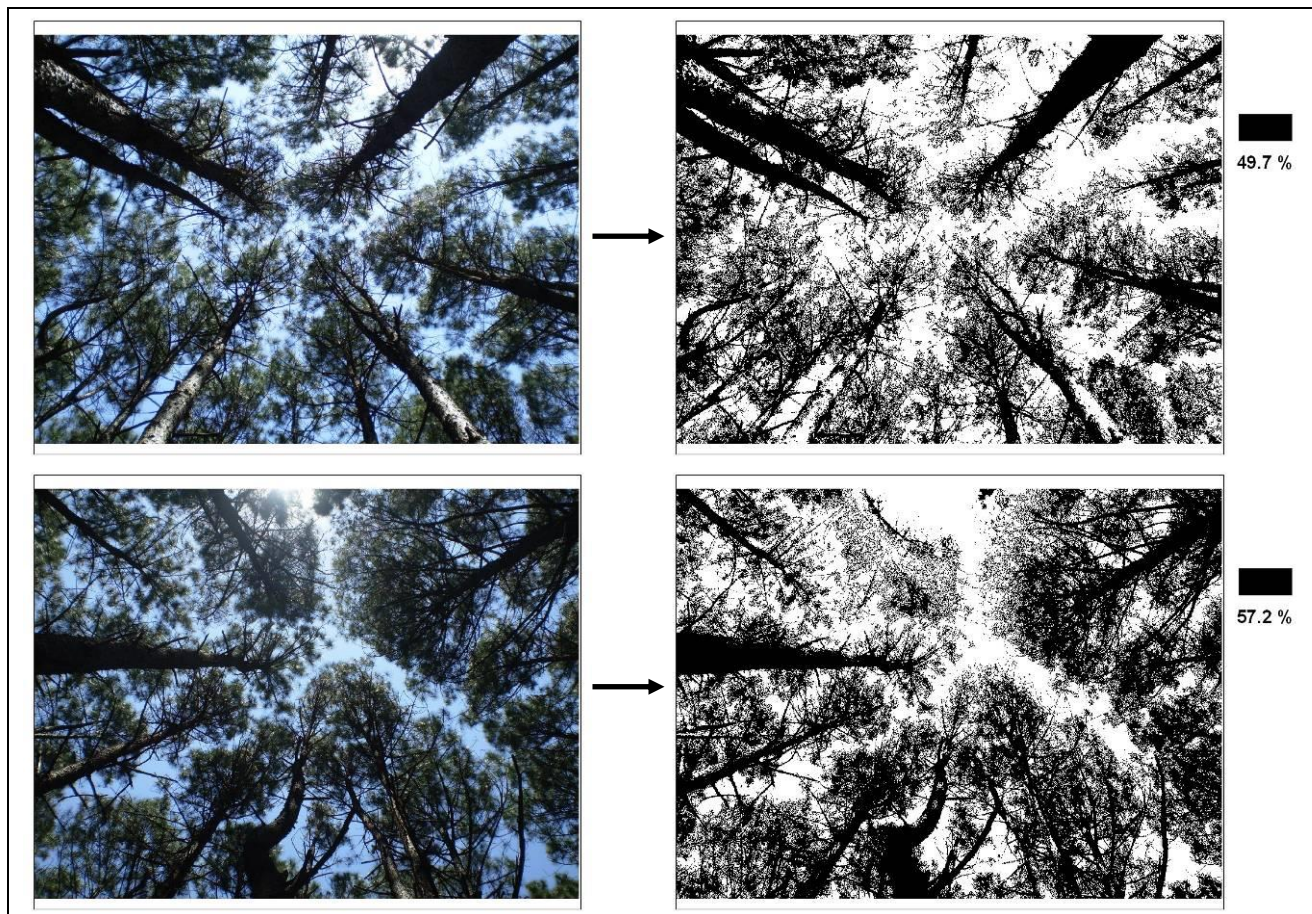


Figura 23. Imágenes originales y procesadas para el cálculo de cobertura forestal de Pino.

La forestación de *Eucalyptus viminalis* Labill está compuesta por rebrotes de 10 años, en un número promedio de tres rebrotes por cepa. El distanciamiento de las cepas es de 2 por 2 con un porcentaje de fallas actuales del 10%. El DAP promedio es de 8.85 cm, encontrándose individuos con DAP desde 1 cm hasta 18.5 cm. El rodal carece de manejo silvícola y la canopea se distribuye en tres estratos de 20 m, 12 m y 7 m de altura, con un estrato herbáceo poco desarrollado. El suelo se encuentra cubierto de hojas y ramas que no llegan a formar un manto uniforme y superior al centímetro de espesor.

El porcentaje de cobertura de la forestación de Eucalipto se estimó en un 36.7% y se calculó de igual forma que en el caso del Pino. En la figura 24 se muestra la imagen original y la procesada junto con los porcentajes de cobertura forestal del terreno.

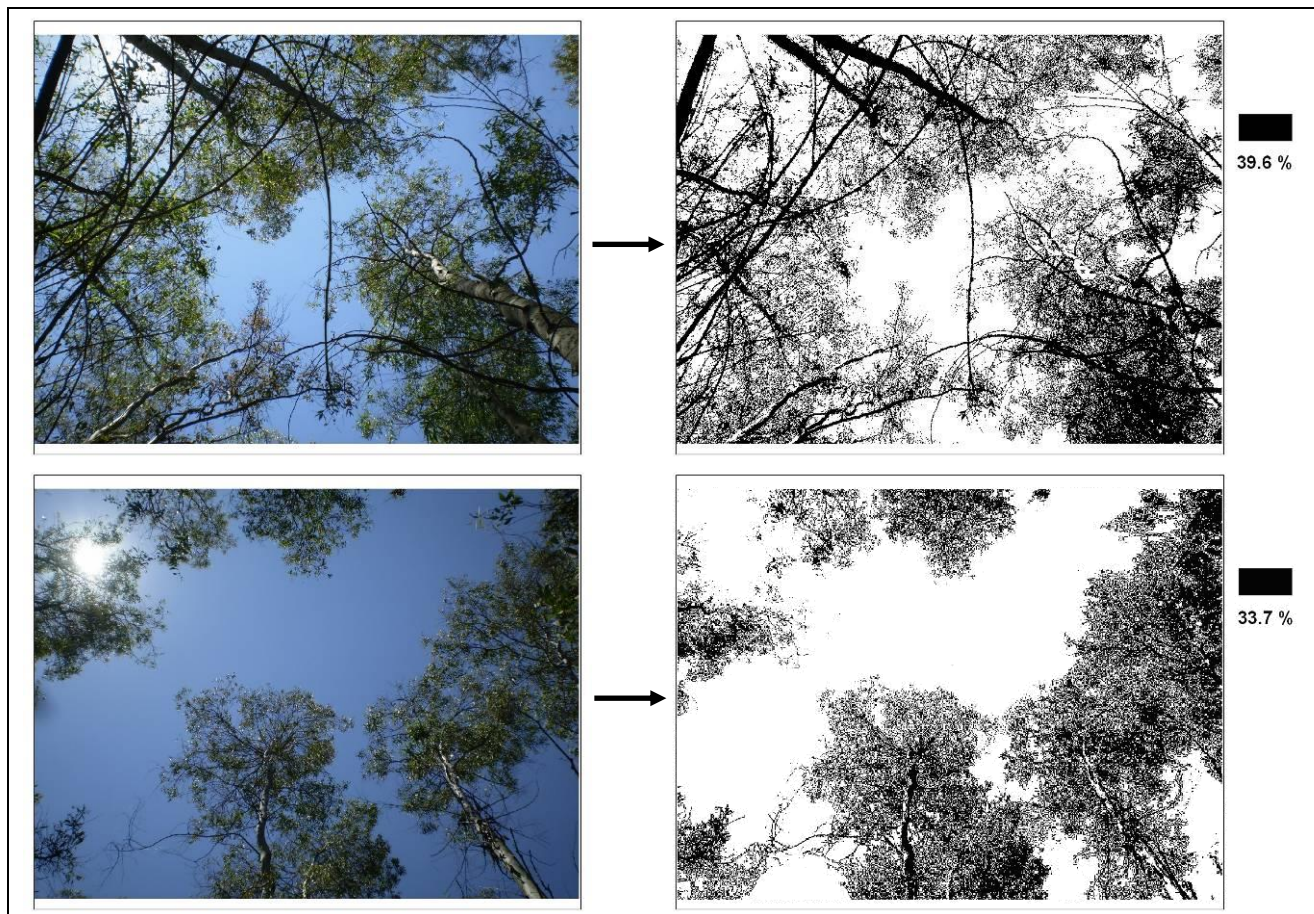


Figura 24. Imágenes originales y procesadas para el cálculo de cobertura forestal de Eucalipto.

#### 7.2.6.2. Pastizal modificado.

La denominación de pastizal natural modificado, responde a zonas cubiertas espontáneamente por pastizal y relegadas a la actividad ganadera extensiva. Esta cobertura se vincula con zonas bajas, imperfectamente drenadas y / o empobrecidas, que requieren grandes inversiones a fin de tornarlas productivas para otros usos. (Figura 25)





Figura 25. Detalle fotográfico del pastizal natural modificado de la MALP.

Como se indicó en la tabla 13, la superficie de ocupación del pastizal natural modificado en la MALP es de 972.8 ha, representando un porcentaje de 46 % sobre el total.

#### 7.2.6.3. Cultivos.

Las gramíneas forrajeras cultivadas en rotación, a través de siembra directa en la MALP, son la *Avena sativa* (Avena), *Zea mays* (Maíz) y *Sorghum bicolor* (Sorgo). En la figura 26 se muestra un detalle de los distintos cultivos.

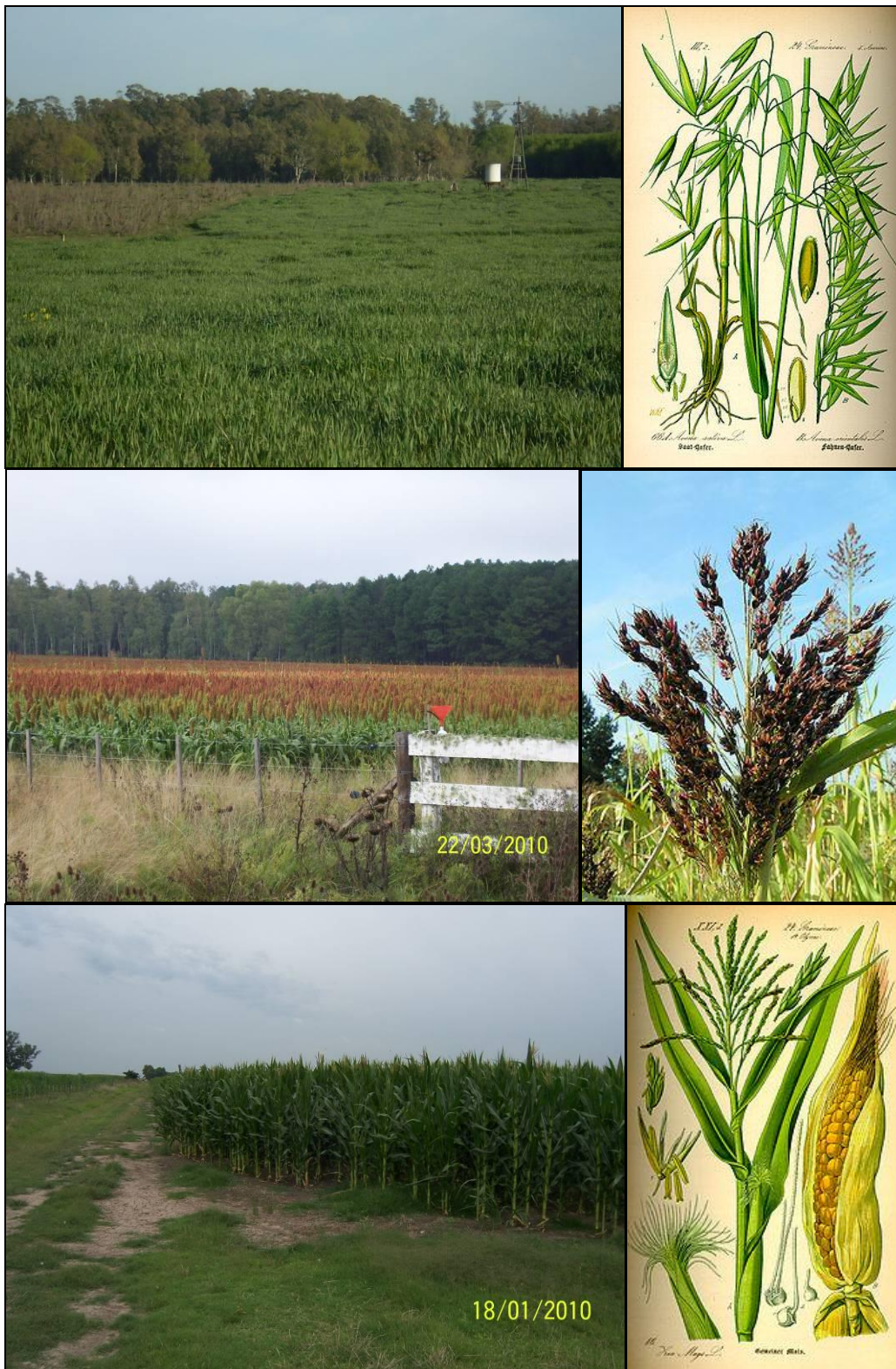


Figura 26. Cultivos de *Avena sativa* (Avena), *Sorghum bicolor* (Sorgo) y *Zea mays* (Maíz) en el área de estudio.

Como se indicó en la tabla 13, la superficie de ocupación de especies forrajeras en rotación es de 1005.9 ha y su porcentaje en relación a la superficie total de la MALP, es de 47 %.

### 7.3. GENERACIÓN DE UN MODELO CARTOGRÁFICO.

A continuación, se enseñan los modelos cartográficos utilizados para la conformación de la base de datos y su procesamiento, en la que se incluye la caracterización cualitativa de la MALP (Figura 27), la determinación de los caudales líquidos y sólidos (Figura 28) y balance hidrológico de la microcuenca (Figura 29).

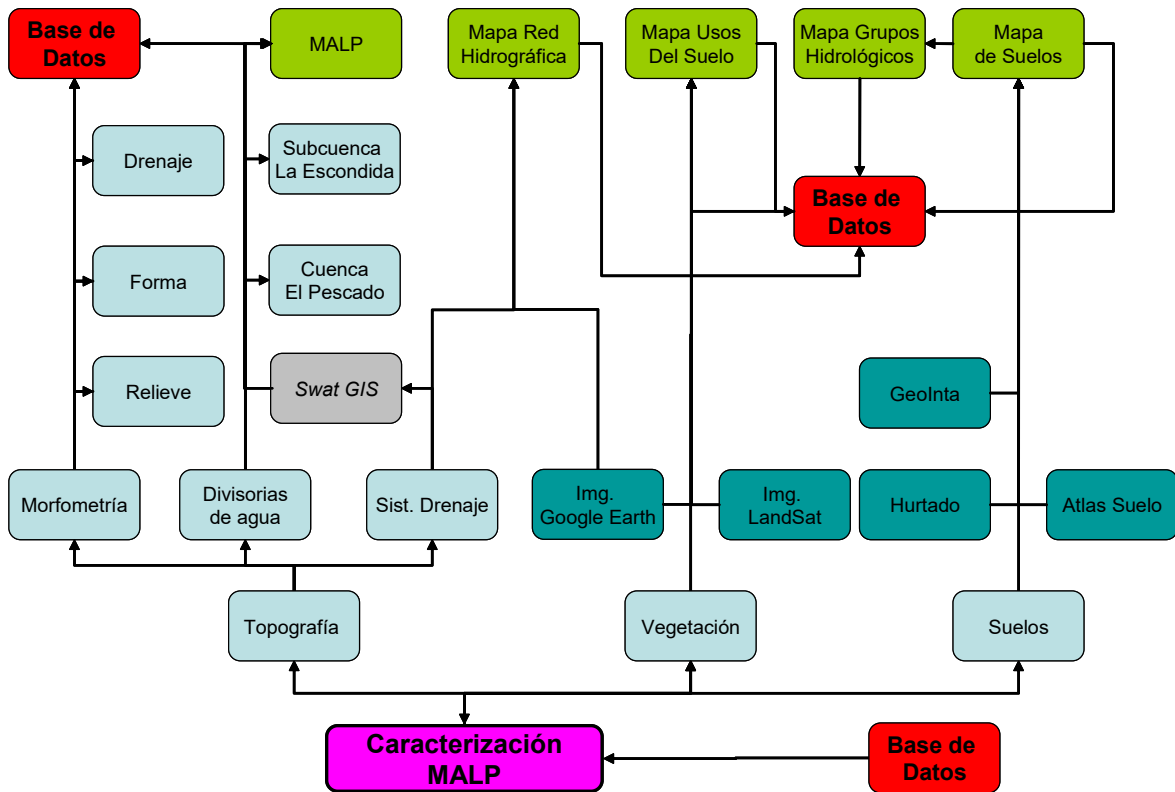


Figura 27. Caracterización cualitativa de la MALP

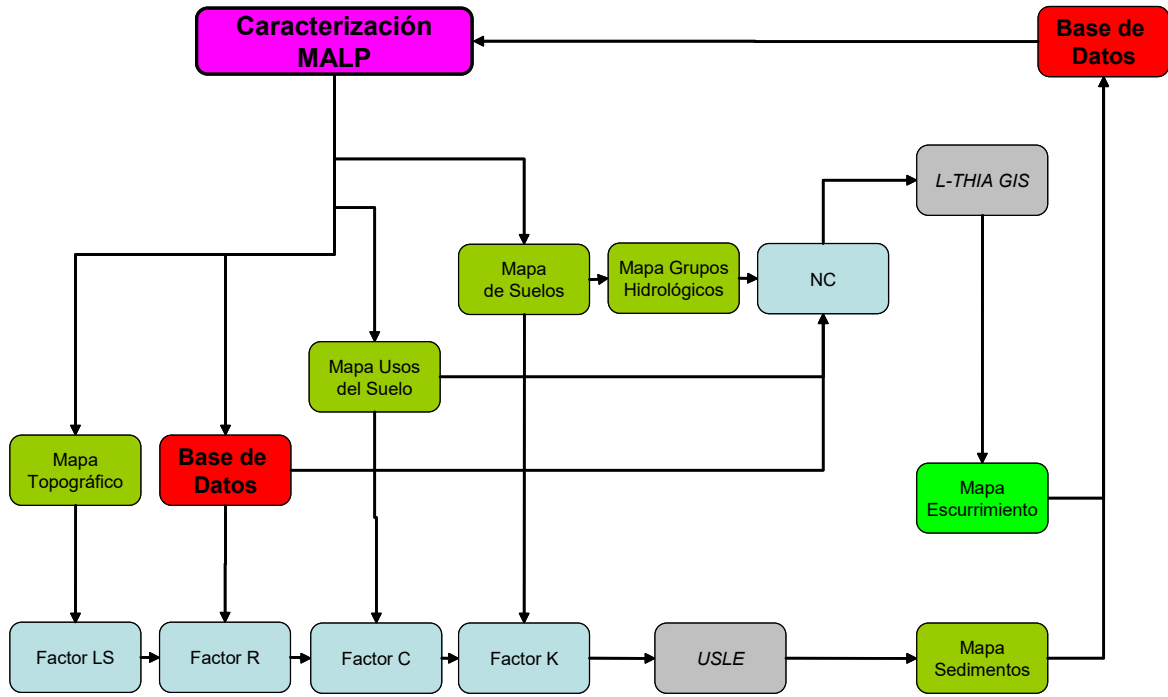


Figura 28. Determinación de excesos líquidos y sólidos de la MALP

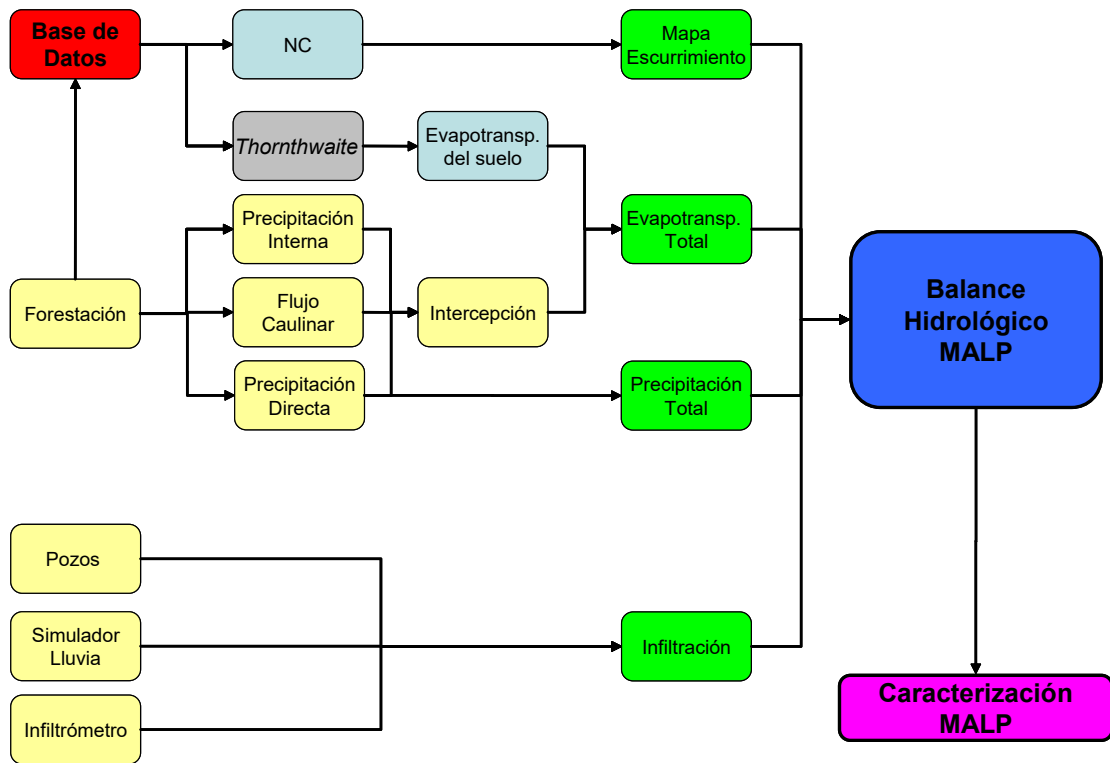


Figura 29. Determinación del balance hidrológico de la MALP.

Las referencias de colores para las figuras 27, 28 y 29, se muestran a continuación:

	Caracterización cuali-cuantitativa de la MALP
	Balance hidrológico de la MALP
	Base de datos SIG, estadísticas de lluvia, bibliografía colectada
	Modelos y programas utilizados
	Mapas primarios y secundarios
	Componentes del balance hidrológico
	Componentes para la caracterización de MALP
	Mediciones directas de la condición hidrográfica

## 7.4. MEDICIONES DE LA SITUACIÓN HÍDRICA.

### 7.4.1. Precipitación.

Las precipitaciones medias anuales para la MALP, correspondiente a un período de 12 años (1998 - 2009), se muestran en el gráfico 5. En este gráfico de precipitaciones medias anuales, se muestra una línea discontinua que representa el valor de precipitación media anual de toda la serie considerada, con un valor igual a 1017.25 mm.

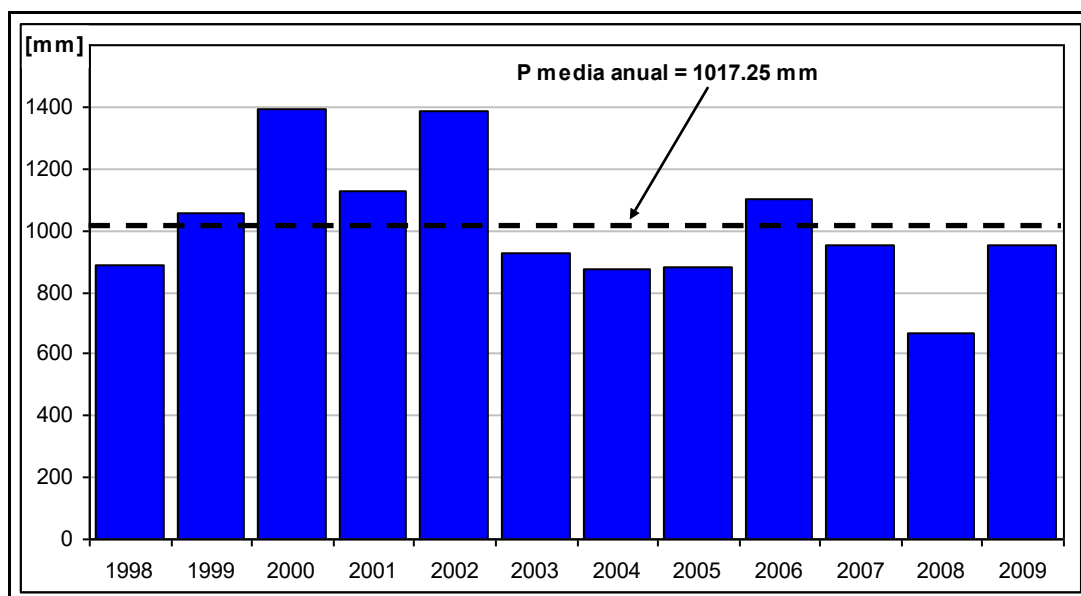


Gráfico 5. Precipitaciones anuales frente a la precipitación media anual de la serie completa considerada.

En el gráfico 5 se observa un período de años húmedos (1999 a 2002) precedido por tres años que permanecen por debajo de la media anual, luego un 2006 que supera la media y una abrupta disminución de las precipitaciones hasta el 2008, donde se reconoce el valor mínimo de precipitación anual igual a 668.2 mm, (inicio de toma de datos a campo), seguido de un año con valores cercanos a la media anual (955.1 mm) que marca el inicio de un período húmedo. Esta tendencia de aumento de las precipitaciones a partir del año 2009, se manifiesta para el año 2010, dado que para el mes de Mayo, los valores acumulados de precipitación (577.20 mm) ya evidencian un incremento del 14.59% con respecto al valor medio anual de la serie, por lo que se esperaría que al completarse el año, el total de lluvia acumulada, supere el valor de la media anual.

En el gráfico 6, se muestran los valores de precipitación media mensual para la serie 01/01/1998 - 01/01/2009, obtenidos de la Estación Experimental Julio Hirschhorn, en contraste con los valores de precipitación mensual medidos en la MALP para el período 11/05/2009 - 10/05/2010.

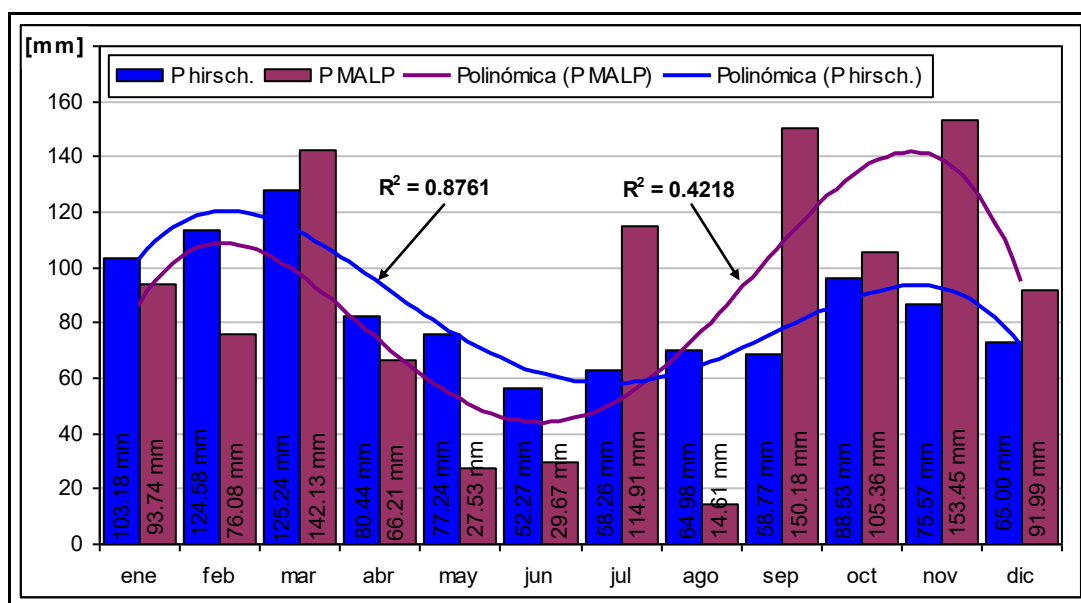


Gráfico 6. Precipitación media mensual de una serie de 12 años (1998-2009) de la Estación Experimental J. Hirschhorn vs precipitación mensual (período 11/05/2009 - 10/05/2010) de la MALP, mostrando las líneas de tendencia polinómicas para cada una de ellas.

Como puede verse en el gráfico 6, la precipitación mensual de la MALP sigue la tendencia de las medias mensuales de la estación experimental, mostrando, a grandes rasgos, un incremento de magnitud en los meses de primavera y una disminución de la misma en el resto de las estaciones y particularmente en el mes de Agosto, mostrando el menor registro de precipitación mensual (14.61 mm). El registro total de lluvia para el período 11/05/2009 - 10/05/2010, es de 1187.8 mm para la Experimental J. Hirschhorn y de 1065.85 mm para la MALP. Ambos valores se encuentran por encima de la media anual de 1017.25 mm y se diferencian entre sí por posibles errores de precisión del instrumental instalado.

Tomando los valores medios de la MALP para el período considerado en el gráfico 6, el mes más lluvioso esta representado por el mes de Noviembre con 153.45 mm y el más seco fue Agosto con 14.61 mm. La distribución estacional de la lluvia para este período presenta un máximo de 38.4% en primavera y un mínimo de 14.9% en invierno, siendo las estaciones de verano y otoño, de comportamiento uniforme, con valores de 24.6% y 22.1% respectivamente.

#### 7.4.2. Evapotranspiración.

De la aplicación de los cuatro métodos de cálculo de la ETP, para el período 1998-2010, surgen los resultados que se expresan en la tabla 15:

Tabla 15. Resultados de ETP en mm/d y mm/mes para cada mes de un ciclo hidrológico promedio según distintas metodologías.

ETP	Penmann-FAO		PM-Hirschhorn		Thornthwaite		Blaney-Criddle	
	mm/día	Mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes	mm/día	mm/mes
ene.	5.59	173.30	4.74	146.91	4.09	126.89	5.92	183.37
feb.	3.90	112.99	3.83	105.68	3.64	105.66	5.44	157.80
mar.	2.96	91.85	2.94	89.04	2.86	88.61	4.82	149.33
abr.	1.83	55.01	2.08	60.95	1.81	54.41	3.85	115.60
may.	0.97	30.01	1.35	41.88	1.11	34.37	3.17	98.35
jun.	0.62	18.47	1.07	30.44	0.77	23.24	2.81	84.41
jul.	0.68	21.23	1.18	35.97	0.72	22.19	2.87	89.07
ago.	1.17	36.31	1.78	55.15	0.96	29.71	3.27	101.49
sep.	1.94	58.14	2.34	66.16	1.31	39.27	3.73	111.87
oct.	2.89	89.62	3.24	100.51	2.10	65.04	4.45	137.86
nov.	3.75	112.47	4.09	122.78	2.92	87.66	5.15	154.48
dic.	4.34	134.59	4.64	142.81	3.63	112.54	5.65	175.10
		933.98		998.28		789.59		1558.73

En función de estos resultados se descartó la metodología de Blaney-Criddle debido a que los valores que arroja son excesivos para la situación que se contempla. (Gráfico 7)

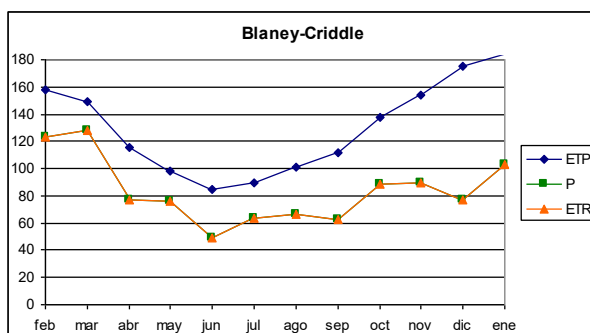


Gráfico 7. Comportamiento de la ETP, P y ETR (expresados en mm de lámina) en un ciclo hidrológico promedio. Valores provenientes de la metodología de Blaney-Criddle.

La metodología de cálculo señalada como PM-Hirschhorn, es la respuesta automática del instrumental de medición de la experimental Hirschhorn, que utiliza la metodología de Penmann modificado por Monteith para el cálculo de la ETP diaria, expresada en lámina (mm). El instrumental referido es una estación GroWeather comprada en 1997 y fabricada por Davis Instrument.

Los valores de ETP obtenidos por Penmann-FAO, PM-Hirschhorn y Thornthwaite fueron utilizados para calcular el ETR a través del balance de Thornthwaite, con un factor de cultivo general para toda la microcuenca igual a uno ( $k_c=1$ ) y un valor de capacidad de campo de 200 mm (Hurtado *et al.*, 2006), como se muestra en las tablas 16, 17 y 18:

Tabla 16. Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Penmann modificado por FAO.

Penmann-FAO	Feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	Total
<b>Pp</b>	123.0	128.1	77.4	76.1	49.4	63.5	66.8	62.8	88.7	89.2	76.7	103.0	1004.7
<b>ETP</b>	113.0	91.8	55.0	30.0	18.5	21.2	36.3	58.1	89.6	112.5	134.6	173.3	934.0
<b>Pp-ETP</b>	10.0	36.2	22.4	46.1	30.9	42.3	30.4	4.6	-0.9	-23.2	-57.9	-70.3	70.7
<b>Reserva</b>	47.7	57.7	93.9	116.3	162.4	193.3	200	200	200	199.1	175.9	118.0	47.7
<b>Δ Reserva</b>	10.0	36.2	22.4	46.1	30.9	6.7	0	0	-0.9	-23.2	-57.9	-70.3	0
<b>ETR</b>	113.0	91.8	55.0	30.0	18.5	21.2	36.3	58.1	89.6	112.5	134.6	173.3	934.0
<b>Déficit</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Excesos</b>	0	0	0	0	0	35.6	30.4	4.6	0	0	0	0	70.7



Tabla 17. Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Penmann-Monteith en la Experimental J. Hirschhorn.

PM-Hirschhorn	Feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	Total
Pp	123.0	128.1	77.4	76.1	49.4	63.5	66.8	62.8	88.7	89.2	76.7	103.0	1004.7
ETP	105.7	89.0	61.0	41.9	30.4	36.0	55.2	66.2	100.5	122.8	142.8	146.9	998.3
Pp-ETP	17.3	39.0	16.5	34.2	18.9	27.6	11.6	-3.4	-11.8	-33.5	-66.1	-43.9	6.4
Reserva	41.2	58.6	97.6	114.1	148.3	167.2	194.8	200	196.6	184.8	151.3	85.2	41.2
Δ Reserva	17.3	39.0	16.5	34.2	18.9	27.6	5.2	-3.4	-11.8	-33.5	-66.1	-43.9	0
ETR	105.7	89.0	61.0	41.9	30.4	36.0	55.2	66.2	100.5	122.8	142.8	146.9	998.3
Déficit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Excesos	0	0	0	0	0	0	6.4	0	0	0	0	0	6.4

Tabla 18. Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Thornthwaite.

Thornthwaite	Feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	Total
Pp	123.0	128.1	77.4	76.1	49.4	63.5	66.8	62.8	88.7	89.2	76.7	103.0	1004.7
ETP	105.7	88.6	54.4	34.4	23.2	22.2	29.7	39.3	65.0	87.7	112.5	126.9	789.6
Pp-ETP	17.4	39.4	23.0	41.7	26.1	41.4	37.0	23.5	23.7	1.6	-35.8	-23.9	215.1
Reserva	140.3	157.6	197.1	200	200	200	200	200	200	200	164.2	140.3	
Δ Reserva	17.4	39.4	2.9	0	0	0	0	0	0	0	-35.8	-23.9	0
ETR	105.7	88.6	54.4	34.4	23.2	22.2	29.7	39.3	65.0	87.7	112.5	126.9	789.6
Déficit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Excesos	0	0	20.1	41.7	26.1	41.4	37.0	23.5	23.7	1.6	0	0	215.1

De las tablas anteriores se desprenden los gráficos 8, 9 y 10, que expresan el balance hidrológico para cada una de las metodologías, a lo largo de un ciclo hidrológico promedio de un año según el balance realizado con los valores de ETP.

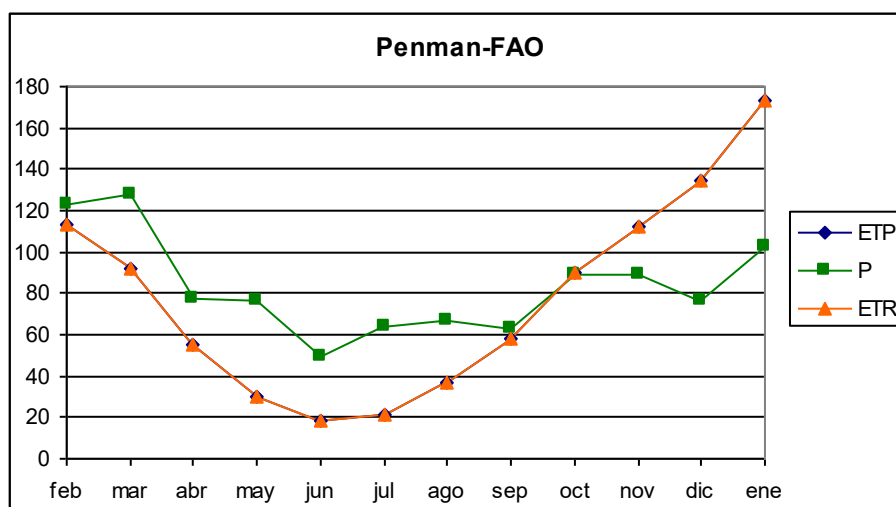


Gráfico 8. Distribución de la Pp, ETP (Penmann-FAO) y ETR.

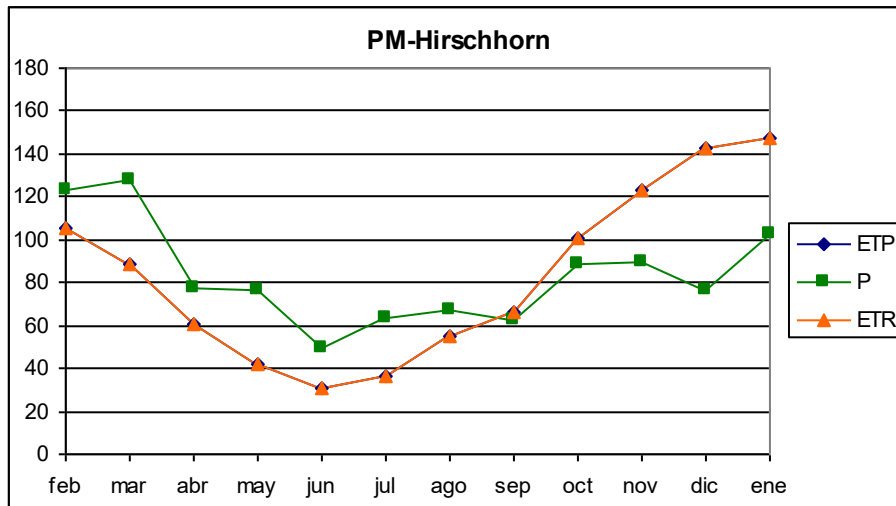


Gráfico 9. Distribución de la Pp, ETP (Penmann-Monteith) y ETR.

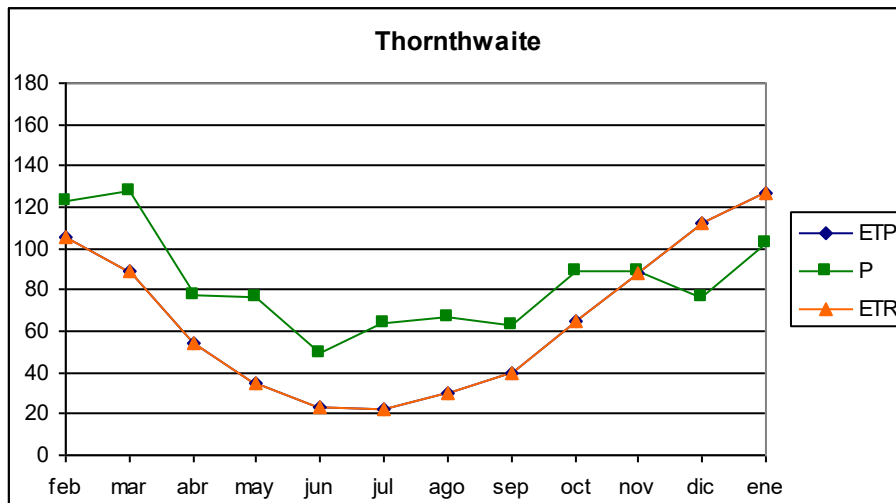


Gráfico 10. Distribución de la Pp, ETP (Thornthwaite) y ETR.

Los balances presentados exhiben un período de excesos hídricos, desde febrero hasta el tercer trimestre del año, donde se produce la recarga del acuífero seguido del un período de déficit hasta el mes de Enero, mas corto que el anterior. Esto se traduce en que los excesos hídricos prevalecen frente al déficit hídrico, haciendo positivo el rendimiento de la MALP para el período considerado, pero acentuando las situaciones de estrés hídrico, por anegamiento prolongado y lento drenaje superficial, lo cual se manifiesta como una merma en la producción.

El balance tomado como verdadero sería el de Thornthwaite (Tabla 18, Gráfico 10), dado que presenta excesos hídricos anuales comparables con los resultados obtenidos de infiltración (Tabla 21).

### 7.4.3. Escurrimiento.

El cálculo de escurrimiento superficial a través de la metodología del número de curva, se llevo a cabo de manera automática con el modelo hidrológico L-THIA GIS. Estos resultados se presentan en forma cartográfica para la MALP, en formato raster. A continuación se muestra en las figuras 30 y 31, los mapas correspondientes al grupo hidrológico y usos del suelo que expresan los datos de entrada del modelo hidrológico.

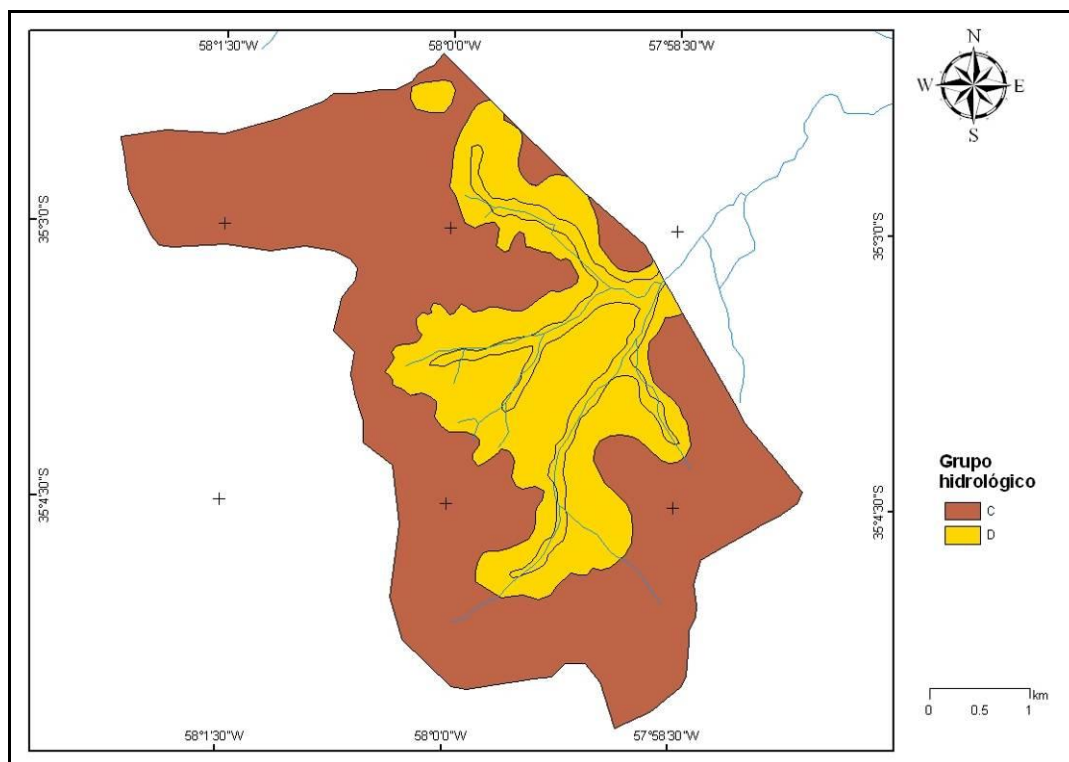


Figura 30. Mapa de grupos hidrológicos de la MALP.

El mapa de Grupos Hidrológicos (Figura 30), vislumbra una situación hidrológica comprometida para la actividad agrícola ganadera, dado su deficiente capacidad de infiltración

que, potenciado por un paisaje de escasas pendientes, facilita situaciones de anegamientos prolongados.

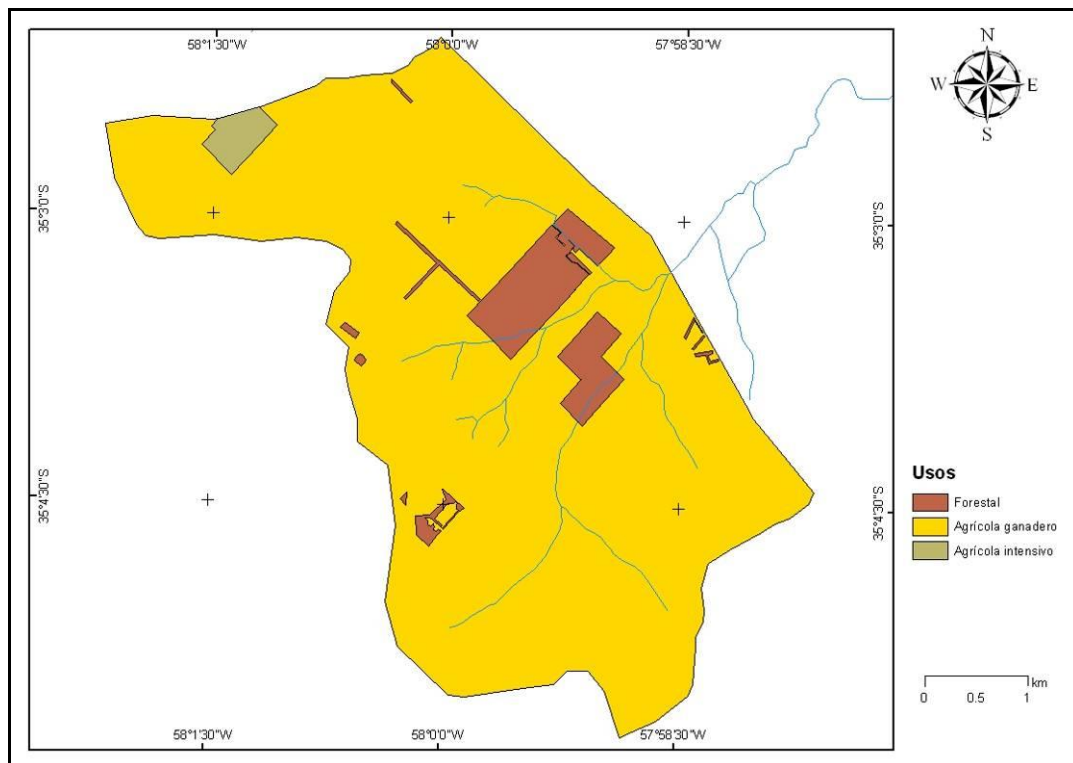


Figura 31. Mapa de usos del suelo en la MALP.

La cobertura vegetal que se observa en el mapa de usos del suelo (Figura 31), indicaría que las forestaciones se concentran a la salida de la microcuenca donde se presentan los mayores problemas de impermeabilidad del suelo (coincidente con el Grupo Hidrológico D), y que la actividad agrícola trata de cubrir la mayor cantidad de superficie siendo frenada por zonas de baja productividad que se encuentran ocupadas por pastizal natural modificado.

En la tabla 19 se expresan los porcentajes de ocupación que representan el GH y los usos del suelo en la MALP.

Tabla 19. Porcentajes de ocupación que representan el GH y los usos del suelo en la MALP.

	GH		Usos del Suelo		
	C	D	Forestal	Agrícola ganadero	Agrícola intensivo
%	68	32	6	93	1

En las figuras 32 y 33, se presentan los resultados generados por el modelo L-THIA GIS, siendo los mapas resultantes de la interacción de los dos anteriores. Estos resultados se expresan con la cartografía de la zonificación geoespacial del número de curva y el de lámina media anual de escurrimiento, respectivamente.

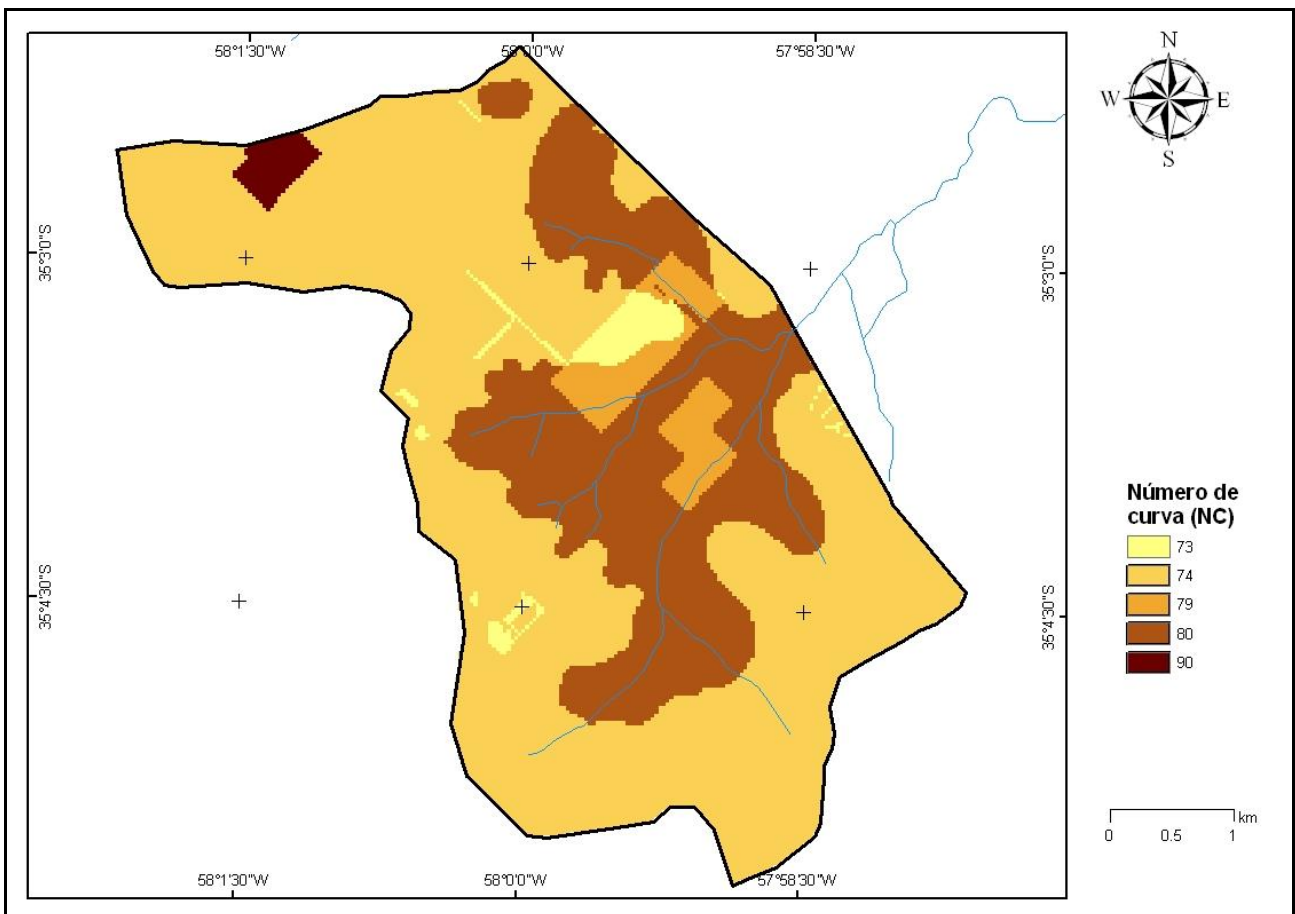


Figura 32. Mapa de NC obtenido por procesamiento automático de la base de datos vectorial, a través del L-THIA GIS, para la MALP.

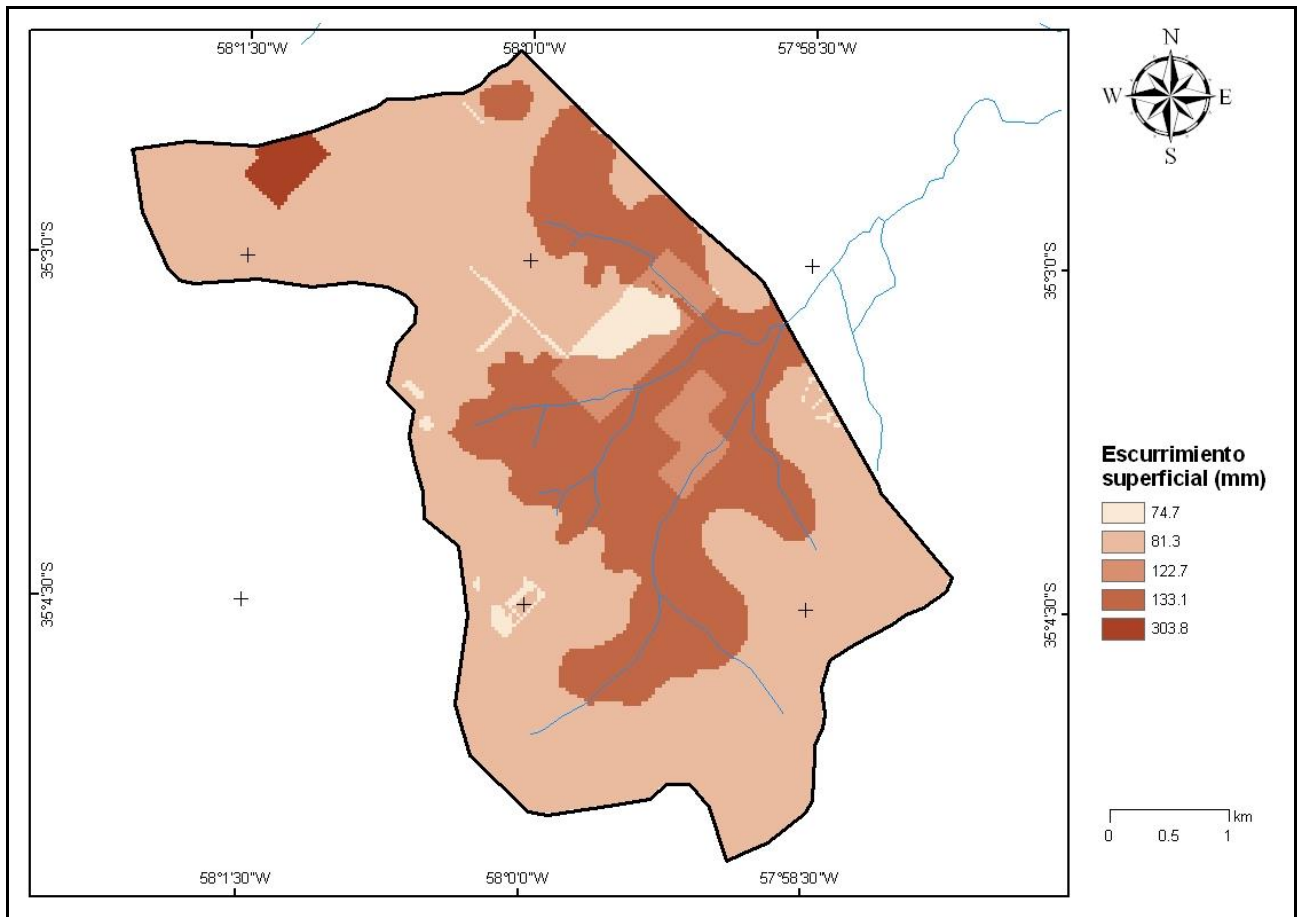


Figura 33. Mapa de precipitación efectiva o escurrimiento superficial en mm, obtenido por procesamiento con L-THIA GIS, a través de la metodología del NC.

La interacción entre los distintos usos del suelo y las características del suelo a través del grupo hidrológico queda reflejado por la magnitud de los números de curva, que en la MALP son muy variables (Figura 32) y manifestándose como escurrimientos superficiales que varían de 74.7 a 303.8 mm anuales, para una precipitación promedio anual de 1004.67 mm. En la tabla 20 se muestran los porcentajes de ocupación de los valores de NC y escurrimiento superficial.

Tabla 20. Porcentajes de ocupación de los valores de NC y escurrimiento superficial.

	NC				
	73	74	79	80	90
<b>%</b>	2	65	4	28	1
<b>mm</b>	74.7	81.3	122.7	133.1	303.8

#### 7.4.4. Infiltración.

En el gráfico 11, se muestra la evolución temporal del nivel freático en cada uno de los pozos de la red de monitoreo para el período 03/10/08 - 31/05/10. Además se indica en el eje superior, un hietograma con las lluvias acumuladas para las fechas de toma de datos. En el eje de ordenadas se muestran las fechas de toma de datos, para los pozos y las lluvias. El eje de abscisas izquierdo, corresponde al nivel freático (msnm) y el derecho, a los valores de lluvia acumulada (mm).

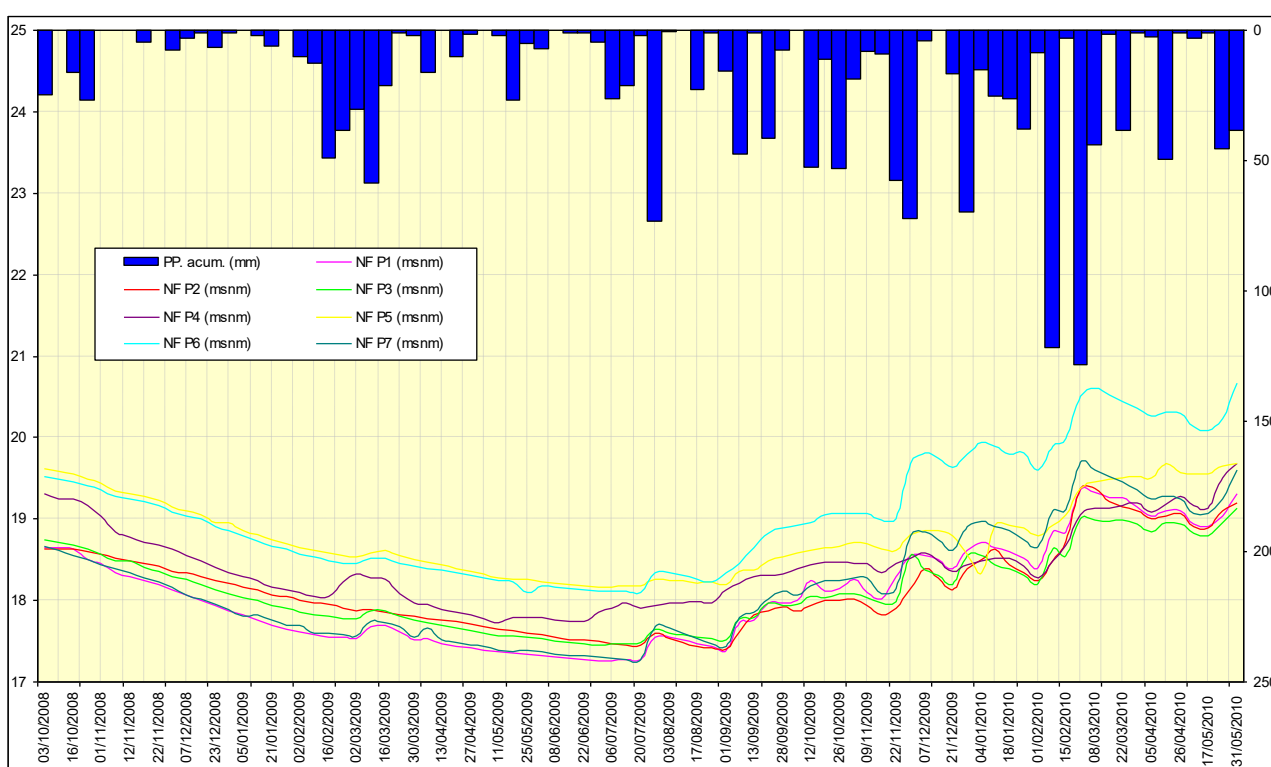


Gráfico 11. Evolución temporal de los niveles freáticos (msnm) para el período 03/10/08 - 31/05/10 y su correspondencia con las lluvias acumuladas (mm).

En el gráfico 11 se puede observar un aumento de las precipitaciones desde el año 2008 a la actualidad, pasando de un año particularmente seco (2008) seguido de dos años de mucha lluvia que ha revertido una situación de rendimientos hídricos negativos, que se traducen en un descenso del nivel freático de octubre de 2008 hasta fines de Junio del 2009, a una situación de rendimientos hídricos positivos, que se manifiesta en el ascenso progresivo de los niveles freáticos, por la recarga del mismo, desde Junio de 2009 hasta la actualidad. Se observa además,

que a pesar de que los suelos poseen una infiltración impedida, por la presencia de horizontes Bt, acumulación de carbonatos en forma de agregados o mantos, por altos contenidos de sodio y por pendientes bajas; los niveles freáticos son sensibles a los eventos de lluvia, mostrando variaciones notables, debido a la existencia de flujos preferenciales generados por el desarrollo radical de las masas forestales que atraviesan estas capas impermeables.

En los gráficos 12 a 18, se muestra el comportamiento de los niveles freáticos en el tiempo, correspondiente a cada uno de los pozos y su relación individual con el nivel topográfico. La serie temporal es del 03/10/08 al 15/06/10, y los valores de nivel freático se indican en msnm sobre el eje de ordenadas.

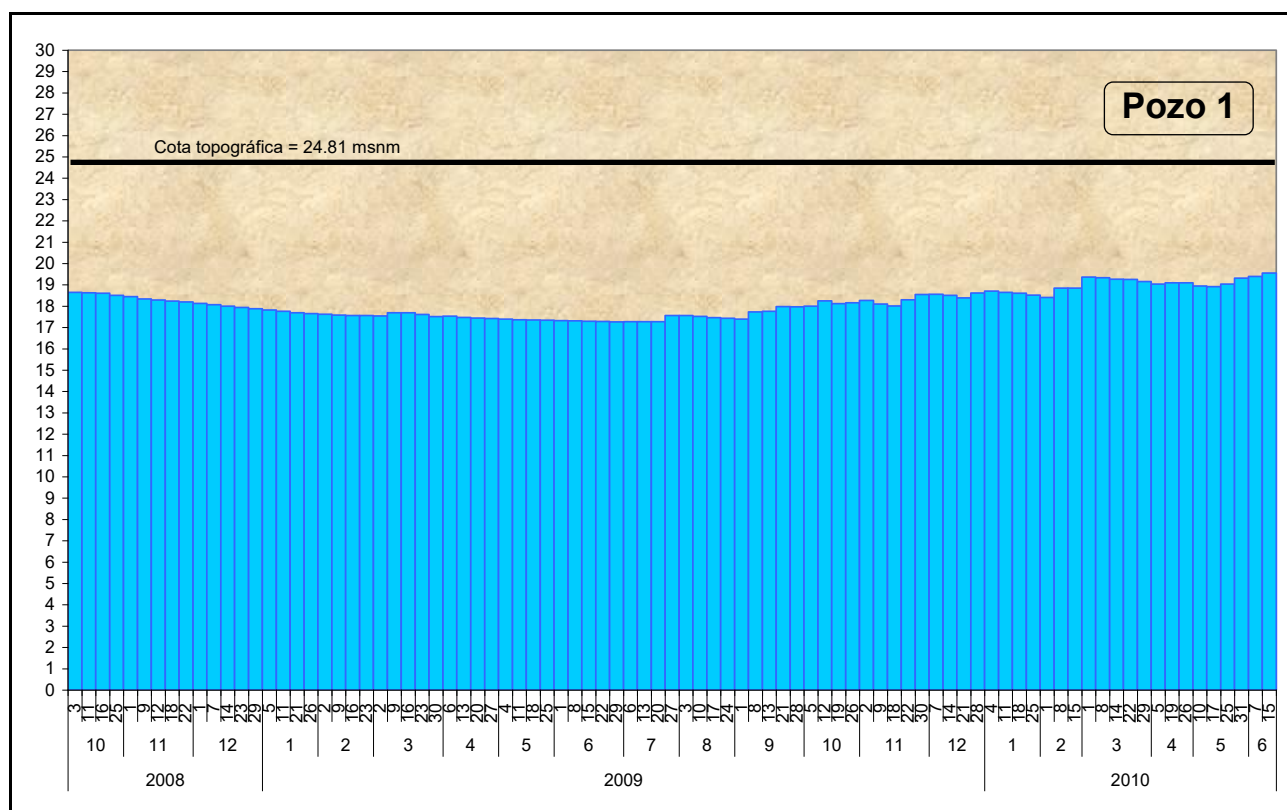


Gráfico 12. Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 1 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.



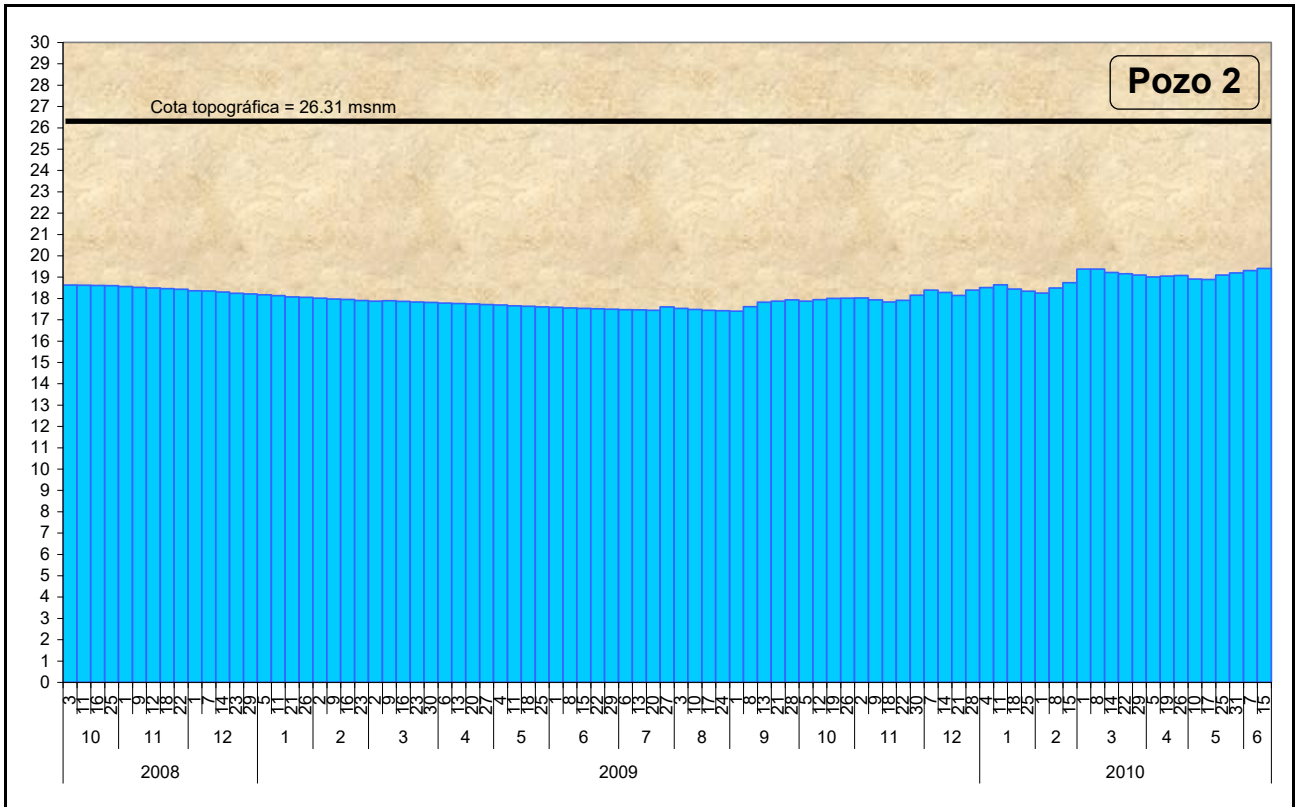


Gráfico 13. Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 2 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.

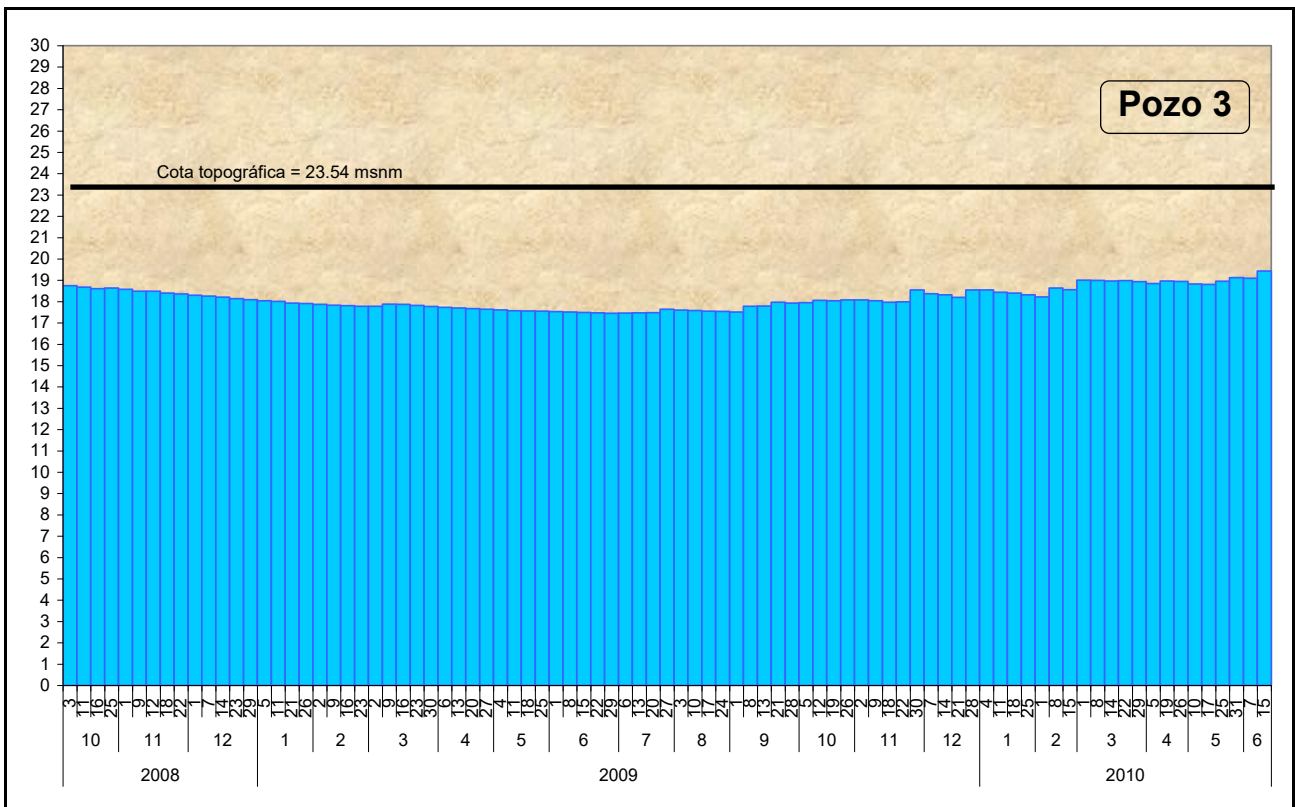


Gráfico 14. Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 3 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.

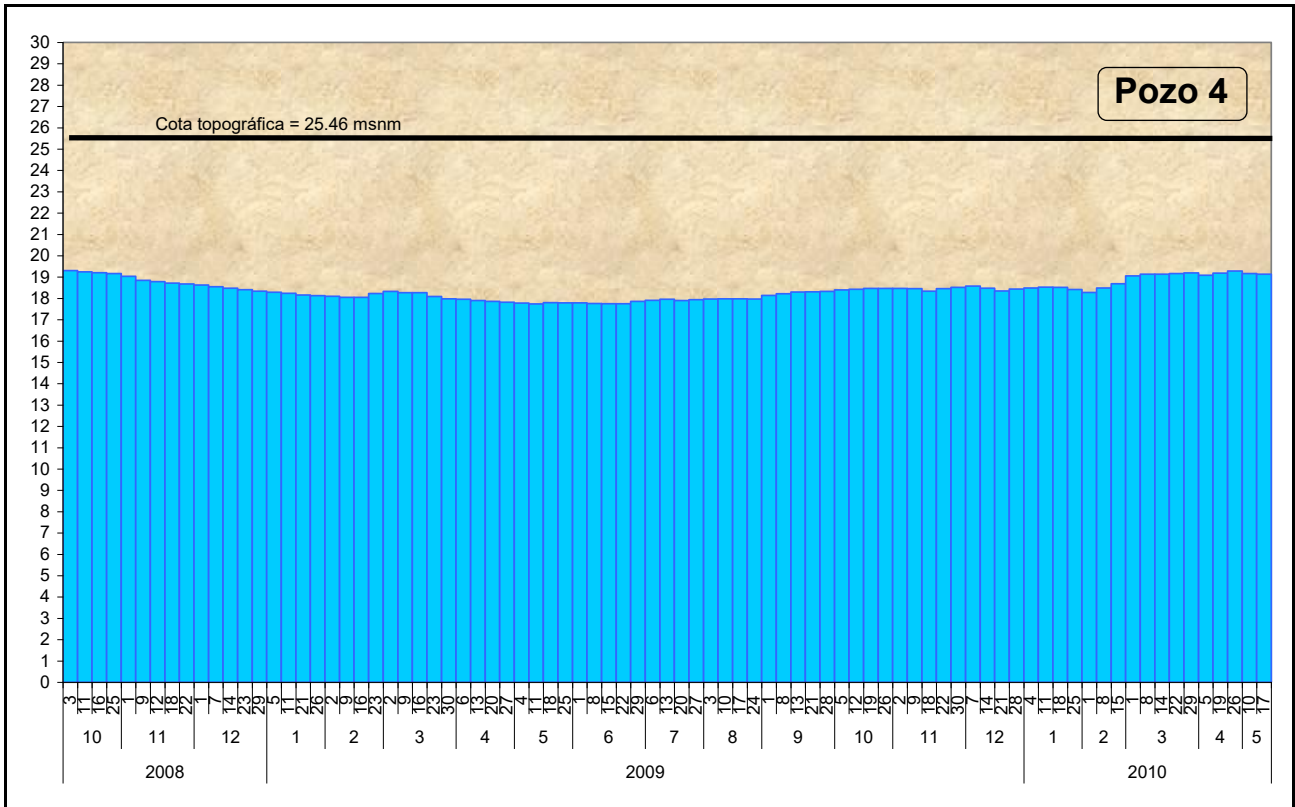


Gráfico 15. Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 4 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.

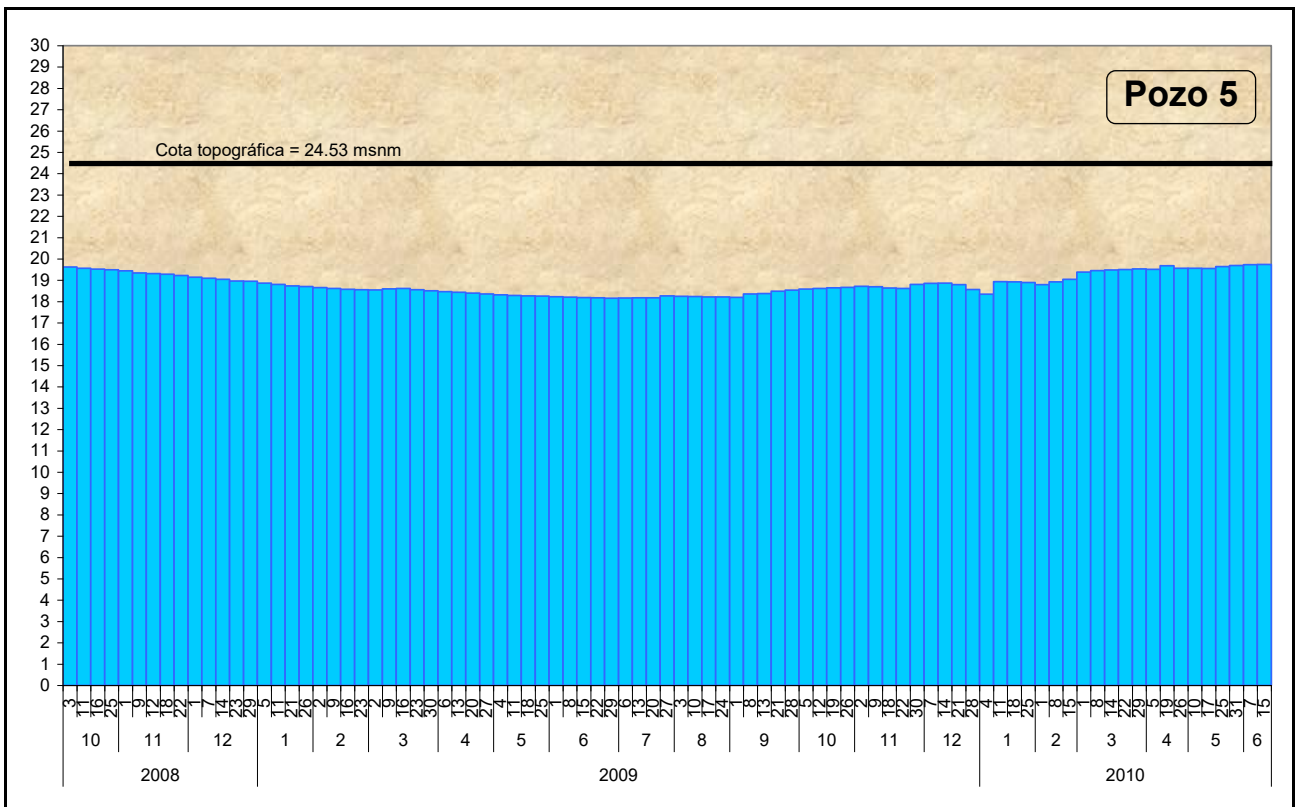
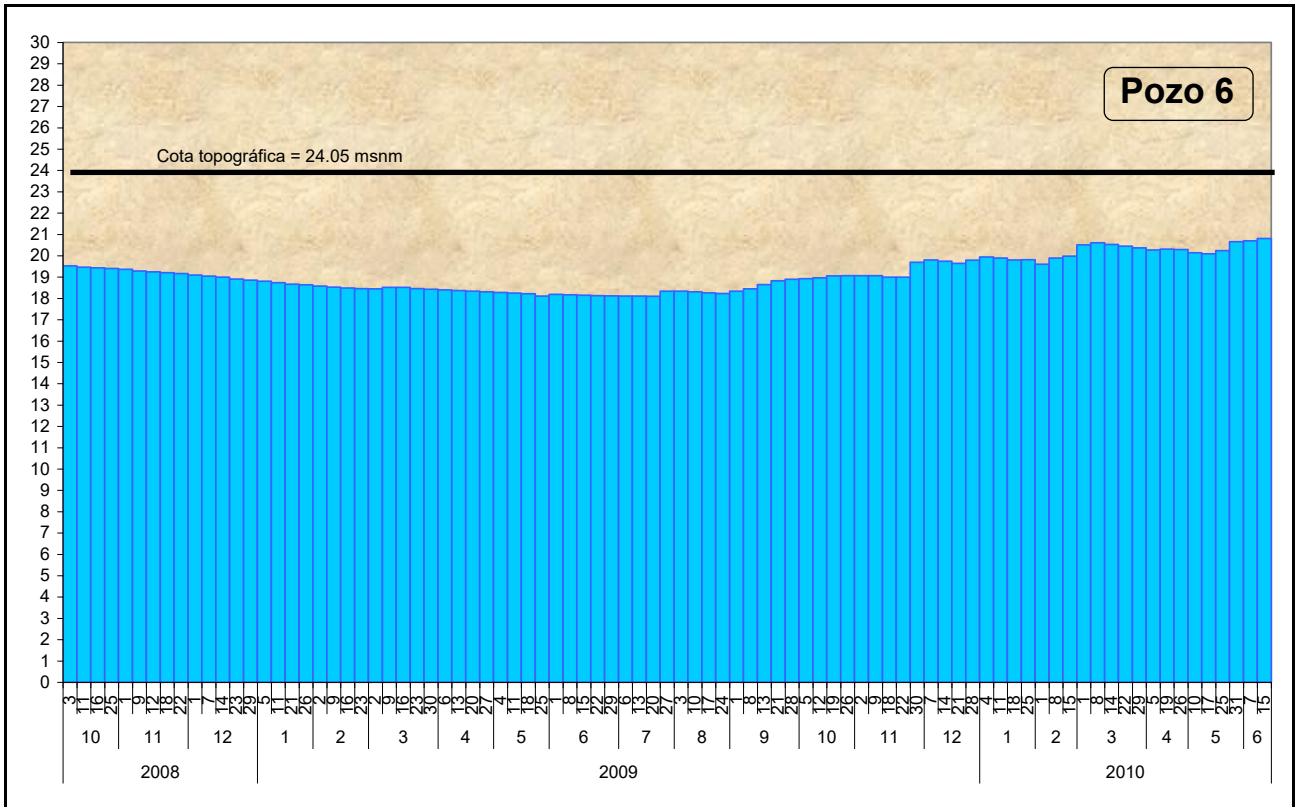


Gráfico 16. Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 5 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.



En los gráficos anteriores se observa el comportamiento individual del nivel freático correspondiente a cada pozo, en relación a sus niveles topográficos. La presentación de este tipo de gráficos permite una fácil interpretación del perfil freático y su evolución en el tiempo. El comportamiento individual caracteriza distintas respuestas ante los eventos de lluvia. Los pozos 3, 4 y 5 presentan una evolución gradual sin cambios abruptos entre lluvias, siendo además, los pozos 3 y 5, los que manifiestan las menores variaciones de nivel. Sin embargo, el comportamiento o tendencia general de todos los pozos es la misma, observándose, que los niveles freáticos mínimos se expresan en los meses de Junio-Julio de 2009 y los máximos en Junio de 2010.

En la tabla 21 se indican los valores de infiltración para cada uno de los pozos y un valor modal de infiltración, promedio de los 7 pozos. Los mínimos y máximos se corresponden con los valores mínimos y máximos encontrados en los gráficos anteriores para el período 15/06/2009 - 15/06/2010.

Tabla 21. Variación entre los valores máximos y mínimos de los niveles freáticos, valores de infiltración por pozo y general para la MALP.

Pozo	Mín. (m)	Máx. (m)	Variación (m)	Porosidad	Infiltración (mm)
<b>1</b>	17.26	19.56	2.30	0.1	<b>229.7</b>
<b>2</b>	17.40	19.41	2.00	0.1	<b>200.4</b>
<b>3</b>	17.46	19.43	1.98	0.1	<b>197.9</b>
<b>4</b>	17.74	20.05	2.32	0.1	<b>231.9</b>
<b>5</b>	18.16	19.74	1.58	0.1	<b>157.6</b>
<b>6</b>	18.09	20.81	2.71	0.1	<b>271.3</b>
<b>7</b>	17.28	19.78	2.50	0.1	<b>250.4</b>
					<b>219.9</b>

Acompañando las mediciones de la red de monitoreo de pozos se realizó un estudio Físico-Químico y Microbiológico del agua freática en el casco de la estancia, a la salida de la microcuenca, que demuestra que la calidad del agua es buena según el Código Alimentario Argentino (CAA). El análisis se realizó en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales y sus resultados se muestran en las tablas 22 y 23:

Tabla 22 y 23. Análisis físico-Químico de agua freática (03-12-08) y Análisis Microbiológico de agua freática (02-12-08)

Tipo de análisis	Resultados	Valor C.A.A.
pH	7,23	6,50 - 8,50
Dureza total	302 [mg/l]	Máx. 400 [mg/l]
Dureza cálcica	140 [mg/l]	-----
Dureza magnésica	137 [mg/l]	-----
Sólidos disueltos totales	667 [mg/l]	Máx. 1500 [mg/l]
Alcalinidad	524 [mg/l]	-----
Sodio	272,6 [mg/l]	-----
Cloruro	78,8 [mg/l]	350 [mg/l]
Sulfato	17 [mg/l]	400 [mg/l]
Nitrito	ausencia	Máx. 0,1 [mg/l]
Nitrato	7,19 [mg/l]	Máx.45 [mg/l]

Análisis	Muestra	C.A.A. Valor permitido
Bacterias aerobias totales	33	Máximo permitido 500 UFC / ml
Bacterias coliformes	21	Igual o menor de 3 en 100 ml
<i>Escherichia coli</i>	Ausencia	Ausencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Ausencia	Ausencia en 100 ml.

#### 7.4.5. Intercepción.

En la tabla 24 se indican los valores totales de precipitación directa (**P**), precipitación interna (**P<sub>i</sub>**), flujo caulinar (**F<sub>c</sub>**) y el resultado del cálculo de intercepción por el follaje forestal (**I**), en función de los valores anteriores, correspondientes al período comprendido entre Mayo del 2009 y Mayo del 2010, para las especies de Pino y Eucalipto.

Tabla 24. Valores de intercepción obtenidos para las especies de Pino y Eucalipto.

Especie	P (mm)	P <sub>i</sub> (mm)	F <sub>c</sub> (mm)	I (mm)
Eucalipto	1065.85	1022.48	33.09	10.29
Pino	1065.85	840.08	63.53	162.24

Los cuatro componentes enseñados en la tabla 24 (**P**, **P<sub>i</sub>**, **F<sub>c</sub>** y **I**), se encuentran representados gráficamente en forma mensual y mensual acumulada, para las especies de Eucalipto (Gráfico 19 y 20) y Pino (Gráfico 21 y 22).

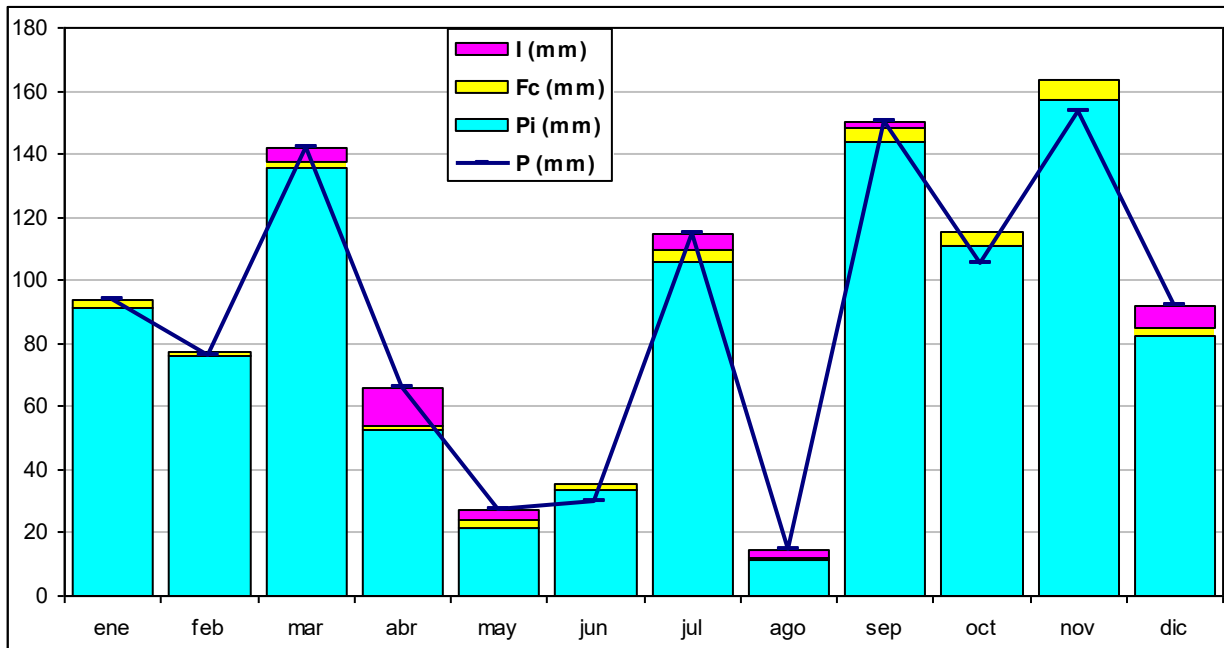


Gráfico 19. Valores mensuales de precipitación directa (**P**), precipitación interna (**P<sub>i</sub>**), flujo caular (**F<sub>c</sub>**) e intercepción (**I**) correspondientes a la forestación de Eucalipto.

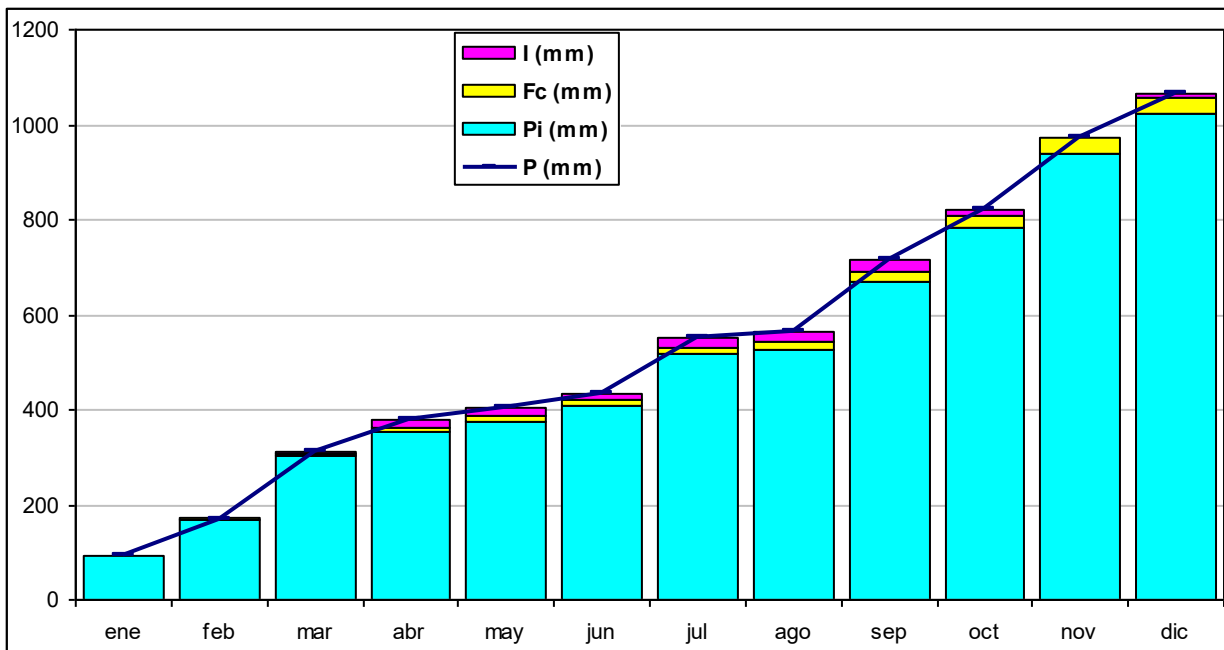


Gráfico 20. Valores mensuales acumulados de precipitación directa (**P**), precipitación interna (**P<sub>i</sub>**), flujo caular (**F<sub>c</sub>**) e intercepción (**I**) correspondientes a la forestación de Eucalipto.

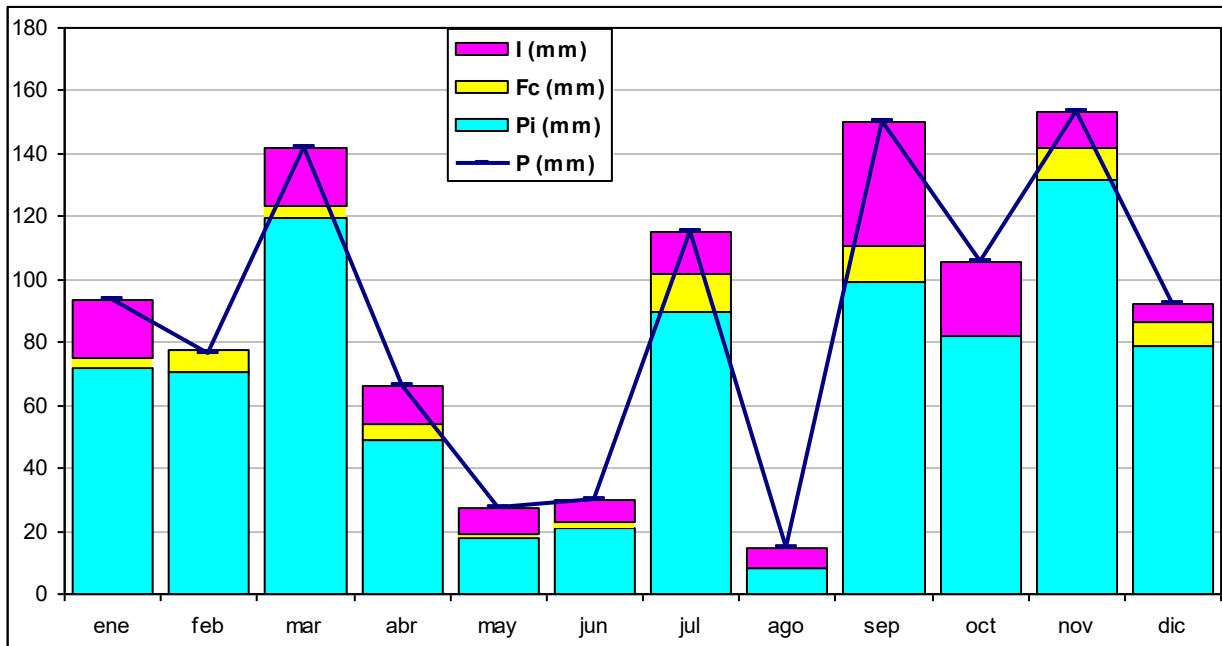


Gráfico 21. Valores mensuales de precipitación directa (**P**), precipitación interna (**P<sub>i</sub>**), flujo caular (**F<sub>c</sub>**) e intercepción (**I**) correspondientes a la forestación de Pino.

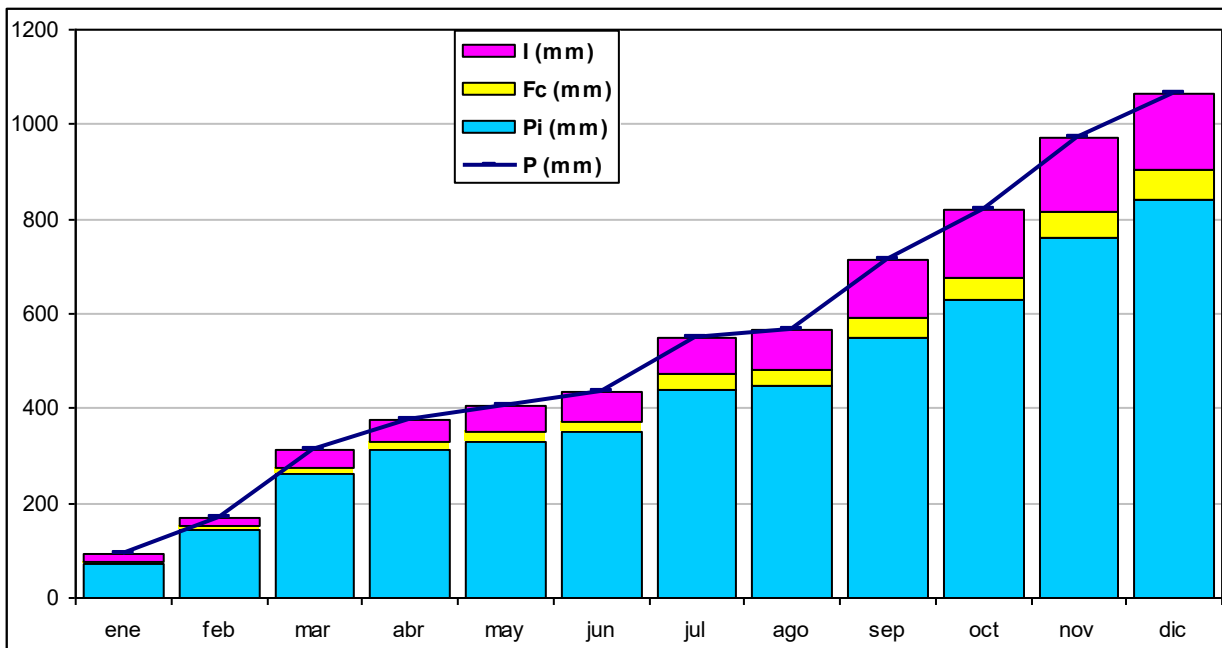


Gráfico 22. Valores mensuales acumuladas de precipitación directa (**P**), precipitación interna (**P<sub>i</sub>**), flujo caular (**F<sub>c</sub>**) e intercepción (**I**) correspondientes a la forestación de Pino.

Como puede verse en los gráficos anteriores (Gráficos 19 a 22), los valores de **P<sub>i</sub>** en el Eucalipto superan en un 17.1% a los del Pino, con respecto a **P**. Esto evidencia una menor

cobertura del suelo, por parte del Eucalipto, que alcanza un valor promedio de 36.7% frente a un 53.5% del Pino (16.8% de diferencia) (Apartado 7. 2. 6. 1.).

El  $F_c$  en Pino es superior que en Eucalipto, representando un 6.0% y un 3.1% del total de  $P$ , respectivamente. La  $I$  del Pino es del 15.2% de la  $P$  frente a un 1.0% del Eucalipto, esto manifiesta que el pino retiene en su follaje un porcentaje de agua de lluvia muy superior al del Eucalipto y a la vez, genera un retardo en la llegada del agua de lluvia al suelo por  $F_c$ , mayor que el Eucalipto.

En el caso del Eucalipto (Gráfico 19 y 20) se da la particularidad de que en los meses de febrero, junio, octubre y noviembre, los valores de  $P_i$  superan a los de  $P$ , debido a un posible fenómeno de captación de partículas de agua suspendidas en forma de niebla o de condensación del rocío.

Simulando una relación lineal de la cobertura forestal con respecto a su capacidad de interceptar el agua de lluvia, a través de un valor del 50% de cobertura forestal para ambas especies, se observa que el agua de lluvia que llega al follaje forestal ( $I + F_c$ ) es mayor en Pino (19.8%) que en Eucalipto (5.5%), lo cual responde a diferencias en cuanto a la arquitectura de sus follajes (más cerrado en Pino), y al formato y disposición de hojas y ramas en ambas especies.



## 7.5. APLICACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

### 7.5.1. Simulador de llluvias.

En las tablas 25 y 26, se muestran los resultados de la aplicación del simulador de llluvias, indicando los valores de lámina simulada (mm/h y %), la retención en el primer horizonte del suelo (mm y %), el escurrimiento superficial (mm y %) y la infiltración en el perfil del suelo (mm y %), para cada uno de los ensayos y para cada una de las repeticiones.

Tabla 25. Resultado de ensayos realizados con simulador de llluvias en mm.

	Pinos					Eucaliptos					Pastizal modificado				
	1	2	3	4	Prom.	1	2	3	4	Prom.	1	2	3	4	Prom.
Lámina (mm/h)	30	30	30	30	<b>30</b>	30	30	30	30	<b>30</b>	30	30	30	30	<b>30</b>
Retención (mm)	9.80	9.50	9.90	9.73	<b>9.73</b>	6.25	12.40	8.50	8.90	<b>9.01</b>	7.4	11.2	9	7.7	<b>8.82</b>
Escurrimiento (mm)	10.06	17.09	11.70	12.95	<b>12.95</b>	22.40	16.90	21.50	20.50	<b>20.32</b>	19.9	16.3	20	21.2	<b>19.35</b>
Infiltración (mm)	10.14	3.41	8.40	7.32	<b>7.32</b>	1.30	0.70	0.00	0.60	<b>0.65</b>	2.7	2.5	1	1.1	<b>1.83</b>

Tabla 26. Resultado de ensayos realizados con simulador de llluvias en %.

	Pinos					Eucaliptos					Pastizal modificado				
	1	2	3	4	Prom.	1	2	3	4	Prom.	1	2	3	4	Prom.
Lámina simulada (%)	100	100	100	100	<b>100</b>	100	100	100	100	<b>100</b>	30	30	30	30	<b>100</b>
Retención inicial (%)	33	32	33	32	<b>33</b>	21	41	28	30	<b>30</b>	25	37	30	26	<b>29</b>
Escurrimiento (%)	33	57	39	43	<b>43</b>	75	56	72	68	<b>68</b>	66	55	67	71	<b>65</b>
Infiltración (%)	34	11	28	24	<b>24</b>	4	2	0	2	<b>2</b>	9	8	3	3	<b>6</b>

A partir de las tablas anteriores, se interpreta que los valores de retención inicial para una lámina de 30 mm/h son similares en los tres ensayos, siendo el proceso de infiltración-escurrimiento el que marca la diferencia. En todas las situaciones prevalece el escurrimiento frente a la infiltración, por tratarse de suelos con un horizonte A delgado o inexistente en sectores, que poseen un horizonte Bt muy cercano a la superficie, concreciones calcáreas en manto y problemas de acumulación de sodio. En la forestación de pinos, sin embargo, se ve favorecida la infiltración frente a las otras condiciones, siguiéndole en magnitud, los suelos de pastizal natural cercanos a cultivos y, finalmente, las forestaciones de Eucalipto con valores muy bajos de

infiltración. Estos fenómenos responden principalmente a las características de los suelos, a los tipos de vegetación y a la capacidad exploratoria de sus sistemas radicales.

La emisión de sedimentos obtenida de las simulaciones para los tres casos contemplados son iguales a  $0.025 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para el Pino, de  $0.029 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para el Eucalipto y de  $0.016 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  para el pastizal natural modificado.

### 7.5.2. Perfiles del suelo.

Los perfiles del suelo se realizaron en distintas unidades cartográficas, caracterizadas por Hurtado *et al.* (2006) como GI-3 (perfil 1 - A. La Paloma), Nv2 (perfil 2 - Forestación de Pino) y AS-Go (perfil 3 - Forestación de Eucalipto)

**Perfil 1:** El pozo se realizó el día 16/02/2008, hasta encontrar el nivel freático a una profundidad de 0.85 metros. Los horizontes superficiales fueron extraídos para la construcción del canal por lo que el material extraído hasta la freática se corresponde con un horizonte C, tipo “pampeano” con intercalaciones calcáreas.

**Perfil 2:** El pozo se realizó el día 18/07/2008, hasta encontrar el nivel freático a una profundidad de 4.95 metros. Del material extraído se puede identificar un mantillo de acículas, ramas y conos de 13 cm de profundidad seguido por un horizonte A de 7-9 cm, color negro con abundante materia orgánica y muy poroso interrumpido por una capa impermeable de tosca, muy dura de 4-6 cm, atravesada por abundantes raíces, un horizonte Bt gris oscuro mojado hasta los 70 cm de profundidad, y luego, un horizonte C de material limo arcilloso (pampeano) con algunas intercalaciones de variado espesor de tosca a partir del metro de profundidad.

**Perfil 3:** El pozo se realizó el día 30/08/2008, hasta una profundidad de 5 m sin encontrar el nivel freático. Del material extraído se identifica un mantillo compuesto de hojas y ramas que no supera el valor de 1 cm de espesor, luego un horizonte A de poca profundidad (0 a 10 cm) gris oscuro, interrumpido con límite neto y ondulado por un horizonte Bt gris claro de 20 cm,

impermeable, que se extiende hasta el metro de profundidad de color gris oscuro, mas permeable. A partir del metro, se encuentra un horizonte C de material limo arcilloso de tipo “pampeano” con intercalaciones de tosca. A partir de los 70 cm de profundidad se pueden ver moteados claros que responden a ascensos de la napa freática (gleisados).

### 7.5.3. Emisión de sedimentos.

La cuantificación de los factores de la USLE, se ha desarrollado a nivel de la MALP geográficamente. En la figura 34 se muestra un mosaico de imágenes digitales georreferenciadas correspondientes a los componentes **K**, **LS** y **C**.

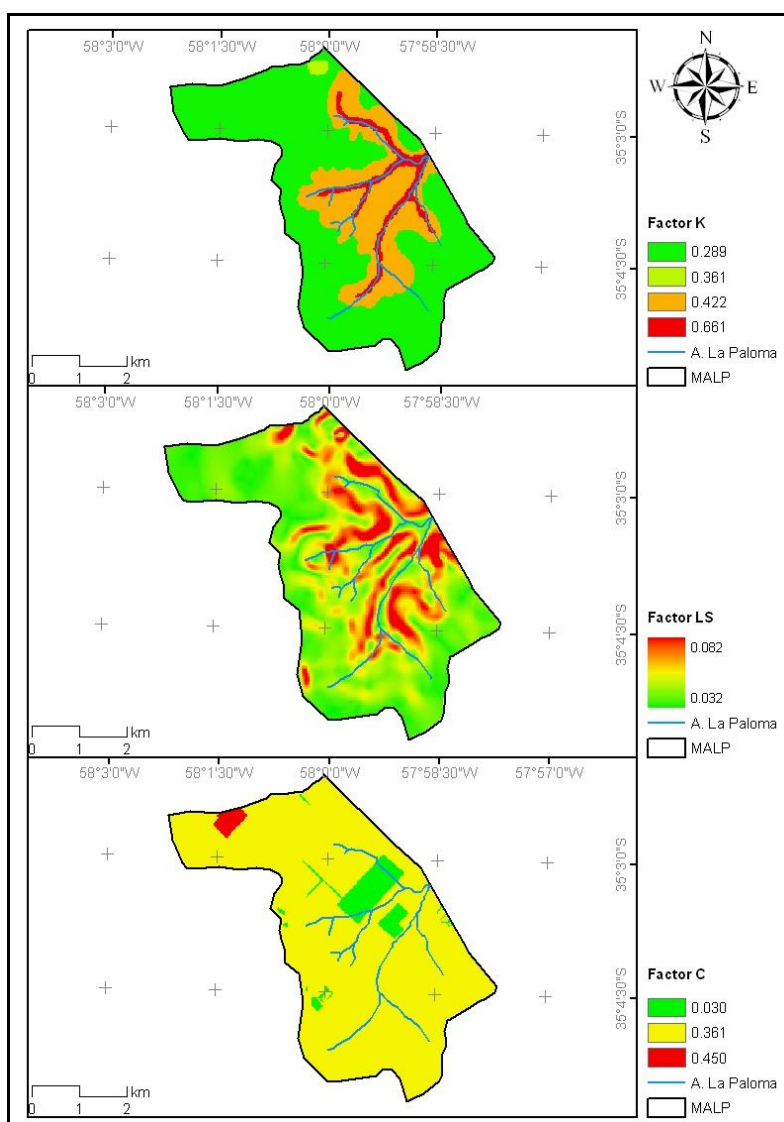


Figura 34. Factores K ( $Tn.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$ ), LS (adimensional) y C (adimensional) de la USLE.

En la figura 35 se presenta la zonificación de la pérdida de suelo, como resultado de la USLE, para la Microcuenca La Paloma, expresada en toneladas de material sólido perdido por año por hectárea. Para el cálculo de la misma se utilizaron, además de los componentes antes mostrados en la figura 34, el factor regional  $R$ , con un valor de  $= 453 \text{ J.cm.m}^2.\text{h}^{-1}$  y el factor  $P = 1$ , debido a que no se realizan prácticas conservacionistas.

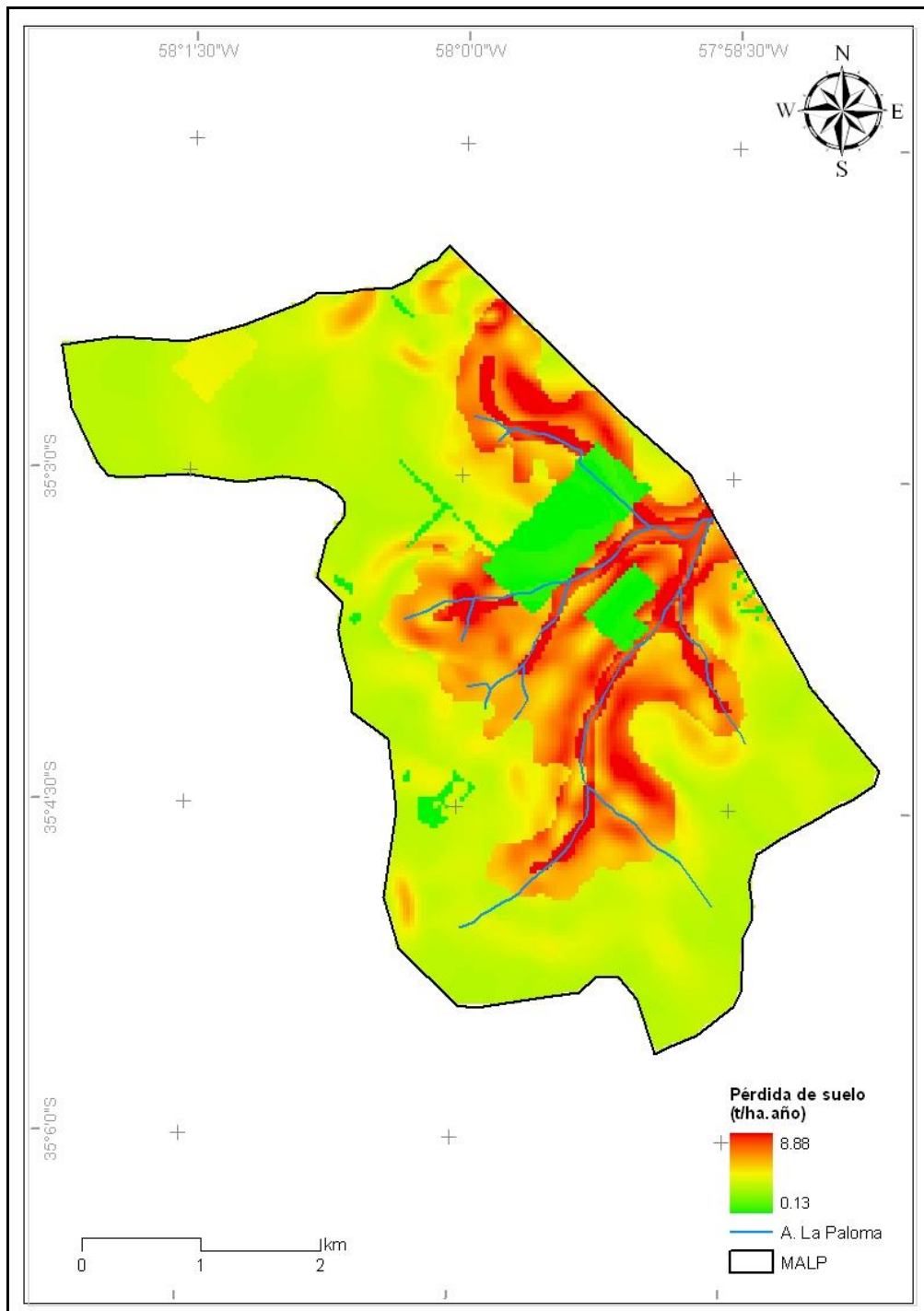


Figura 35. Pérdida de suelo ( $\text{Tn}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ) causada por erosión hídrica superficial en la MALP.

En función de la pérdida de suelo calculada a través de la USLE, se puede inferir que la emisión de sedimentos, es insuficiente, definiendo a la MALP como un área sin problemas erosivos, con valores bajos de erosión hídrica superficial. Se debe aclarar que existe erosión hídrica puntual, en profundidad, como ser regüeros y cárcavas.

Gaspari *et al.*, (2009) indican la conveniencia de contar con tablas de clasificación en rangos de pérdida de suelo, particulares para cada región. En la MALP actualmente no se dispone con dicha información por lo cual se utilizó una clasificación universalmente aceptada, elaborada por FAO, PNUMA y UNESCO (1981) (Tabla 27).

Tabla 27. Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Adaptada de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

<b>Pérdida de suelo ( Tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
< 10	Leve o nulo
10 – 50	Moderado
50 – 200	Alto
> 200	Muy alto

Según esta tabla, la MALP se clasifica como con un grado de erosión hídrica superficial leve a nula. El valor medio ponderado de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial, correspondiente a las plantaciones forestales, es de 0.26 Tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, encontrándose dentro de un rango de valores que varía de 0 a 0.53 Tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Para el resto de la MALP, se obtiene un valor medio ponderado igual a 2.36 Tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, que se encuentra en un rango de 0.53 a 8.88 Tn.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>.

## **7.6. ANÁLISIS DE PROCESOS HIDROLÓGICOS Y MODELO CONCEPTUAL DE EFECTOS DE LA MASA FORESTAL**

El análisis de los procesos hidrológicos se acotó al período Mayo-2009 a Mayo-2010, en donde se registraron un total de **1065.85 mm** de lluvia, siendo noviembre el mes mas lluvioso con **153.45 mm**, y agosto el menos lluvioso con **14.61 mm**. La distribución estacional de la lluvia para este período presenta un máximo de **409.29 mm** en primavera, un mínimo de **158.81 mm** en invierno y un comportamiento uniforme en verano y otoño, con valores de **262.20 mm** y **235.55 mm** respectivamente.

El suelo, al comienzo de este período y hasta el mes de Julio, todavía no se ha recuperado de la seca del 2008, presentando una situación deficitaria con descensos del nivel freático hasta niveles mínimos medios de **17.63 msnm**. A partir del mes de Julio de 2009, esta situación de déficit se revierte provocando un ascenso del nivel freático hasta valores máximos medios de **19.83 msnm**. El registro semanal de la red de monitoreo de pozos, permitió traducir esta situación de excesos hídricos en un valor promedio de Infiltración para la MALP, igual a **219.9 mm**, lo cual representa un **20.6 %** del balance total para el período mencionado.

Haciendo una diferenciación entre los distintos usos del suelo, se estimó un valor de infiltración para el rodal de Eucalipto igual a **231.9 mm**, otro para el de Pino de **197.9 mm** y uno para el resto de los usos (pastizal natural modificado y agricultura extensiva) igual a **221.9 mm**, que expresados en porcentaje del balance general, resulta: **21.8%**, **18.6%** y **20.8%** respectivamente.

La forestación en estudio consigna una superficie total de **137.6 ha**, de las cuales, **127.4 ha** están ocupadas por Eucalipto y **6.6 ha** por Pino. Dentro de estas forestaciones, se registraron valores de precipitación interna y flujo caulinar, que se relacionaron con la cobertura forestal existente y se obtuvo un valor de intercepción total de **172.5 mm**. De este total, **10.3 mm** corresponde al Eucalipto y **162.2 mm** al Pino, lo que equivale a un **0.97%** y un **15.22%** respectivamente, en el balance general. A los valores de intercepción por el follaje forestal se

sumó la lámina de agua interceptada por la vegetación herbácea cercana al suelo y por el material vegetal en descomposición que se desarrolla en forma de manto sobre el suelo y que fue calculada a través de los ensayos de simulación de lluvias. Los valores de intercepción a nivel cercano al suelo son de **9.7 mm** para el Pino, **9.0 mm** para el Eucalipto y de **8.8 mm** para el resto de los usos, siendo la intercepción total de **171.9 mm**, **19.3 mm** y **8.8 mm** respectivamente, lo que representa un **16.1%**, **1.8%** y un **0.8%** de la precipitación directa.

En lo que respecta al escurrimiento superficial, se calculó una media total ponderada por tipo de cubierta vegetal, igual a **99.9 mm** para toda la MALP, correspondiendo a las forestaciones un valor de **106.2 mm** y al resto de los usos uno de **99.5 mm**, lo que significa un **10.03%** y un **9.33%** de **P**, respectivamente.

A fin de completar el balance se estableció una evapotranspiración real de **690.85 mm** para el Pino, **713.65 mm** para el Eucalipto y **735.65 mm** para el resto de los usos. Estos valores son similares a los encontrados de forma indirecta por la metodología de Thornthwaite lo cual permite suponer que los distintos componentes resultan coherentes entre ellos.

A continuación se presenta una tabla resumen de los valores expuestos anteriormente para cada uno de los componentes del balance hidrológico y para cada uno de los usos de interés (Tabla 28). Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que los valores presentados de intercepción ( $I_0$ ), forman parte de la evapotranspiración real (**ETR**), por lo que **ETR<sub>0</sub>** hace referencia a una **ETR** parcial en la que se descuenta la intercepción para facilitar la comparación entre factores. Los valores de precipitación directa anual (**P**), infiltración anual (**I**) y caudal de escorrentía (**Q**) se presentan en **mm** y **% de P**.

Tabla 28. Componentes del balance hidrológico para Pino, Eucalipto y resto de los usos presentados.

	<b>P</b>		<b>I</b>		<b>I<sub>0</sub></b>		<b>Q</b>		<b>ETR<sub>0</sub></b>	
	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(%)</b>
<b>Pino</b>	1065.85	100	197.9	18.6	171.9	16.1	5.2	0.49	690.85	64.82
<b>Eucalipto</b>	1065.85	100	231.9	21.8	19.3	1.8	101.0	9.48	713.65	66.96
<b>Resto</b>	1065.85	100	221.9	20.8	8.8	0.8	99.5	9.33	735.65	69.02

De los resultados así presentados (Tabla 28), se entiende que las forestaciones actúan principalmente aumentando la intercepción del agua de lluvia y disminuyendo la lámina de escurrimiento, resultando secundarios o de menor magnitud los efectos sobre los componentes de Infiltración y evapotranspiración. La forestación de Pino, con un **53.5%** de cobertura del suelo y un manto de acículas de **13 cm**, tiende a disminuir los valores de infiltración y evapotranspiración real, mientras que la forestación de Eucalipto, con un **36.7%** de cobertura y desarrollo de vegetación herbácea, tiende a aumentarlos.

Es evidente que las forestaciones generan un aumento en el fenómeno de intercepción del agua de lluvia como así también, condensación interna del vapor atmosférico, rocíos y escarchas, y precipitación horizontal o suering. Esto último se evidencia por un aumento de la precipitación dentro de las forestaciones con respecto a la precipitación directa. La condensación interna se debe a la existencia de una mayor humedad relativa bajo la cubierta forestal y a la menor temperatura que presentan los fustes y raíces de las especies forestales con respecto a la temperatura ambiente, lo cual, sumado a que la superficie de contacto de estas especies supera ampliamente a las de una situación de suelo desnudo, favorecen los fenómenos de acumulación de agua por condensación de rocío y escarcha. La precipitación horizontal o suering, se encuentra dado por la niebla captada por ramas y hojas, manifestada como una llovizna suave bajo la canopea.

Las características del terreno en cuanto a sus pendientes, origina que pequeñas modificaciones en el mismo, generen cambios visualmente distinguibles en el escurrimiento superficial y aportaciones hacia los cauces. En el caso de los pinos, esta situación se encuentra exacerbada por la presencia de un colchón de acículas inalteradas que interceptan las gotas de lluvia evitando su efecto negativo en el suelo a la vez que retienen su flujo horizontal hacia los cauces. En el caso de los eucaliptos, se trata de una forestación que ha sido aprovechada en el año 2000 y actualmente no muestra una cubierta vegetal o de restos vegetales capaz de retener el flujo de agua superficial. El suelo bajo los eucaliptos muestra evidencias del aprovechamiento, que se manifiesta entre las líneas de plantación con un suelo mas compacto, apisonado o



simplemente mas bajo que forma una suerte de canales que llevan el agua hacia zonas mas bajas del terreno, favoreciendo de esta manera el flujo horizontal de agua en el terreno frente al vertical.

### **7.7. CRITERIOS DE MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.**

En vista de los resultados obtenidos se observa que el principal perjuicio para el desarrollo productivo en la MALP, esta dado por los excesos hídricos que se manifiestan como encharcamientos prolongados. Estos encharcamientos se deben a un drenaje superficial insuficiente, incapaz de evacuar el exceso de agua superficial, y a un drenaje interno impedido por la presencia de capas impermeables y abundante contenido de arcillas en el suelo. Este problema puede ser subsanado mediante una serie de prácticas que se enumeran a continuación:

- Realización de drenes superficiales en forma paralela. Se trata de surcos realizados a favor de la pendiente general, que desaguan en drenes superficiales paralelos. Estos presentan, en su sección transversal, pendientes suaves posibilitando de esta manera evacuar el exceso de agua superficial que se presente con cierta recurrencia sin afectar el tránsito de maquinaria y ganado, y minimizando el riesgo de erosión superficial.
- Instalación de fajas alomadas y surcos. Sin ser la práctica más efectiva, se trata de un sistema sencillo que se emplea habitualmente en suelos arcillosos para evacuar el exceso de agua superficial. Esta práctica consiste en la realización de fajas, provistas de una ligera pendiente del terreno hacia surcos que drenan en dirección a la pendiente dominante y desaguan finalmente en un colector principal.
- Cortinas de Eucalipto siguiendo los surcos o colectores de agua superficial, con el doble objetivo de facilitar el drenaje vertical y retener los márgenes de los colectores.
- Montes de Pino circundantes a zonas encharcables, con un distanciamiento tal que permita el pastoreo, con el objetivo de interrumpir el escurrimiento a estas zonas, aumentar la infiltración

y aumentar el volumen de agua evapotranspirada disminuyendo el tiempo de permanencia del agua en superficie.

- Prácticas silvícolas de poda y raleo en los montes de Eucalipto, con el fin de lograr el desarrollo de un fuste único por pie, aumento de la cobertura forestal del suelo y desarrollo de vegetación herbácea para pastoreo.
- Prácticas silvícolas de raleo en Pino para propender el desarrollo de vegetación herbácea para pastoreo.

## 8. CONCLUSIONES.

La metodología implementada permitió cuantificar las variables de precipitación, interceptación, evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial para realizar un balance hidrológico en la cuenca estudiada.

El análisis comparativo de los componentes del ciclo hidrológico, indicó que la presencia de masas forestales promueven un aumento de los flujos verticales de agua en el suelo a través de un retardo de la llegada de agua por interceptación en el follaje, un aumento en la porosidad del suelo por acumulación de material orgánico y exploración de los sistemas radicales y un retardo del escurrimiento superficial por la acción de trabado del material vegetal en descomposición y los fustes en pie. También producen un aumento considerable en el volumen de agua evapotranspirada en períodos de excesos hídricos, atenúan el efecto degradativo de las lluvias intensas por impacto de gotas y aumento del escurrimiento y propician la acumulación de agua en condiciones de déficit hídricos por condensación de la humedad del aire y lluvia horizontal.

En la MALP, las forestaciones de Pino, evidenciaron valores de interceptación superiores a las de Eucaliptos a la vez que presentan valores de escurrimiento y evapotranspiración inferiores. Además, debido al grueso colchón de acículas, ramas y conos que desarrolla a nivel del suelo, genera un aporte importante de materia orgánica al suelo, y por tanto un aumento en la porosidad del mismo que facilita un incremento de la infiltración y una importante disminución del escurrimiento superficial.

Los valores de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la MALP resultaron ser muy pequeños y por lo tanto insignificantes. Quedando a consideración, para futuros estudios, la erosión de tipo química por acumulación de sodio, ya que posee un carácter más relevante en la zona de estudio.

## **9. AGRADECIMIENTOS.**

A mis padres, Jorge Guillermo Besteiro y Moira Torrilla, por el constante apoyo y confianza que siempre me dieron.

A mi compañera de vida, Sara Itzel Montemayor, por ser el sostén más importante en cada paso de mi vida, por su respaldo y acertados consejos en cuanto a mi desarrollo profesional y por darme el mejor regalo del mundo que alegra cada segundo de nuestras vidas, nuestro hijo.

A mis directores, Fernanda Julia Gaspari y Eduardo Kruse, por estar siempre presentes y compartir con migo todo su tiempo y experiencia, y especialmente a Fernanda por ser una excelente compañera de trabajo cuyo impulso permanente fue el motor que resolvió la finalización de mi tesis.

A mis colegas y amigos, Alfonso Rodríguez Vagaría e Isabel Delgado, por su paciencia y buena disposición. Por acompañarme cada vez que los necesité en los trabajos de tomas de datos, simulaciones e instalación de instrumental y especialmente a Alfonso por su ojo crítico y técnico en la realización de las mediciones y confección del instrumental de campo.

A Aranda Cuevas, dueño de la Estancia El Centauro, por darme plena libertad de ingreso a su campo para la medición e instalación de la red de monitoreo de pozos e instrumental de medición, realización de perfiles en cauces y todo tipo de ensayos que fueran necesarios para la realización de la tesis de maestría.

Al Ing. Agr. Marcelo D. Asborn, de la Experimental Hirschoorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, por haberme facilitado todos los datos de la estación experimental como así también, por el aporte de su experiencia en el tema.

## 10. BIBLIOGRAFÍA.

**Abbasi, S. A. y S. Vinithan. 1997.** Ecological Impacts of Eucalyptus: Myths and Realities. *Indian Forester* 123 (8): 710-739.

**Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y M. Smith. 1998.** Crop evapotranspiration. Serie de Riego y Drenaje, FAO-56. Roma. 301 p.

**Ameghino, F. 1884.** Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no obras de desagüe. Secretaría de Política Ambiental, Buenos Aires. 97 p.

**Arnold, J. G.; R. Srinivasan, R. S. Muttiah y J. R. Williams. 1998.** Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. American Water Resources Association* 34 (1): 73-89.

**Ataroff, M. y F. Rada. 2000.** Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest. *Ambio* 29 (7): 440-444.

**Auge, M. P. 1995a.** Manejo del agua subterránea en La Plata, Argentina. 3 T. Inéd. La Plata.

**Auge, M. P. 1995b.** Similitudes hidrogeológicas entre los acuíferos Pampeano y Puelche en La Plata, Argentina. II Seminario Hispano Argentino de Hidrología Subterránea. Tucumán. 235-241.

**Auge, M. P. 2006.** Agua subterránea. Deterioro de calidad y reserva, Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Cátedra de Hidrogeología, Universidad de Buenos Aires. 173 p.

**Auge, M. y M. A. Hernández. 1984.** Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la Llanura Bonaerense (Geohydrologic behavior of the Puelche semiconfined Aquifer in the Bonaerense Flatland). Coloquio Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras. UNESCO (III), París - Buenos Aires. 1019-1043.

**Blaney, H. F. y W. D. Criddle. 1950.** Determining Water needs From Climatological Data. U. S. D. A. Soil Conservation Service. SOS –TP. 8-9.

**Bouwer, H. 1960.** A study of final infiltration rates from ring infiltrometers and irrigation furrows with a resistance network analog, in 7th International Congress of Soil Science, International Society of Soil Science, Madison, Wis. vol. 1: 448-456.

**Bruijnzeel, L. A. 1991.** Hydrological impacts of tropical forest conversion. *Nature & Resources* 27 (2): 36-45.

**Bustamante, E. 1984.** Hidrología. Conceptos de hidrología de superficie. Modelos matemáticos deterministas. Centro de investigaciones hídricas de la región semiárida (CIHRSA), Argentina. 336 p.

**Carlevari, I. J. F. y R. D. Carlevari. 2007.** La Argentina, Geografía económica y humana. Ed Alfaomega Grupo Editor Argentino S. A. Paraguay 1307, PB, oficina 11; Buenos Aires, Argentina. 14ª Ed. 543 p.

**Chow, V. T., Maidment, D. R. y L. Mays. 1994.** Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 p.

**Custodio, E. y R. M. Llamas. 1996.** Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, S. A., Barcelona. Segunda edición, Tomo 1. 1154 p.

**De Francesco, F. O.; Gentile, O.; Nuccetelli, G.; Fucks, E. y U. Colado. 1999.** Mapa Geológico de las hojas Chascomús y Buenos Aires. Escala 1:250.000. Actas XIV Congreso Geológico Argentino, Salta. 1: 287-290.

**De Francesco, F.; Gentile, O.; Fucks E. y R. Colado. 2001.** Caracterización Geoambiental del sector comprendido entre Punta Lara y Punta Blanca. Provincia de Buenos Aires. III Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenamiento del Territorio y I Reunión del Área del MERCOSUR de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Mar del Plata. Publicación Digital: 13 p.

**de Paula Lima, W. 1993.** Impacto ambiental do eucalipto, Edusp, Sao Paulo, 301 p.

**Delgado, M. I. 2009.** Estudio de la dinámica del ciclo hidrológico en sitios forestados, en el Sistema Serrano Bonaerense de Ventania, Argentina. Tesis de Maestría, Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 180 p.

**Dourojeanni, A. 1994.** Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable: la Gestión Integral de Cuencas, CEPAL-INRENA, Lima. 222 p.

**Eamus, D.; Hatton, T.; Cook, P. y C. Colvin. 2006.** Ecohydrology Vegetation Function, Water and Resource Management. ISBN 0 643 06834 1. Csiro Publishing. Australia. 348 p.

**Fidalgo F., De. Francesco, F y R. Pascual. 1975.** Geología superficial de la llanura bonaerense. Relatorio VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca, Bs As. 103-138.

**Fidalgo, F.; De Francesco, F. O. y U. R. Colado. 1973.** Geología superficial en las Hojas Castelli, J. M. Cobo y Monasterio (Pcia. de Bs. As.). Actas V Congreso Geológico Argentino, Córdoba. 4: 27-39.

**García Nájera, J. M. 1962.** Principios de la Hidráulica Torrencial. Su aplicación a la Corrección de Torrentes. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid. 349 p.

**Gaspari, F. J.; Senisterra, G. E.; Delgado, M. I.; Rodríguez Vagaría, A. M y S. I. Besteiro. 2009.** Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. 1ª ed., ISBN 978-987-05-6165-1. La Plata. 321 p.

**GeolINTA.** © Copyright 2008. INTA. Rivadavia 1439 (1033) Buenos Aires, Argentina. [www.geointa.gov.ar](http://www.geointa.gov.ar)

**Gil Ribes, J. A.; Blanco Roldán, G. L. y A. Rodríguez Lizana. 2004.** Técnicas de Agricultura de Conservación. Ed. Mundi-Prensa, I.S.B.N. 84-8476-220-3. 168 p.

**Gonzalez, N., Hernandez, M. A. y A. Ruiz de Galarreta, 1997.** Balance hidrológico a nivel de la zona no saturada en un área de la cuenca de los Arroyos Martín y Carnaval, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. III Seminario Hispano – Argentino sobre temas actuales de Hidrología Subterránea. Bahía Blanca. 97–106.

**Gottle, A. y E. H. Sène. 1997.** Funciones protectivas y ambientales de los bosques. Revista Unasyuva Nro 190-191. Undécimo congreso forestal mundial, Vol. 48, versión digital. <http://www.fao.org/docrep/w6251s/w6251s00.htm#Contents>

**Hamilton, L. S. y P. N. King. 1983.** Tropical forested watersheds, Hydrologic and soils response to mayor uses or conversions, East-West Center/UNESCO-MAB, Westview Press, Boulder, 168 p.

**Henaos, J. 1988.** Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Centro de enseñanza descolarizada, Bogotá. 399 p.

**Huber, A. y D. López. 1993.** Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don). Valdivia, Chile. Revista Bosque, Fac. de Ciencias Forestales, Universidad austral de Chile, Vol. 14 (2); 11-18.

**Hudson, N. W. 1997.** Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68). Ed Silsoe Associates, Ampthill, Bedford, Reino Unido. Versión digital en: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s00.htm#Contents>

**Hurtado, M. A.; Giménez, J. E. y M. G. Cabral. 2006.** Análisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial – 1ª ed. –Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones. 134 p.

**I. N. T. A. 1989.** Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. 544 p.

**Iproga. 1996.** Metodología para la Elaboración de Planes Maestros de Cuencas, Instituto de Promoción para la Gestión del Agua, Lima, 78 p.

**Irurtia, C. y R. Mon. 1994.** Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación No. 176. Instituto de suelos. INTA Castelar. 19 p.

**Irurtia, C.; Cruzate, G. y F. J. Gaspari. 2007.** Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica: Guía de divulgación técnica. – 1ª ed. – Buenos Aires. 25 p.

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

**Jobbágy E. G., Sznajder G., Nosetto M., Aragón R., Mangas G. y S. de Forteza. 2007.** Dinámica de napas y riesgo de inundación: Influencias y efectos en la variabilidad de los cultivos. Mundo Agro. Buenos Aires, Argentina. 8 p.

**Jobbágy, G. E.; Santoni, S. C. y G. Baldi. 2008.** El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. Ecología Austral. Asociación Argentina de Ecología. Vol. 18: 305-322.

**Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan. 1994.** Erosión de Suelos. Ed. Limusa, Noriega Editores. I.S.B.N. 968-18-1699-4. México D.F. 375 p.

**Kramer, P. J. 1969.** Plant and Soil Water Relationships: A Modern Synthesis. McGrawHill Book Co., Nueva York. 482 p.

**Kumari, K. y K. M. Chomitz. 1996.** The Domestic Benefits of Tropical forests: A Critical Review Emphasizing Hydrological Functions, The World Bank Working Paper N° 1601, 52 p.

**Laurencena, P.; Kruse, E.; Rojo A. y M. Deluchi. 2002.** Características de las variaciones freáticas en un área del noreste de la provincia de Buenos Aires. XXXII IAH & VI ALSHUD Congreso 'Aguas Subterráneas y Desarrollo Humano'. Mar del Plata. Argentina. 176 p.

**Laurencena, P.; Kruse, E.; Rojo, A.; Deluchi, M.; E. Carol. 2005.** Variaciones de niveles freáticos en la cuenca del Arroyo El Pescado (provincia de Buenos Aires). IV Congreso Hidrogeológico Argentino y II Seminario Hispano – Americano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea. Río IV, Córdoba, Argentina. 77 – 84.

**Linsley, R. K. JR.; Kohler, M. A. y J. L. H. Paulhus. 1993.** Hidrología para ingenieros. Segunda edición en español. Ed. McGraw – HILL. México, D.F. 386 p.

**Llamas, J. 1993.** Hidrología general: Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España. 635 p.

**López Cadenas de Llano, F. y M. Blanco Criado. 1976.** Hidrología Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. I.S.B.N. 84-600-6858-7. Ciudad Universitaria, Madrid. 386 p.

**López Cadenas del Llano, F. 1998.** Restauración Hidrológico Forestal y control de la Erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa-Tragsatec, Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. 945 p.

**Maccarini, G. D.; Baleani, O.; Cruzate, G.; Puentes, M. I.; Chiavetta, C.; Aliaga, F., Franzbaun, F.; Mobilia, N.; Alfieri, A. y J. C. Viale. 1995.** ATLAS DE SUELOS DE LA REPUBLICA ARGENTINA. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Aeroterra S.A., convenio de vinculación tecnológica, Fundación ArgenINTA. Soporte digital.



**Mármol L. A. 2006.** Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 p.

**Meyer, L. D. y W. H. Wischmeier. 1969.** Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water. Transactions of the A.S.A.E. (American Society of Agricultural Engineers), Michigan. 12(6): 754-762.

**Mijares F. J. A. 1994.** Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores. Balderas 95, México, D. F. 303 p.

**Mintegui Aguirre, J. A. y F. López Unzú. 1990.** La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.

**Montico, S. 2005.** El manejo del agua en el sector rural de la región pampeana argentina. Revista AGROMENSAJES de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR. 11p.

**Muñoz Carpena, R. y A. Ritter Rodríguez. 2005.** Hidrología Agroforestal. Ediciones Mundi-Prensa. Gobierno de Canarias. ISBN 84-8476-245-9. 348 p.

**NASA. 2000.** Shuttle Radar Topography Misión (SRTM). Jet Propulsion laboratory, California Institute of Technology. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/spanish.htm>

**Pereira, H. C. 1973.** Land Use and Water Resources. Cambridge Univ. Press, Londres. 246 p.

**Pritchett W. L. 1991.** SUELOS FORESTALES. Propiedades, conservación y mejoramiento. Ed., Limusa, S. A. México. DF. 634 p.

**Rojas, A. y A. Conde. 1985.** Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo para el centro-este de la República Argentina. Ciencia del Suelo, Vol. 3: 1-2.

**Rojo, A.; Laurencena, P.; Kruse E. y M. Deluchi. 2008.** Particularidades de la relación aguas subterráneas-aguas superficiales en un sector del noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea y Expo Agua 2008. Quito Ecuador. 7 p.

**Sánchez, F. J. 2004.** Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca. <http://web.usal.es/javisan/hidro>. 12 p.

**Sánchez, F. J. 2006.** Evapotranspiración. Universidad de Salamanca. <http://web.usal.es/javisan/hidro>. 8 p.

**Sandstrom, K. 1998.** Can Forests "Provide" Water: Widespread Myth or Scientific Reality? *Ambio* 27 (2):132-138.

**SIG 250. 2010.** <http://sig.ign.gov.ar>.

**Thornthwaite, C. W. 1948.** "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Rev.* Vol. 38: 59-64.

**Thornthwaite, C. W. y J. R. Mather. 1955.** Instruction and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. *Climate Crewel Inst. of Technology.* (3).10 p.

**Troendle, C. A y R. M. King. 1985.** The Effect of Timber Harvest on the Fool Creek Watershed, 30 Years Later, *Water Resources Research* 21 (12):1915-1922.

**USDA-SCS. 1964.** Hydrology. Section 4, Part I, Watershed planning. In: *National Engineering Handbook.* US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC.

**Verón S. R. y J. M. Paruelo. 2005.** Environmental controls of primary production in agricultural systems of the Argentine Pampas. *Ecosystems* 5: 625-635.

**Viglizzo E. F.; Frank F. C. y L. Carreño. 2006.** Situación Ambiental en las Ecorregiones Pampa y Campos y Malezales. *La Situación Ambiental Argentina 2005.* Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. 263-269.

**Ward, R. C. y M. Robinson. 1990.** *Principles of Hydrology.* McGraw Hill, London. 3rd ed. 365 p.

**Williams, J. R. y H. D. Berndt. 1976.** Determining the Universal Soil Loss Equations's length-slope factor for Watersheds. *Soil Conservation Society of America, Iowa.* 217-225.

**Winchell, M.; Srinivasan, R.; Di Luzio, M. y J. Arnold. 2007.** ArcSWAT Interface For SWAT 2005. USER'S GUIDE. Blackland Reserch Center; Texas Agricultural Experiment Station; 720 East Blackland Road-Temple, Texas 76502, y Grassland, soild and Water Research Laboratory; USDA Agricultural Research Service; 808 East Blakcland Road-Temple, Texas 76502. 431 p.

**Wischmeier, W. H. y D. D. Smith. 1978.** Predictin rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook No. 537.* 58 p.

**Zimmermann, E. D. 1990.** Sobre los sistemas hidrológicos transicionales. Departamento de Hidráulica e Ingeniería Sanitaria. FCEIA-UNR. Inédito. Rosario, Argentina. 11 p.

## 11. INDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRAFICOS.

Figura 1.	Esquema general del ciclo hidrológico según Chow <i>et al.</i> (1994).	9
Figura 2.	Modelo conceptual para el análisis del proceso de la erosión hídrica, adaptado de (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990)	17
Figura 3.	Ubicación geográfica del área de estudio, Buenos Aires, Argentina.	22
Figura 4.	Fotomosaico de la Estancia El Centauro junto con los accesos viales y red hidrográfica, mostrando en verde la ubicación de los pozos y parcelas de muestreo.	29
Figura 5.	Ubicación de dos pluviómetros testigos en el campo y de la Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhorn.	33
Figura 6.	Cinta métrica adaptada para medición de nivel freático.	40
Figura 7.	Infiltrómetro de anillo simple.	42
Figura 8:	Secuencia de imágenes (de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha) indicando la instalación de un colector de flujo caulinar en un árbol de pino.	45
Figura 9:	Secuencia de imágenes mostrando el instrumental necesario para la fabricación de los pluviómetros, una vista lateral en cada uno de los rodales y la cobertura forestal sobre cada uno de ellos.	46
Figura 10.	Simulador de lluvias. Secuencia de medición.	48
Figura 11.	Estancia El Centauro mostrando las distintas forestaciones y la ubicación de los ensayos de simulación de lluvias con puntos azules.	49
Figura 12.	Barreno de mano tipo Edelman con tramos múltiples de 1 m de largo cada uno.	49
Figura 13.	Ubicación de las perforaciones para análisis de perfiles.	50
Figura 14.	Ubicación de la microcuenca alta del A. La Paloma, dentro de la subcuenca La Escondida, y cuenca del A. El Pescado.	56
Figura 15.	Estancia El Centauro, ubicación y vías de acceso en la MALP.	57
Figura 16.	Ea. El Centauro y usos del suelo.	58
Figura 17.	Microcuenca Arroyo La Paloma mostrando el modelo de elevación del terreno (dem), la red hidrográfica y el orden de los cursos de agua según la metodología de Horton.	61
Figura 18.	Mapa georreferenciado de los suelos pertenecientes a la MALP.	63
Figura 19.	Cuenca del Arroyo El Pescado y Microcuenca del A. La Paloma mostrando la red hidrográfica sobre una imagen procesada del Google Earth ®.	64
Figura 20.	Mapa de tipos de cubierta vegetal.	65
Figura 21.	Mapa de la cobertura forestal de la MALP, diferenciando las especies de los géneros Pinus, Eucalyptus y Salix respectivamente.	66
Figura 22.	Detalle fotográfico de las forestaciones en estudio, con los géneros Pinus, Eucalyptus y Salix respectivamente.	67
Figura 23.	Imágenes originales y procesadas para el cálculo de cobertura forestal de Pino.	68
Figura 24.	Imágenes originales y procesadas para el cálculo de cobertura forestal de Eucalipto.	69
Figura 25.	Detalle fotográfico del pastizal natural modificado de la MALP.	70
Figura 26.	Cultivos de <i>Avena sativa</i> (Avena), <i>Sorghum bicolor</i> (Sorgo) y <i>Zea mays</i> (Maíz) en el área de estudio.	71
Figura 27.	Caracterización cualitativa de la MALP	72

Figura 28.	Determinación de excesos líquidos y sólidos de la MALP	73
Figura 29.	Determinación del balance hidrológico de la MALP.	73
Figura 30.	Mapa de grupos hidrológicos de la MALP.	80
Figura 31.	Mapa de usos del suelo en la MALP.	81
Figura 32.	Mapa de NC obtenido por procesamiento automático de la base de datos vectorial, a través del L-THIA GIS, para la MALP.	82
Figura 33.	Mapa de precipitación efectiva o escurrimiento superficial en mm, obtenido por procesamiento con L-THIA GIS, a través de la metodología del NC.	83
Figura 34.	Factores K ( $Tn.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$ ), LS (adimensional) y C (adimensional) de la USLE.	96
Figura 35.	Pérdida de suelo ( $Tn.ha^{-1}.año^{-1}$ ) causada por erosión hídrica superficial en la MALP.	97
Tabla 1.	Distribución estacional de las lluvias, en valores medios, para el período 1909-2005, partido de La Plata. Adaptado de (Hurtado <i>et al.</i> , 2006)	23
Tabla 2.	Balance hídrico medio mensual (1909-2005) para el partido de La Plata. Adaptado de Hurtado <i>et al.</i> (2006)	23
Tabla 3.	Denominación de cartas topográficas 1:50.000 de la Cuenca del Arroyo El Pescado	28
Tabla 4.	Modelo de planilla adoptado para la toma de datos semanales a campo.	34
Tabla 5.	Resumen de los tres métodos de cálculo más usados para la determinación de la ETP, indicando los parámetros o factores asociados, ecuaciones y coeficientes particulares.	35
Tabla 6.	Valores de número de curva para suelos con diferentes usos. Adaptado de Gaspari <i>et al.</i> (2009).	37
Tabla 7.	Condiciones de humedad antecedente en función de la precipitación acumulada de 5 días. Adaptado de Gaspari <i>et al.</i> (2009).	37
Tabla 8.	Cuadro de equivalencias entre las tres condiciones de humedad antecedente. Adaptado de Gaspari <i>et al.</i> (2009).	38
Tabla 9.	Perforaciones de la red de monitoreo freático mostrando la profundidad y cotas, con y sin tapa.	40
Tabla 10.	Relación entre la precipitación pluvial y el contenido de humedad del suelo. Adaptado de USDA-SCS (1964).	42
Tabla 11.	Modelo de planilla usado para el registro de los ensayos de simulación de lluvias e infiltrómetro de anillo simple.	43
Tabla 12.	Detalle de los distintos códigos utilizados para diferenciar los suelos de la MALP.	63
Tabla 13.	Porcentajes de cobertura vegetal en relación a la superficie total de la MALP.	65
Tabla 14.	Superficie de ocupación en ha y porcentaje, de cada una de las especies forestales en relación a la superficie total de forestación y superficie total de la MALP.	67
Tabla 15.	Resultados de ETP en mm/d y mm/mes para cada mes de un ciclo hidrológico promedio según distintas metodologías.	76
Tabla 16.	Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Penmann modificado por FAO.	77
Tabla 17.	Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Penmann-Monteith en la Experimental J. Hirschhorn.	78

Tabla 18.	Balance hídrico de Thornthwaite para la obtención de la ETR mensual a partir de la ETP calculada por el método de Thornthwaite.	78
Tabla 19.	Porcentajes de ocupación que representan el GH y los usos del suelo en la MALP.	82
Tabla 20.	Porcentajes de ocupación de los valores de NC y escurrimiento superficial.	83
Tabla 21.	Variación entre los valores máximos y mínimos de los niveles freáticos, valores de infiltración por pozo y general para la MALP.	89
Tabla 22.	Análisis físico-Químico de agua freática (03-12-08).	90
Tabla 23.	Análisis Microbiológico de agua freática (02-12-08).	90
Tabla 24.	Valores de intercepción para las especies de Pino y Eucalipto.	90
Tabla 25.	Resultado de ensayos realizados con simulador de lluvias en mm.	94
Tabla 26.	Resultado de ensayos realizados con simulador de lluvias en %.	94
Tabla 27.	Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Adaptada de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).	98
Tabla 28.	Componentes del balance hidrológico para Pino, Eucalipto y resto de los usos presentados.	100
Gráfico 1.	Curva de infiltración potencial instantánea en un suelo encharcado. Extraído de Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez (2005).	15
Gráfico 2.	Descomposición de la precipitación en el tiempo. Adaptado de López Cadenas del Llano (1998).	39
Gráfico 3.	Curva hipsométrica correspondiente a la MALP.	59
Gráfico 4.	Curva hipsométrica relativa correspondiente a la MALP.	60
Gráfico 5.	Precipitaciones anuales frente a la precipitación media anual de la serie completa considerada.	74
Gráfico 6.	Precipitación media mensual de una serie de 12 años (1998-2009) de la Estación Experimental J. Hirschhorn vs precipitación mensual (período 11/05/2009 - 10/05/2010) de la MALP, mostrando las líneas de tendencia polinómicas para cada una de ellas.	75
Gráfico 7.	Comportamiento de la ETP, P y ETR (expresados en mm de lámina) en un ciclo hidrológico promedio. Valores provenientes de la metodología de Blaney-Criddle.	77
Gráfico 8.	Distribución de la Pp, ETP (Penmann-FAO) y ETR.	78
Gráfico 9.	Distribución de la Pp, ETP (Penmann-Monteith) y ETR.	79
Gráfico 10.	Distribución de la Pp, ETP (Thornthwaite) y ETR.	79
Gráfico 11.	Evolución temporal de los niveles freáticos (msnm) para el período 03/10/08 - 31/05/10 y su correspondencia con las lluvias acumuladas (mm).	84
Gráfico 12.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 1 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	85
Gráfico 13.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 2 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	86
Gráfico 14.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 3 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	86
Gráfico 15.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 4 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	87
Gráfico 16.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 5 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	87

Gráfico 17.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 6 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	88
Gráfico 18.	Evolución semanal del nivel freático, medido en el pozo 7 para el período Octubre de 2008 a Junio de 2010.	88
Gráfico 19.	Valores mensuales de precipitación directa ( <b>P</b> ), precipitación interna ( <b>P<sub>i</sub></b> ), flujo caulinar ( <b>F<sub>c</sub></b> ) e intercepción ( <b>I</b> ) correspondientes a la forestación de Eucalipto.	91
Gráfico 20.	Valores mensuales acumulados de precipitación directa ( <b>P</b> ), precipitación interna ( <b>P<sub>i</sub></b> ), flujo caulinar ( <b>F<sub>c</sub></b> ) e intercepción ( <b>I</b> ) correspondientes a la forestación de Eucalipto.	91
Gráfico 21.	Valores mensuales de precipitación directa ( <b>P</b> ), precipitación interna ( <b>P<sub>i</sub></b> ), flujo caulinar ( <b>F<sub>c</sub></b> ) e intercepción ( <b>I</b> ) correspondientes a la forestación de Pino.	92
Gráfico 22.	Valores mensuales acumuladas de precipitación directa ( <b>P</b> ), precipitación interna ( <b>P<sub>i</sub></b> ), flujo caulinar ( <b>F<sub>c</sub></b> ) e intercepción ( <b>I</b> ) correspondientes a la forestación de Pino.	92

## 12. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

1. **Subregión húmeda pampeana.** La integran casi la totalidad de la provincia de Entre Ríos, el centro y sur de Santa Fe, el departamento de Córdoba y el 75 % de Buenos Aires (norte, centro-este y sudeste). Abarca unos 38 millones de hectáreas, equivalentes al 13 % de la superficie del país en su parte continental (Carlevari y Carlevari, 2007).
2. **Hidrología Forestal.** Las relaciones entre el bosque y el agua, en el espacio que estos ocupan y en su área de influencia en una cuenca hidrográfica, son temas de estudio de la Hidrología Forestal que es una especialidad cuyos conceptos centrales y sus aplicaciones prácticas están aún poco desarrollados, difundidos e investigados en nuestro medio. Aspectos tales como el bosque (también deforestación y reforestación) y lluvias, caudal, erosión hídrica y agua del suelo son todavía objeto de confusiones e interpretaciones erradas que pueden tener consecuencias inconvenientes (Abbasi y Vinithan, 1997; Ataroff y Rada, 2000; Bruijnzeel, 1991; Hamilton y King, 1983; Kumari y Chomitz, 1996; Lima, 1993; Sandstrom, 1998; Troendle y King, 1985).
3. **Manejo de Cuencas Hidrográficas.** De acuerdo a Iproga (1996) y Dourojeanni (1994), se entiende como Manejo de Cuencas Hidrográficas a la aplicación de principios y métodos para el uso racional, integrado y participativo de los recursos naturales de la cuenca; fundamentalmente del agua, del suelo y de la vegetación, a fin de lograr una producción de bienes óptima y sostenida a partir de estos recursos, con el mínimo deterioro ambiental, para beneficio de los pobladores y usuarios de la cuenca.
4. **Intercepción de la lluvia.** Es el fenómeno que se sucede cuando existe vegetación obstruyendo la caída de la lluvia. Esta obstrucción provoca que parte de la lluvia quede retenida (interceptada) en la superficie de las hojas y ramas (dosel), para luego incorporarse al escurrimiento o evaporarse. Gaspari *et al.* (2009) indica que la intercepción es alta al inicio de la lluvia (vegetación seca) y va disminuyendo con el tiempo hasta un valor constante mínimo, equivalente a la pérdida de agua por evaporación desde el follaje.
5. **Variación en la evapotranspiración.** El término de evapotranspiración es introducido para definir el total de agua que se pierde hacia la atmósfera en forma de vapor, ya sea de forma directa (evaporación) o a través del metabolismo de los vegetales (transpiración). Debido a que la transpiración es uno de los componentes de la evapotranspiración y, que la parte aérea de la forestación muchas veces incrementa la superficie de exposición a la lluvia, se hace evidente el aumento de la evapotranspiración en una superficie forestada frente a una que no lo es.
6. **Retardo de la escorrentía.** El agua proveniente de la precipitación que circula por arriba o por debajo de la superficie terrestre hasta llegar a una corriente de agua y, finalmente, a la salida de una cuenca hidrográfica, es lo que se conoce como escurrimiento. Este flujo de agua resulta impedido o retardado en su trayecto por las propiedades del suelo y del terreno, a la vez que es disminuido por los fenómenos de infiltración y evaporación que se siguen sucediendo en su avance. La existencia de una forestación en una cuenca hidrográfica genera una disminución notable en la escorrentía; ya sea la superficial, por la resistencia que generan los troncos raíces y mantillo forestal; la subsuperficial, por el efecto de absorción de las raíces o de fijación de las partículas del suelo; o por la disminución general de agua que llega al suelo por intercepción del follaje. López Cadenas del Llano (1998), afirma que la influencia de una superficie boscosa en una cuenca se relaciona directamente con el coeficiente de escurrimiento, indicando que aumentos constantes de superficie boscosa conllevan aumentos constantes de escorrentía superficial.
7. **Aumento de la infiltración.** La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra (Linsley, *et al.*, 1993). El efecto de las forestaciones sobre el retardo de la escorrentía provoca un aumento de la infiltración. Esta afirmación se encuentra ratificada por García Nájera (1962), al indicar que muchos estudios coinciden en que un bosque desarrollado disminuye la velocidad de los escurrimientos en  $\frac{1}{4}$  partes, lo que acarrea efectos benéficos al aumentar la infiltración, retardar los tiempos de concentración y controlar la erosión.
8. **Escurrecimiento directo.** El escurrimiento directo o superficial, es el originado en las crecidas o tormentas.

9. **Evapotranspiración real.** Cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración. (Custodio y Llamas, 1996)
10. **Humedecimiento del suelo.** Agua de las precipitaciones, que no circula directamente sobre el suelo, sino que se evapora física o biológicamente o se infiltra hasta la zona saturada y da origen a la escorrentía subterránea. (Custodio y Llamas, 1996)
11. **Tamaño (precipitación).** El tamaño de las gotas puede variar entre los 0.05 y 7 mm de diámetro. Debido a que durante la caída, las gotas, pueden aumentar o disminuir el tamaño por condensación o partición, se considera que la lluvia no esta compuesta de un tamaño uniforme de gota. (Mármol, 2006)
12. **Velocidad (precipitación).** La velocidad de caída de las gotas se hace superior a medida que llegan a la superficie terrestre, siendo máxima en este punto. Si las gotas son interceptadas, pierden parte de esta energía cinética y se agrupan en gotas de mayor tamaño que caerán golpeando puntualmente el suelo. (Mármol, 2006)
13. **Volumen (precipitación).** Se mide como la altura o profundidad de la lámina en mm, acumulada en una superficie plana, horizontal, impermeable y sin evaporación, para distintos períodos de tiempo. (Mármol, 2006)
14. **Intensidad (precipitación).** Se define como la cantidad de agua caída en un período de tiempo corto y se expresa como mm/h, equivalente a un caudal de 2.78 lts/s o 10 m<sup>3</sup>/ha. (Mármol, 2006)
15. **Duración (precipitación).** Se trata del tiempo, expresado en minutos, que transcurre desde que empieza la lluvia hasta que termina. (Mármol, 2006)
16. **Frecuencia (precipitación).** Es la cantidad de veces que ocurre el fenómeno en un tiempo determinado y se expresa en porcentaje. (Mármol, 2006)
17. **Período de retorno o recurrencia (precipitación).** Es el número de años que se espera sea igualada o superada una determinada precipitación. Cuanto mayor es este período se espera que los eventos sean de mayor magnitud. (Mármol, 2006)
18. **Evapotranspiración potencial.** O pérdida por evapotranspiración, es un término presentado por Thornthwaite (1948) que expresa el límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración. (Custodio y Llamas, 1996)
19. **Uso consuntivo.** Es la combinación entre la evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta cantidad es despreciable y representa aproximadamente un 1% de la evapotranspiración, por lo que ambos términos son tomados como sinónimos. (Mijares, 1994).
20. **Déficit de escorrentía.** Es la diferencia entre la precipitación y la escorrentía total (aforo de una cuenca) y se entiende como la proporción de precipitación que no ha generado escorrentía. En el caso de una cuenca hidrogeológicamente cerrada en donde se estudian series superiores a los 20 años, se considera que el déficit de escorrentía solo puede deberse a la evapotranspiración (ET); por lo que, en estas condiciones, serían conceptos equivalentes. (Javier Sánchez, 2004)
21. **Energía disponible.** Para la vaporización del agua, proveniente de la radiación solar, necesaria para movilizar las moléculas de agua y desprenderlas de la superficie evaporante. (Mármol, 2006)
22. **Déficit higrométrico de saturación.** Cuando mayor es el mismo, o sea la cantidad de agua necesaria para producir la saturación de la atmosfera, mayor es la capacidad de nuevas adiciones de humedad y por lo tanto mayor es la evaporación. "Ley de Dalton:  $E = K (e_s - e_d)$ ; donde E es evapotranspiración, K es un coeficiente que se ajusta según la influencia de otros factores,  $(e_s - e_d)$  es el déficit higrométrico,  $e_s$  es la tensión de vapor saturante a la temperatura del agua y  $e_d$  la tensión de vapor existente en el aire circundante". (Mármol, 2006)
23. **Temperatura del aire.** Al elevarse la temperatura el aire posee mayor capacidad de contener humedad, lo cual incrementa la evaporación. (Mármol, 2006)



24. **Velocidad y turbulencia del viento.** Este remueve las capas saturadas de humedad en contacto con la superficie evaporante, reiniciando el fenómeno. (Mármol, 2006)
25. **Naturaleza y estado de la superficie evaporante.** Ésta comprende, 1) la vegetación que influye por su poder reflectante de la energía solar, cobertura sobre el suelo y despliegue de su sistema radicular; 2) el suelo, por su capacidad de retención y de favorecer o no que el agua retenida acceda a las capas superficiales. Los 4 primeros factores, caracterizan el estado de la atmósfera circundante y el restante a la superficie evaporante y su tendencia a provocarla evapotranspiración. Actuando simultáneamente determinan el poder evaporante de la atmósfera del lugar. (Mármol, 2006)
26. **Infiltración instantánea real ( $f$ ).** Se define como el flujo de agua que entra en el suelo por unidad de superficie. Es por tanto el valor que  $q$ , flujo en medio poroso, alcanza en la superficie del suelo ( $f=q$ ) y sus dimensiones son de velocidad [ $LT^{-1}$ ]. La **Infiltración acumulada real ( $F$ )** tiene unidades de longitud [L]. (Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez, 2005)
27. **Infiltración potencial o capacidad de infiltración ( $fp$ ).** Velocidad de infiltración que se produce cuando el suelo esta encharcado con una lámina de agua pequeña en superficie [ $LT^{-1}$ ]. La **Infiltración acumulada bajo encharcamiento ( $Fp$ )** tiene unidades de longitud [L]. (Muñoz Carpena y Ritter Rodríguez, 2005)
28. **Precipitación total o precipitación directa.** Es el total de precipitación que cae sobre la superficie terrestre
29. **Flujo caulinar o escurrimiento por el tallo.** Corresponde al agua que, interceptada por el árbol, escurre a lo largo del tronco hasta alcanzar el suelo. Pritchett (1991) indica que computando el agua de lluvia que fluye por el tronco y la que atraviesa el follaje, se puede obtener el valor de agua interceptada por el árbol restando estos valores a la precipitación total.
30. **Canopea.** Es un término proveniente del inglés “Canopy” y esta del latín “Canopus” (famosa ciudad egipcia conocida por sus grandes lujos), que sirve para indicar el hábitat que se encuentra en el *doseil forestal*<sup>1</sup>. La canopea de un árbol individual se refiere a la capa superior de sus hojas.
31. **Caracterización Morfométrica.** El funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento. Los parámetros de una cuenca, desempeñan un papel fundamental en el estudio y comportamiento en los componentes del ciclo hidrológico, asimismo, algunos parámetros son requeridos como datos de entrada en la mayoría de los modelos hidrológicos para el análisis de las características morfológicas y funcionales (Gaspari *et al*, 2009).
32. **Perímetro de la cuenca ( $P$ ).** Es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas. Su unidad es el km. (Gaspari *et al.*, 2009)
33. **Longitud axial ( $La$ ).** Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca y su unidad es el km. (Gaspari *et al.*, 2009)
34. **Área ( $A$ ).** Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es el  $km^2$ . A partir de este parámetro se puede definir el tamaño de la cuenca y establecer un nombre para su caracterización. (Gaspari *et al.*, 2009)
35. **Factor de forma** o de Gravelius ( $Ff$ ). Responde a la relación entre el ancho promedio ( $Ap$ ) y la longitud axial de la cuenca ( $La$ ) según la siguiente relación (Mármol, 2006):

$$Ff = \frac{Ap}{La}$$

Donde: la longitud axial ( $La$ ) representa la longitud, expresada en km, desde el punto más alejado de la cuenca (coincídete con el punto más alto del cauce principal) hasta la desembocadura. El ancho promedio ( $Ap$ ), expresada en km, se calcula dividiendo la superficie de la cuenca ( $A$ ) por la longitud axial.

El actor de forma permite apreciar la tendencia de la cuenca a las crecientes ( $Ff$  alto), y en caso de ser alargada ( $Ff$  bajo), estima que es menos propensa a que la tormenta cubra toda la superficie. (Mármol, 2006)

36. **Índice de compacidad:** o de Gravelius (**Kc**), es un índice adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual superficie como se muestra en el siguiente cuadro adaptado de Mármol (2006):

Kc	Clase de forma
1 - 1.25	Casi redonda a oval redonda (compacta)
1.25 - 1.50	a oval oblonga
1.50 - 1.75	a rectangular oblonga
> 1.75	a casi rectangular (alargada)

La secuencia metodológica para la obtención de la ecuación para el cálculo de **Kc**, se muestra a continuación:

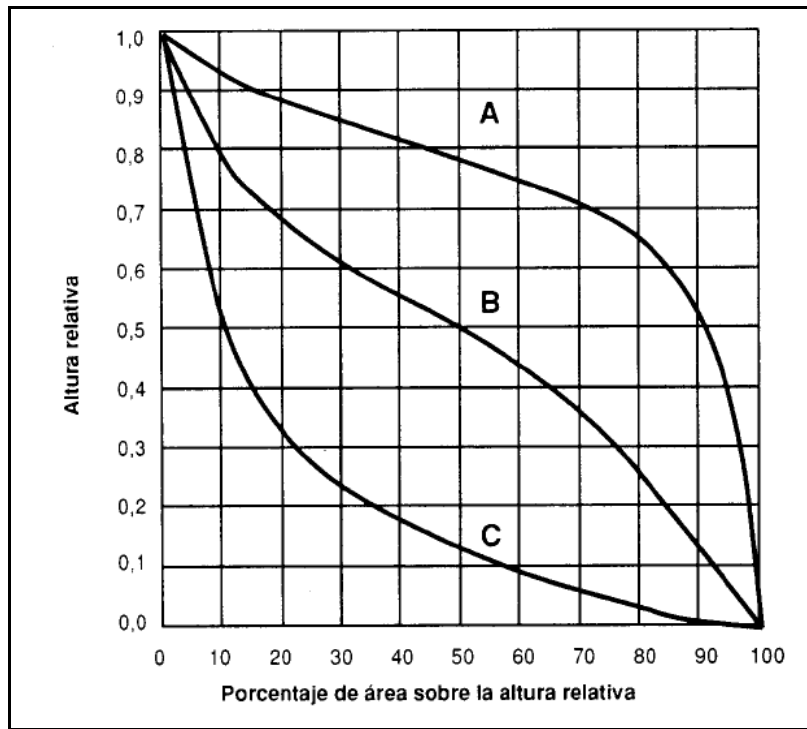
$$\left. \begin{aligned}
 A &= \pi * r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \\
 p &= 2 * \pi * r = 2 * \pi * \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 * \sqrt{A * \pi}
 \end{aligned} \right\} Kc = \frac{P_{cuenca}}{P_{circulo}} = \frac{P}{2 * \sqrt{A * \pi}} = \boxed{0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}}$$

Donde: **r**, es el radio en km; **A**, el área en km<sup>2</sup> y **P** el perímetro en km.

Este valor de índice de compacidad se relaciona con las tendencias de forma, que varían de oval redonda a oval oblonga y se muestran en la siguiente tabla Adaptada de Mármol (2006):

Kc	Clase de forma
1 - 1.25	Casi redonda a oval redonda (compacta)
1.25 - 1.50	a oval oblonga
1.50 - 1.75	a rectangular oblonga
> 1.75	a casi rectangular (alargada)

37. **Curva hipsométrica.** La generación de la curva hipsométrica en un área fue sugerida por Langbein *et al.* (1947), para proporcionar información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Se expresa a través de una curva de doble eje de coordenadas, donde la ordenada es la cota de altura (m.s.n.m.) y la abscisa es el área por encima de una cota dada (% - km<sup>2</sup>). (Gaspari *et al.*, 2009)
38. **Curva hipsométrica relativa.** En la siguiente figura se muestran las curvas hipsométricas relativas características del ciclo de erosión según Strahler (Gaspari *et al.*, 2009). Las mismas, son utilizadas para caracterizar a las cuencas en estudio y se caracterizan de esta manera: la curva superior (A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo y por lo tanto su fase juvenil; la curva intermedia (B) expresa una cuenca en equilibrio, indicativa de una fase de madurez y la curva inferior (C), representa una típica cuenca sedimentaria en su fase de vejez.



39. **Relación hipsométrica (*Rh*)**. A partir de la curva hipsométrica se puede calcular la relación hipsométrica, según la siguiente relación:

$$Rh = \frac{Ss}{Si}$$

Donde **Ss** y **Si** son el área sobre y bajo la curva hipsométrica, respectivamente. La importancia de esta relación reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así cuando **Rh** = 1, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico. (Gaspari *et al.*, 2009)

40. **Altura media (*Hm*)**. Es un factor físico que facilita el estudio del movimiento de agua en la cuenca, a través del estudio de la distribución de las alturas en el terreno. Para su determinación se toma como referencia el nivel medio del mar, y la siguiente expresión:

$$Hm = \frac{\sum(ai * hi)}{A}$$

Donde **Hm** es la altitud media (m); **ai**, el área entre par de cotas (m<sup>2</sup>); **hi**, la altitud media entre dicho par (m) y **A**, el área de la cuenca (m<sup>2</sup>). (Mármol, 2006)

41. **Pendiente media (*PM*)**. Se define como la media de las pendientes de las superficies elementales del terreno, o más exactamente, el promedio ponderado de las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante. Se trata de un valor importante ya que incide directamente en la velocidad que toman las corrientes y la consecuente capacidad de erosión y arrastre de sedimentos (Mármol, 2006). Toma la siguiente expresión:

$$PM = \frac{H * L}{A} * 100$$

Donde **PM** es la pendiente media (%); **H**, la equidistancia entre las curvas de nivel (km); **L**, la longitud total de las curvas de nivel (km) y **A**, el área de la cuenca (km<sup>2</sup>). (Gaspari *et al.*, 2009)

42. **Coefficiente de rugosidad (*Ra*)**. Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca y su densidad de drenaje (Gaspari *et al.*, 2009):

$$Ra = H * Dd$$

Donde **Ra** es el coeficiente de rugosidad (adimensional); **H**, la diferencia de altura entre el punto más alto y el más bajo (km) y **Dd**, es la densidad de drenaje (km\*km<sup>-2</sup>).

43. **Orientación de la cuenca.** Se entiende como la dirección geográfica según la resultante de la pendiente general de las laderas (Llamas, 1993).
44. **Densidad de drenaje (Dd).** Se define como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano, 1998).

Se considera que la densidad de drenaje caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca. Además define el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante, los cuales permiten el escurrimiento (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002).

La densidad de drenaje fue establecida por Horton según la siguiente fórmula:

$$Dd = \frac{Ln}{A}$$

Donde **Dd** es la densidad de drenaje (km.km<sup>-2</sup>); **Ln**, es la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca (km), y **A**, es el área total de la cuenca (km<sup>2</sup>).

En un principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. Es decir: al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor; por lo tanto los *hidrogramas*<sup>50</sup> en principio tendrán un tiempo de concentración corto. (Gaspari et al., 2009)

45. **Pendiente media del cauce (J).** La pendiente media del cauce se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari et al., 2009). Se expresa en porcentaje, según la siguiente fórmula:

$$J = \left[ \left( \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L} \right) \right] * 100$$

Donde **J** es la pendiente media del cauce (%), **H<sub>máx</sub>**, es la cota máxima sobre el curso de agua (m); **H<sub>mín</sub>**, es la cota mínima sobre el curso de agua (m), y **L**, es la longitud del río más largo (m).

46. **Tiempo de concentración (Tc).** Es el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta el punto emisor. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca. Este parámetro tiene estrecha relación con el gasto pico y con el tiempo de recesión de la cuenca, tiempos de concentración muy cortos tienen gastos picos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan gastos pico más atenuados y recesiones mucho más sostenidas en el tiempo (Gaspari et al.; 2009). Existen muchas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca, siendo una de las más completas la siguiente:

$$Tc = 0.3 * \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76}$$

Donde **Tc** es el tiempo de concentración (hs); **L**, es la longitud de cauce (km), y **J**, la pendiente media del cauce (%)

47. **Número de orden de los cursos de agua.** Es un número que tiene relación estrecha con el número de ramificaciones de la red de drenaje. A mayor número de orden, es mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por tanto mayor también la componente de escurrimiento directo que en otra cuenca de similar área. Existen dos metodologías para determinar el orden de una cuenca, el criterio de Schumm y el criterio de Horton. (Gaspari et al.; 2009)

El primero se determina asignando el primer orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determinan o dan origen a otro de orden inmediatamente superior y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor y así sucesivamente hasta llegar al orden de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca.

El criterio de Horton sólo permite asignar el orden 1 a uno de los tributarios simples confluyentes, siendo el otro de orden inmediatamente superior que hace un menor ángulo con la dirección del flujo en el punto de confluencia. Siguiendo la misma ley anterior se llega al número de orden de la cuenca.

48. **Precipitación interna.** Es el agua que cae a través de las copas, ya sea directamente o por goteo de las hojas.
49. **Barbecho.** Suelo desnudo, situación de máxima pérdida de suelo (Irurtia *et al.*, 2007).
50. **Hidrogramas.** Un hidrograma es la representación gráfica de las descargas instantáneas de un curso de agua en función del tiempo. El agua que escurre en un curso de agua, proviene de una o varias de las siguientes fuentes: escurrimiento superficial; escurrimiento subsuperficial o hipodérmico; escurrimiento subterráneo; precipitación directa en el curso de agua y sus tributarios (Bustamante, 1984). Por otra parte, Chow *et al.* (1994) consideran que los hidrogramas de caudal, son gráficos o tablas que muestran la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. También indica que el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento en una cuenca de drenaje particular.
51. **Dosel forestal.** Es la capa aérea vegetal, se define por el conglomerado de tallos, hojas, ramas, flores y frutos de las diferentes especies que crecen y se ubican en la parte aérea del bosque o copas de los árboles.