

CAPITULO 5 ESTUDIO DEL POTENCIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1 Análisis hidrogeológico

(1) Clasificación de acuíferos y sus características

(a) Clasificación de acuíferos

En el Estudio, la clasificación de los acuíferos se hizo siguiendo la clasificación geológica. Este Estudio sigue la clasificación existente de los acuíferos. La clasificación de los acuíferos y sus características están resumidas en la エラー! リンクが正しくありません。

Tabla-5.1 Clasificación de los acuíferos del Área de Estudio

Edad		Estratigrafía	Facies de rocas	Permeabilidad general
Cuaternaria	Holoceno	Aluvión	Arcilla, limo, arena, grava	Alta-baja
	Pleistoceno	Formación Terraza	Arcilla, arcilla arenosa, arena,	Media-baja
		Formación Sabana	Arcilla, arcilla arenosa, arena,	Media-baja
		Formación Tilatá	Arena y grava, sedimentos, limo, arcilla (consolidada)	Alta
Terciaria	Oligoceno	Formación Usme	Arcillolita	Baja
	Eoceno	Formación Regadera	Arenisca, conglomerado, arcillolita	Baja
		Formación Bogotá	Arcillolita, lomolita, arenisca,	Media-baja
	Paleoceno	Formación Cacho	Piedra arenisca, conglomerado,	Alta
		Formación Guaduas	Arcillolita, esquisto,	Media-baja
Cretácea		Grupo Guadalupe	Piedra arenisca, siltita, esquisto	Alta-baja
		Formación Chipaque	Lutitas, esquisto, arenisca	Baja

(b) Características de los acuíferos

Los acuíferos en el Área de Estudio se clasifican en 3 tipos:

- i) Acuífero cuaternario
- ii) Acuífero terciario
- ii) Acuífero cretácico

Los acuíferos mencionados están compuestos por alteraciones de formaciones, permeables e impermeables. Por consiguiente, estos acuíferos están limitados a sus formaciones permeables. Cada acuífero tiene afloraciones donde son recargadas las aguas subterráneas; por tanto, cada acuífero tiene tanto características de acuífero no confinado y de acuífero confinado.

Acuífero cuaternario

Las aguas subterráneas extraídas por bombeo actualmente mediante pozos, en el Área de Estudio, se conservan entre capas de arena y grava de la Formación Sabana. El acuífero cuaternario consiste de capas de arena y grava que se distribuyen irregularmente a profundidades diferentes, con pobre continuidad. Cada capa de arena y grava tienen un nivel diferente aguas subterráneas. Por consiguiente, el nivel de las aguas subterráneas observado en los pozos proviene de niveles combinados de aguas subterráneas de cada capa de arena y grava.

Acuífero terciario

En el área de estudio, el Terciario se compone principalmente por sedimentos arcillosos. Únicamente unos pocos los estratos de arena y grava incluidos localmente en los estratos arcillosos forman el acuífero. El desarrollo de aguas subterráneas en el terciario es difícil para desarrollarlos a gran escala debido a que el acuífero es muy pequeño.

Acuíferos del Cretáceo

El sistema Cretácico está compuesto por el Grupo Guadalupe y la Formación Chipaque. El Grupo Guadalupe es un excelente acuífero que contiene formaciones areniscas. Por otro lado, la Formación Chipaque está compuesta por lutitas. El Grupo de Guadalupe está compuesto por las siguientes tres formaciones:

- a) Formación Labor Tierna
- b) Formación Plaeners
- c) Formación Arenisca Dura

La Formación Labor Tierna, la superior de éstas tres, es un acuífero excelente compuesto de piedra arenisca permeable. La Formación de Plaeners, la del medio, consiste de lutitas con permeabilidad baja. La Formación Arenisca, la formación inferior del grupo Guadalupe, se compone de una alternación de arenas y lutitas, lo cual produce una permeabilidad mas baja que Labor Tierna. Allí, el agua subterránea se almacena únicamente en fracturas. Por consiguiente, la Formación Labor Tierna, la superior de las tres, es la que más prometedora en el tema del desarrollo de aguas subterráneas. Adicionalmente, la formación Arenisca Dura es también prometedora.

(c) Estructura hidrogeológica

Las estructura hidrogeológica del Área de Estudio es fuertemente dominada por una estructura geológica complicada, y la distribución y continuidad de acuíferos está influenciada por fallas y pliegues. Al parecer, los acuíferos del Cuaternario, Terciario y Cretáceo forman acuíferos confinados. El acuífero superficial del Cuaternario parece formar pequeños acuíferos no confinados. El agua subterránea está confinada en capas de arena y grava de la Formación de la Sabana y de la Formación de Tilatá, las cuales conforman el acuífero principal del Cuaternario, dado que estos estratos están recubiertos por estratos impermeables. El nivel estático del agua subterránea del Cuaternario, Terciario y Cretáceo está entre profundidades de la superficie del suelo de -20m a -50m. Aunque la profundidad de estos acuíferos es diferente, el nivel estático del agua subterránea de estos acuíferos es similar. Esto sugiere que hay conexión hidrogeológica entre los tres acuíferos.

Mecanismo de recarga de aguas subterráneas del Cuaternario y Terciario

Hay una gran posibilidad de que el acuífero Cuaternario y Terciario se recarguen de los canales de los ríos y sedimentos del piedemonte. Se asume que la infiltración de las aguas lluvias a estos acuíferos profundos, a través del suelo y de las capas impermeables.

Mecanismo de recarga de aguas subterráneas del Cretáceo

El grupo Cretáceo forma montañas que rodean la Sabana de Bogotá. Este grupo es más profundo hacia el centro de la Sabana de Bogotá debido al movimiento, plegamientos y fallas. Por consiguiente, se presume que el acuífero Cretáceo se recarga en las montañas circundantes de la Sabana de Bogotá. El agua subterránea recargada en las montañas puede estar fluyendo hacia las partes más profundas del acuífero Cretáceo. Es natural que se piense que aun en algunas áreas del Cuaternario y del Terciario, el agua subterránea se esté infiltrando al Cretáceo profundo a través del Cuaternario y del Cretáceo.

(d) Parámetros de acuíferos

Se analizaron los parámetros de los acuíferos a partir de los resultado obtenidos de las pruebas de bombeo que se llevaron a cabo en el Área de Estudio. Se seleccionaron cuidadosamente resultados confiables de las pruebas de bombeo y se usaron para este análisis.

Parámetros del acuífero Cuaternario

El rendimiento, la capacidad específica, la transmisividad, el coeficiente de permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero Cuaternario tienen un amplio rango de valores y sus distribuciones son aproximadas por distribución normal logarítmica. La capacidad específica tiene una relación fuerte con la transmisividad, y es posible estimar la transmisividad de manera aproximada a partir de esta relación. El resultado de las pruebas de bombeo se resume en la エラー! リンクが正しくありません。.

Tabla-5.2 Parámetros hidráulicos del acuífero Cuaternario

Parámetro	Rango	Valores representativos
Rendimiento (m ³ /día)	30—1,500	150—250
Capacidad específico (m ³ /día/m)	1—500	4—30
Transmisividad (m ² /día)	1.5—250	4—15
Coeficiente de permeabilidad (m/día)	0.01—10.0	0.15—1.0
coeficiente del almacenabilid (-)	10 ⁻⁹ —10 ⁻¹	10 ⁻⁵ —10 ⁻³

Parámetros hidráulicos del Grupo Guadalupe

El rendimiento, la capacidad específica, la transmisividad, el coeficiente de permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento del Grupo Guadalupe tienen un amplio rango de valores, y estas distribuciones son aproximadas por distribución normal logarítmica. Los resultados de las pruebas de bombeo se resumen en la エラー! リンクが正しくありません。.

Tabla-5.3 Parámetros hidráulicos del acuífero de Guadalupe

Parámetro	Rango	Valores representativos
Rendimiento (m ³ /día)	50—7000	150—1000
Capacidad específica (m ³ /día/m)	1—1000	10—120
Transmisividad (m ² /día)	1—1000	15—150
Coeficiente de permeabilidad (m/día)	0.05—10.0	0.5—1.0
Coeficiente del almacenamiento (-)	10 ⁻⁷ —10 ⁻¹	10 ⁻⁷ —10 ⁻³

(2) Mapa hidrogeológico

El Equipo del Estudio compiló mapas hidrogeológicos usando tecnología SIG, reuniendo todos los resultados del Estudio. Los ítems obtenidos utilizando datos SIG son: distribución de acuíferos, niveles de aguas subterráneas, recarga de aguas subterráneas por acuífero, distribución de pozos, distribución de parámetros de acuíferos (coeficiente de permeabilidad y coeficiente de almacenabilidad), distribución de calidad de aguas subterráneas, desarrollo del potencial de aguas subterráneas por acuífero, y así sucesivamente.

5.2 Balance hídrico y recarga de aguas subterráneas

El propósito del análisis del balance hídrico es estimar la recarga de aguas subterráneas en el Área de Estudio. Los datos hidrológicos y meteorológicos de la CAR y de la EAAB se usaron para el análisis del balance hídrico. La recarga de aguas subterráneas es el resultado del análisis de balance hídrico y se usa como parámetro de la entrada, para la simulación de aguas subterráneas. El método y resultados del análisis de Balance hídrico se explican en seguida.

5.2.1 Análisis de balance hídrico

(1) Método de Análisis

El proceso del cálculo de escorrentía y precipitación de la cuenca se muestra en la Figura-5.1. El análisis del balance hídrico se explica a continuación:

(2) Clasificación de cuencas

Basándose en la asunción de que la escorrentía del río ocurre básicamente en las montañas, se estima que la característica topográfica (proporción del área entre montañas y planicies) y el coeficiente de escorrentía de la cuenca debe tener una correlación más íntima. Con base en esta estimación, todas las 20 cuencas se dividieron en 3 grupos, según sus proporciones de área. Para las cuencas sin datos disponibles sobre caudal de río para el cálculo del coeficiente de escorrentía, se aplica el coeficiente de escorrentía de las otras cuencas que pertenecen al mismo grupo.

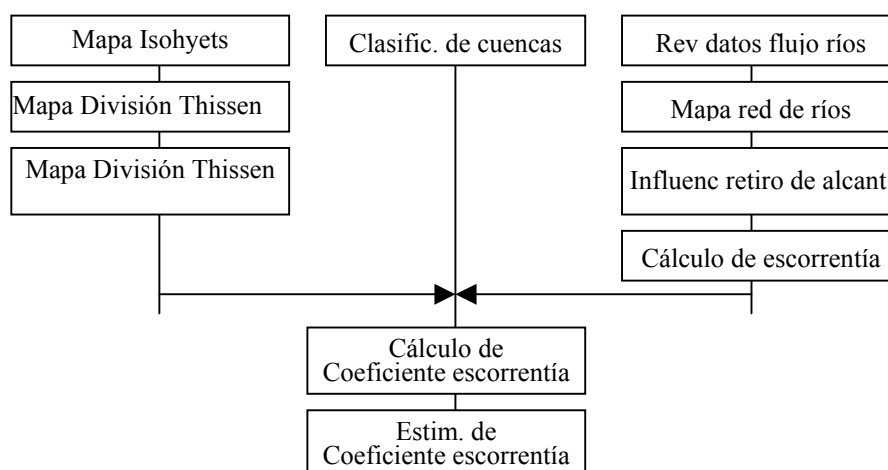


Figura-5.1 Proceso de cálculo de análisis hidrogeológico

Tabla-5.4 Clasificación de cuencas

Grupo 1	Gran parte del área está en las montañas altas. Principalmente las cuencas de ríos tributarias. Poca la influencia de actividad humano en datos de flujo de río.
Grupo 2	El 50% del área aproximadamente. Cuencas de ríos tributarios en área agrícola. Influencia significativa en datos de caudal del río. la extracción de agua
Grupo 3	Parte baja del área de la Sabana. La corriente principal del río Bogotá. influencia significantes sobre los datos de caudales por ejemplo, la salida del alcantarillado y extracción de agua para uso doméstico e irrigación.

(3) Cálculo de precipitación

Basándonos en datos de precipitación de largos períodos, se elaboró el mapa de precipitación anual que aparece en la [エラー! リンクが正しくありません.](#) La precipitación anual por cuenca se calculó a partir de este mapa. La figura muestra que la intensidad de lluvia es alta en las áreas tributarias del Grupo-1 y baja en el suroeste de la Sabana; la precipitación anual media está en 941mm en la cuenca del río Tunjuelito como máximo y mínimo es de 600mm en la cuenca del río Subachoque (1).

(4) Red de ríos

Se elaboró un mapa de la red de ríos graficando los datos de caudales. Con base en este, se elaboró un diagrama de flujo del río Bogotá (véase la Figura-5.3) graficando las observaciones de flujos aguas arriba de la estación de Alicachín, estación localizada aguas abajo. Este diagrama muestra claramente que la entrada de agua a la planta de purificación de Tibitoc y la descarga del alcantarillado en el centro de la ciudad de Bogotá afectan el caudal del río Bogotá en alto grado.

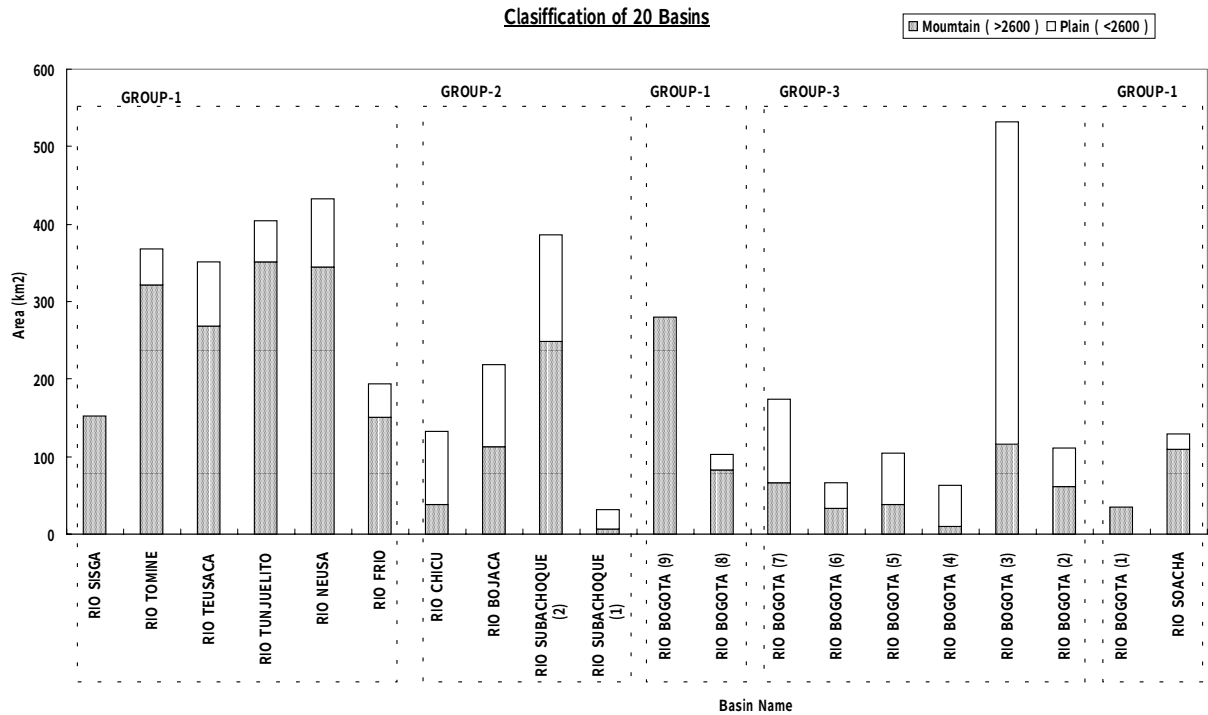


Figura-5.2 clasificación de cuencas

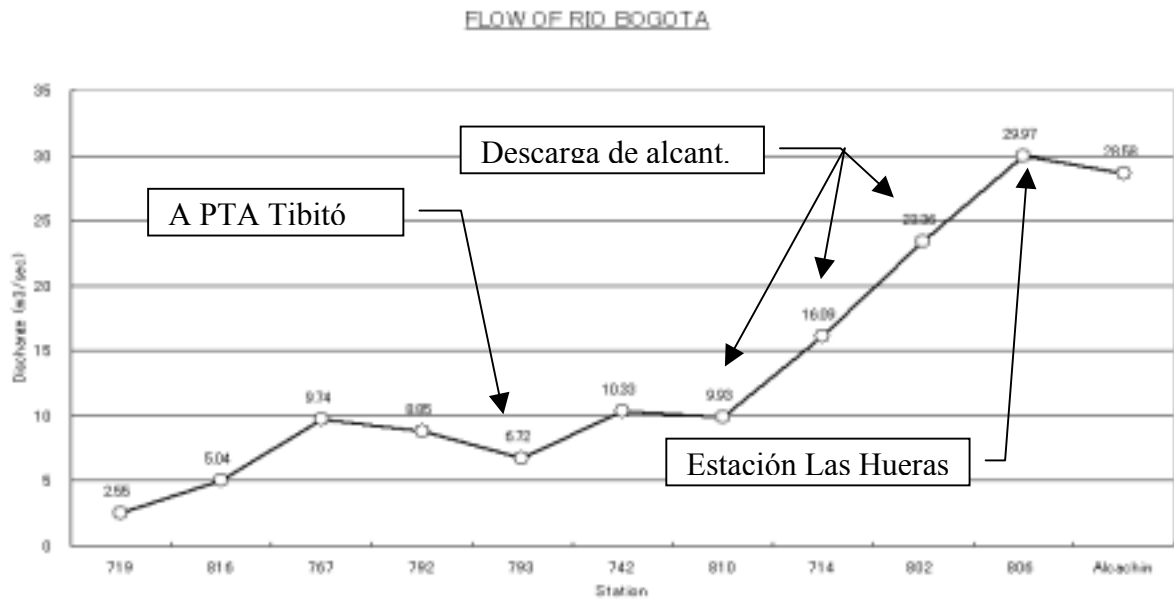


Figura-5.3 Curva de flujo del río Bogotá

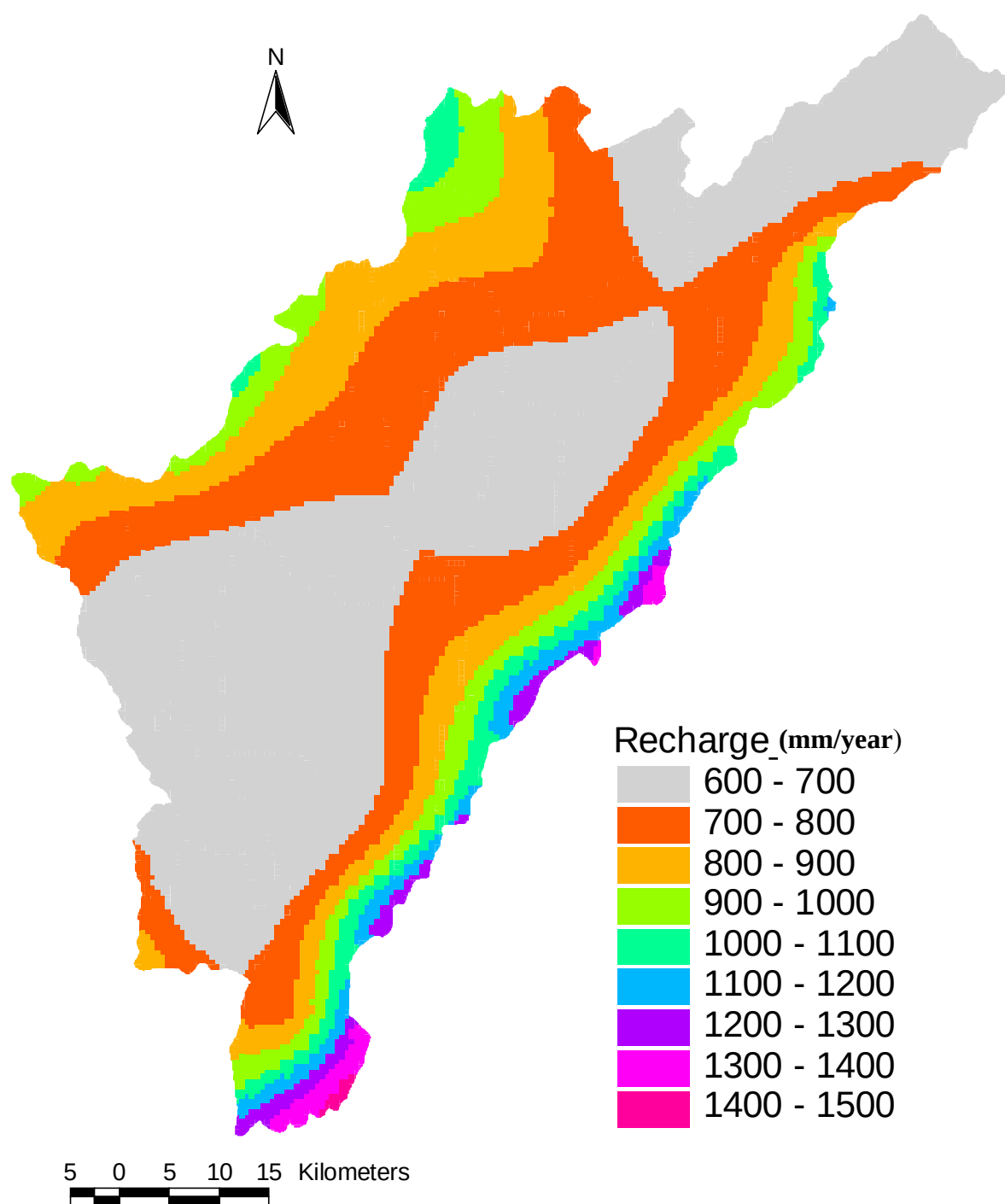


Figura-5.4 Mapa de Equi-precipitación

(5) Influencia de la descarga del alcantarillado

La descarga del alcantarillado tiene un impacto significativo en el río Bogotá, por ejemplo las cuencas Bogotá (3) y Bogotá (4), y Río Tunjuelito. En estos ríos, la salida del alcantarillado debe tomarse de la esorrentía obtenida por medio de los datos de flujo. Las aguas del alcantarillado generadas se han estimado como el 80% del volumen de suministro de agua potable, del cual el alcantarillado de la cuenca Bogotá (3) constituyen un 79%, y la cuenca Bogotá(4) un 9% y la cuenca del río Tunjuelito un 12% en proporción con sus áreas. Bajo esta asunción, el suministro de agua para el área de la unidad de la cuenca río Tunjuelito se estima en la mitad de la de las otras cuencas. Para la cuenca Bogotá (3), que constituye gran parte de la salida del alcantarillado, una esorrentía neta, que aparece en la Figura-5.3 ha sido estimada planteando los datos de flujo a la entrada y salida de la cuenca, así como de la cantidad suministrada de agua. Los datos de flujo del río entre 1973 a 1999 aplican para el cálculo. Del cálculo, se obtuvieron los valores siguientes.

Tabla-5.5 Descarga del alcantarillado

Periodo de datos de flujo del río 1973-1999		
Suministro promedio de agua: 12.8 m3/seg		
Salida total alcantarillado	Total	10.24 m3/sec
	Bogotá (3)	8.09 m3/seg
	Tunjuelito	1.23 m3/seg
	Bogotá (4)	0.93 m3/seg
Esorrentía bruta	Bogotá (3)	13,15 m3 / seg
	Tunjuelito	4.94 m3/seg
Esorrentía neta	Bogotá (3)	5.06 m3/seg
	Tunjuelito	3.71 m3/seg

(6) Cálculo de coeficientes de esorrentía

Se han calculado coeficientes de esorrentía a partir de los calculos de esorrentía. En cuanto al Grupo-2 y Grupo-3, sólo pocas cuencas han obtenido sus coeficientes de esorrentía, debido a una falta de datos aplicables del flujo del río. En los casos de las cuencas del río Tunjuelito y del río Bogota (3), los coeficientes de esorrentía bruta se comparan con los netos, donde se eliminan las influencias de la descarga del alcantarillado.

Tabla-5.6 Coeficientes de esorrentía calculados a partir de los datos de flujo

	Nombre de la cuenca	Coeficiente de Esorrentía
Grupo-1	RÍO SIGSA	40,0%
	RÍO TOMINE	34,0%
	RÍO TUNJUELITO	30,7% (40,9%)
	RÍO NEUSA	21,5%
	RÍO BOGOTÁ (9)	39,9%
Grupo-3	RÍO BOGOTÁ (5)	20,0%
	RÍO BOGOTÁ (3)	41,0% (107,6%)

Nota) La cifra entre paréntesis muestra el coeficiente bruto de esorrentía.

(7) Estimación de coeficientes de esorrentía

El coeficiente de esorrentía calculado ha sido aplicado para estimar aquéllos de otras cuencas que no tienen base de datos de flujos teniendo en cuenta condiciones similares de cuenca.

< Grupo 1 >

Los coeficientes de esorrentía de las estaciones del Grupo-1 aparecen en la Figura-5.5. Los coeficientes de esorrentía varían ampliamente donde el área de la cuenca es pequeña, pero parecen converger a medida que el área de la cuenca es más grande. Basándose en la Figura-5.5,

fue obtenida una fórmula aproximada para calcular el coeficiente de escorrentía de un área de la cuenca. La Figura-5.6 muestra la curva aproximada.

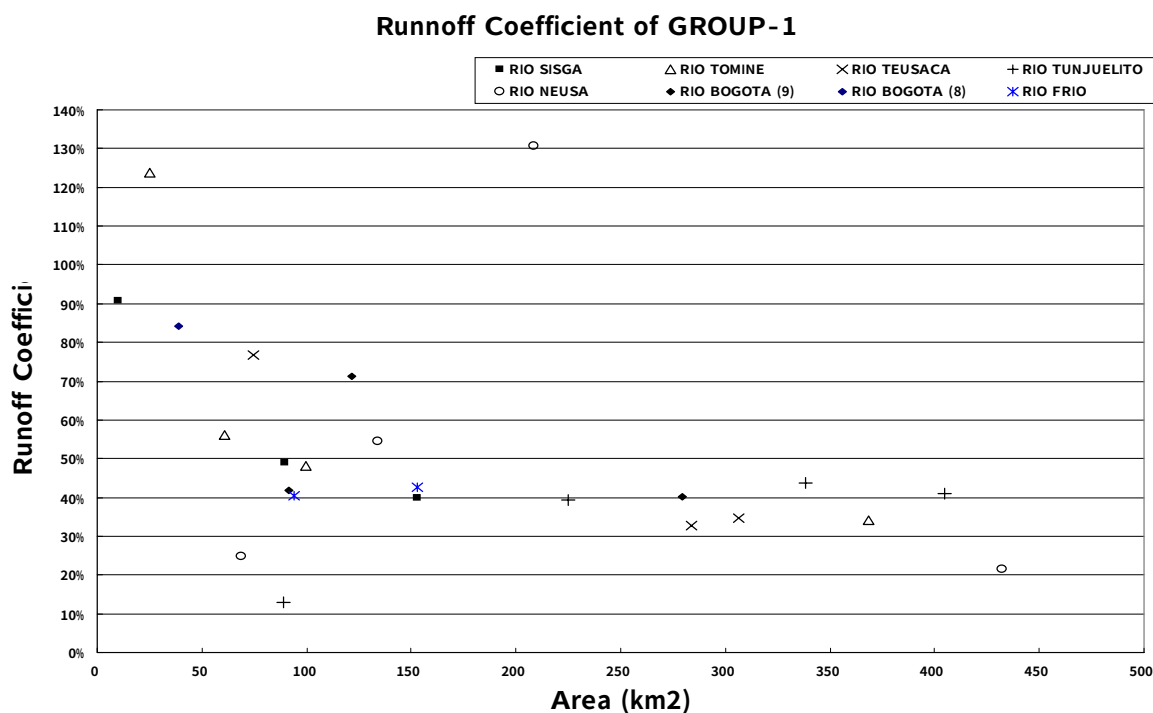


Figura-5.5 Coeficiente de escorrentía en Grupo-1

Approximate Curve of Runoff Coefficient in GROUP-1

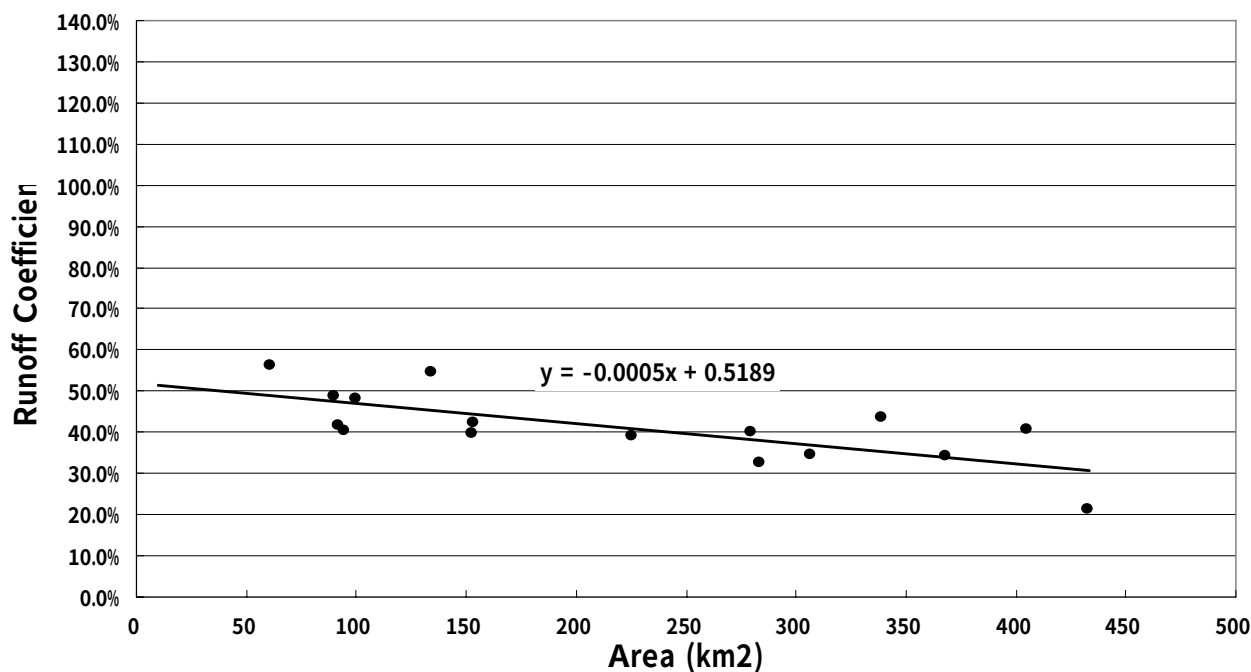


Figura-5.6 Curva aproximada de escorrentía

Tabla-5.7 Coeficiente de escorrentía del Grupo-1

Cuenca	Coeficiente de Escorrentía		
	Datos de estación	Fórmula aproximada $Y=-0.0005x+0.5183$	Valor aplicado
Sisga	39.8%	44.2%	39.8%
Tomine	34.2%	33.4%	34.2%
Teusaca	-	34.2%	34.2%
Tunjuelito	30.7%(40.9%)	31.6%	30.7%
Neusa	21.5%	30.2%	30.2%
Frio	-	42.1%	42.1%
Bogota(9)	40.0%	37.9%	40.0%
Bogota(8)	-	46.7%	40.0%
Bogota(1)	-	50.1%	50.1%
Muna	-	45.4%	45.4%

< Grupo 2, 3 >

En los grupos 2 y 3, la relación de área en la sabana es alta. Se considera que el coeficiente de escorrentía de la Sabana es baja y varía poco, no importa el tamaño de la cuenca porque la escorrentía se causa principalmente en las montañas. Por consiguiente, se calcularon coeficientes de escorrentía que pertenecen a estos grupos, bajo la asunción de que el coeficiente de escorrentía de la Sabana es casi por el método de cálculo, como se explica en seguida.

- Las cuencas con coeficientes de escorrentía calculados a partir de los datos observados existen sólo para las cuencas Bogota (3) y Bogota (4). Los coeficientes de escorrentía de estas dos cuencas se aplicaron a las cuencas los datos de flujo en similitud de condiciones de cuenca.
- La cuenca Bogota (3) ha sido dividida en dos cuencas subalternas a lo largo del río Bogotá. Bogota (3)-E está al oriente y Bogota (3)-W al occidente del río Bogotá. La cuenca Bogota (3) tiene un área grande y aspectos completamente diferentes en los dos lados. Por tanto, se estimaron coeficientes de escorrentía para ambos.
- Las cuencas de los ríos Bojacá y Subachoque han sido dividido en dos áreas, plana y montañosa. De esta manera, los coeficientes de escorrentía respectivos fueron estimados aplicando la curva aproximada a la montaña y usando el coeficiente de escorrentía del 20% a la Sabana.

Se resumen los coeficientes de escorrentía de las cuencas en el grupo-2 y grupo 3 en la tabla-5.8. Además, el cálculo de los coeficientes de escorrentía de Bogota(3)-E, Bogota(3)-W, Bojacá y la cuenca de Subachoque se muestran en la Figura-5.7.

Tabla-5.8 Coeficiente de escorrentía de las cuencas de los grupos 2 y 3

	Nombre de la cuenca	Coeficiente de escorrentía	Base
Grupo-2	RÍO CHICU	20,0%	Valor de Bogotá(5)
	RÍO BOJACA	32,9%	Vea el cálculo en próxima página
	RÍO SUBACHOQUE (2)	32,2%	Vea el cálculo en próxima página
	RÍO SUBACHOQUE (1)	20,0%	Valor de Bogotá(5)
Grupo-3	RÍO BOGOTÁ (7)	20,0%	Valor de Bogotá(5)
	RÍO BOGOTÁ (6)	20,0%	Valor de Bogotá(5)
	RÍO BOGOTÁ (5)	20,0%	De los datos de flujo de observación
	RÍO BOGOTÁ (4)	41,0%	Valor de Bogotá(3)
	RÍO BOGOTÁ (3)-E	48,5%	Vea el cálculo en próxima página
	RÍO BOGOTÁ (3)-W	20,0%	Valor de Bogotá(5)
	RÍO BOGOTÁ (2)	20,0%	Valor de Bogotá(5)

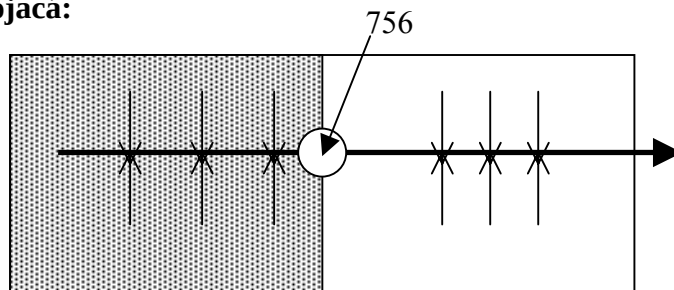
La escorrentía fue finalmente obtenida para todas las cuencas y aparecen en la tabla-5.9.

Tabla-5.9 Escorrentía en el Área de Estudio

Cuenca	Precipitación anual (mm)	Coefficiente de escorrentía (%)	Escorrentía (m ³ /seg)	Cuenca	Precipitación anual (mm)	Coefficiente de escorrentía (%)	Escorrentía (m ³ /seg)
SISGA	913	40.0%	1.77	BOGOTÁ (8)	725	40.0%	0.95
TOMINE	873	34.0%	3.47	BOGOTÁ (7)	730	20.0%	0.80
TEUSACA	896	34.2%	3.42	BOGOTÁ (6)	772	20.0%	0.32
TUNJUELITO	941	30.7%	3.71	BOGOTÁ (5)	705	20.0%	0.47
NEUSA	850	30.2%	3.52	BOGOTÁ (4)	713	41.0%	0.58
FRIO	838	42.1%	2.18	BOGOTÁ (3)-E	770	48.5%	4.36
CHICU	752	20.0%	0.63	BOGOTÁ (3)-W	624	20.0%	0.65
BOJACA	755	32.9%	1.72	BOGOTÁ (2)	618	20.0%	0.44
SUBACHOQUE (2)	833	32.2%	3.28	BOGOTÁ (1)	722	50.1%	0.41
SUBACHOQUE (1)	600	20.0%	0.12	MUNA	727	45.4%	1.35
BOGOTÁ (9)	719	39.9%	2.54	-	-	-	-
Total	Precipitación anual=802mm, Coeficiente de Escorrentía =33.7%, Escorrentía =36.69(m ³ /s) Tomando en cuenta el agua tomada y regresada, la descarga a la salida de la sabana de Bogotá se puede calcular en 30.73m ³ /s. La escorrentía total en el área de estudio es 24.57m ³ /s después de restar el volumen de alcantarillado cuyo abastecimiento de agua viene de otra cuenca. <Agua tomada: 16.20m ³ /s para irrigación; 11.10m ³ /s para usos domestico u otros usos; 5.10 m ³ /s> <Alcantarillado: 10.24 m ³ /s – Fuente en el Área; 4.08m ³ /s, Fuente fuera del Área ;11.10m ³ /s>						

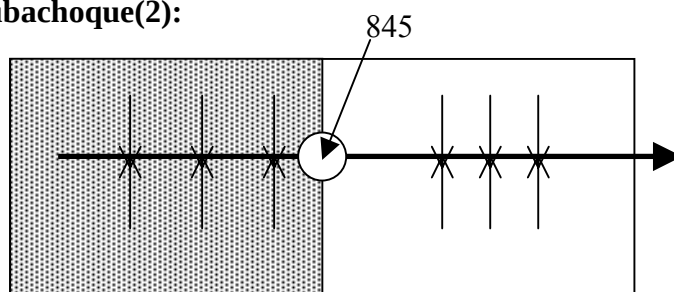
Estimación de Coeficiente de escorrentía en las cuencas del río Bojacá, Subachoque(2), Bogotá(3)

Cuenca Río Bojacá:



Coeficiente de escorrentía 47% (montaña) 20% (llano) 32.9%(total)

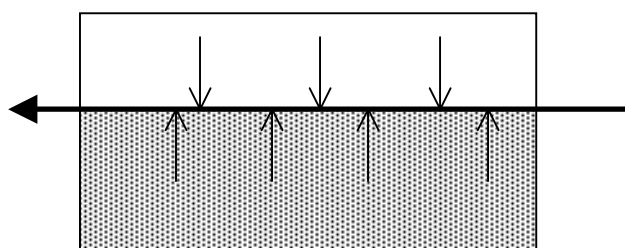
Cuenca Río Subachoque(2):



Coeficiente de escorrentía 41% (montaña) 20% (llano) 32.2%(total)

Cuenca Río Bogotá(3):

Río Bogotá(3)-W



Coeficiente de escorrentía	Río Bogotá(3)-W	20% (llano)
	Río Bogotá(3)-E	48.5%
	Río Bogotá(3) Total	41.4%

Figura-5.7 Coeficiente de escorrentía de cuencas de ríos Bojaca, Subachoque (2) y Bogotá(3)

5.2.2 Recarga de agua subterránea

(1) Ecuación básica de análisis de balance hídrico

Las aguas subterráneas se recargan a partir de las aguas lluvias de las montañas, cerros y colinas, sabanas y ríos, en el Área de Estudio entonces las aguas subterráneas de recarga se infiltran gradualmente a los acuíferos profundos. En este Estudio, la recarga de agua subterránea fue evaluada mediante el análisis del balance hídrico. La Ecuación del balance hídrico usada para este análisis es la siguiente:

$$P-ETR+(D_1-D_2)+(G_1-G_2)-U = \Delta S_s + \Delta S_w + \Delta H_s \quad (1)$$

P-----	Precipitación (mm)
ETR--	Evapo-transpiración real (mm)
D ₁ ----	Escorrentía directa a la cuenca (mm)
D ₂ ----	Escorrentía directa de la cuenca (mm)
G ₁ ----	Flujo de aguas subterráneas a la cuenca (mm)
G ₂ ----	Flujo de aguas subterráneas de la cuenca (mm)
U-----	Agua consumida dentro a la cuenca (mm)
ΔS _s ---	Aumento de almacenamiento de agua superficial en la cuenca (mm)
ΔS _w ---	Aumento de almacenamiento de agua subterránea en la cuenca (mm)
ΔH _s ---	Aumento de humedad del suelo en la cuenca (mm)

La lluvia que alcanza la superficie se infiltra en el suelo. El agua infiltrada hace que se recupere el déficit de humedad del suelo, entonces se convierte, parcialmente en escorrentía y parte se vuelve recarga del agua subterránea. Bajo esta asunción, la recarga del agua subterránea se calculó de la ecuación arriba mencionada. La ecuación (1) es simplificada por algunas asunciones. Finalmente, la recarga anual de agua subterránea anual es calculada por la siguiente ecuación:

$$\text{Recarga anual de aguas subterráneas} = P-ETR - (D_2 + G_2^{\text{baseflow}}) \quad (2)$$

P	: Precipitación en la cuenca (mm/año)
ETR	: Evapo-transpiración real de la cuenca (mm/año)
D ₂	: Escorrentía directa de la cuenca (mm)
G ₂ ^{baseflow}	: Flujo base (mm)
(D ₂ + G ₂ ^{baseflow})	: Escorrentía de la cuenca (mm/año)

En este Estudio, la recarga de agua subterránea anual se calculó basados en la ecuación (2).

(2) Cuencas para el análisis de balance hídrico y período para el análisis de balance hídrico

El análisis de balance hídrico se llevó a cabo para todas las cuencas del Área de Estudio. Los datos hidrológicos y meteorológicos usados para este análisis son principalmente de la CAR, que ha acumulados sus datos de observación a largo plazo por un lapso de 5 a 30 años. La recarga de agua subterránea fue analizada utilizando datos anuales promedio de largo plazo

(3) Precipitación de cuencas (p)

La precipitación media anual del Área de Estudio se muestra en la Figura-5.8. La precipitación promedio anual del Área de Estudio es 802mm.

(4) Descarga del río en las cuencas (D₂ + G₂^{baseflow})

La descarga del río del Área de Estudio fue analizada y su resultado es mostrado en el análisis del balance hídrico.

(5) Evapo-transpiración potencial (ETP)

Es sumamente difícil medir la evapo-transpiración potencial directamente. Por tanto, la evapo-transpiración potencial normalmente es evaluada por métodos experimentales. Tres métodos, Penman–Monteith, Hargreaves y método de Turc frecuentemente han sido utilizados para la evaluación de la evapo-transpiración potencial en el Área de Estudio. En este Estudio, se compararon los resultados de los tres métodos anteriores con evaporación de bandeja (*pan-evaporation*) observada en las siete estaciones meteorológicas. Del resultado de esta comparación, el Método de Turc tiene la relación más alta con la *pan-evaporation* observada. Sin embargo, no se ha concluido todavía la confiabilidad de los tres métodos en el Área de Estudio. Por consiguiente, el Equipo de Estudio usó la *pan-evaporation* para evaluar la evapo-transpiración potencial. Este método ampliamente utilizado. En el Área de Estudio, se usan evaporímetros *Class-A-Pan* y la evapo-transpiración potencial es aproximada por 70% de la *pan-evaporation* medida con un *Class-A-Pan*.

La *pan-evaporation* de cuencas fue calculada por el método de Thiessen, y se calculó la evapo-transpiración potencial por cuenca como 70% de la *pan-evaporation*. La evapo-transpiración potencial calculada para la cuenca se muestra en la Figura-5.8

(6) Evapo-transpiración real

La evapo-transpiración real (ETR) es función de la precipitación, la evapo-transpiración potencial (ETP) y la humedad del suelo. Sobre todo, la relación de la evapo-transpiración ($= ETR/ETP$) se dice que tiene relación fuerte con la precipitación, la evapo-transpiración potencial y la humedad del suelo. En este estudio, se realizó un modelo donde la evapo-transpiración fue expresada en función de la precipitación, la evapo-transpiración potencial (ETP) y la humedad del suelo. La evapo-transpiración real fue calculada aplicando esta función al Área de Estudio.

Datos para el análisis de modelo

Se usaron datos de precipitación diaria y datos de evaporímetros total diaria para el análisis del modelo, como aparece en la tabla-5.10. La mayor parte de los datos comprende el período de 1991 a 1998, durante 8 años.

Tabla-5.10 Estaciones de observación de suelos

Estación de la CAR	Período de observación	Estación de la CAR	Período de observación	Estación de la CAR	Período de observación
Checua	1991-1997	Neusa	1991-1998	Dona Juana	1991-1992, 1994-1998
Guatavita	1991-1997	Primavera	1991-1998	Barrancas	1991-1997
Guymaral	1991-1998	Ramada	1991-1998	Sisga	1993-1997
Iberia	1991-1998	Tabio	1991-1996	Tisquesusa	1991-1998
Muña	1991-1998	Venecia	1991-1997	-	-

Humedad total disponible del suelo por tipo de suelo

Tres tipos de humedad disponible total del suelo se seleccionaron para el modelo basado en datos de la FAO.

Tabla-5.11 Humedad total disponible en el suelo

Tipo de suelo	Punto de capacidad /Punto de marchitamiento	Espesor del suelo	Humedad total disponible del suelo
Suelo arcilloso	180mm/m	× 0.5m	= 90mm
Suelo medio	140mm/m	× 0.5m	= 70mm
Suelo arenoso	100mm/m	× 0.5m	= 50mm

Método de cálculo del modelo

El balance diario hídrico del suelo se analizó en el suelo del modelo con precipitación diaria y evapo-transpiración potencial diaria.

- El balance hídrico del suelo fue calculado diariamente.
- Cuando el agua del suelo excede la humedad total disponible del suelo, ocurre la descarga del agua superficial y subterránea.
- La evapo-transpiración potencial diaria (ETR) se calcula mediante la evaporación diaria de evaporímetro (*pan-evaporation*) × 0.7
- La evapo-transpiración potencial máxima real (ETPR) se calcula mediante la fórmula $kc \times ETR$. Donde, kc es el coeficiente del cultivo. El coeficiente de cultivo se fija en 0.8 considerando la vegetación del Área de Estudio y los datos de la FAO.
- La evapo-transpiración real ocurre de acuerdo con la relación siguiente:

Humedad del suelo > Humedad total disponible del suelo	ETR del día = Evapo-transpiración potencial máxima (ETPR)
Humedad del suelo. Humedad Total Disponible en la tierra	ETR del día = $ETPR \times \text{Humedad del suelo del día} / \text{humedad total disponible del suelo}$

Resultados del análisis del modelo

El balance hídrico del suelo se analizó utilizando la precipitación diaria y la evaporación total diaria, con datos correspondientes a aproximadamente 8 años. La relación evapo-transpiración (ETR/ETP) se obtuvo para cada tipo de suelo. Los resultados del análisis muestran que la proporción de la evapo-transpiración anual (ETR/ETP) tiene una fuerte relación con la relación (Precipitación anual ÷ ETP anual) y la humedad del suelo, como se muestra en la Figura-5.8. Por consiguiente, la relación de la evapo-transpiración anual (ETR/ETP) puede ser aproximada por una función de tres parámetros (precipitación anual, ETP anual y agua disponible del suelo). La función se propone de la siguiente forma:

$$\text{Relación de evapo-transpiración anual (ETR/ETP)} = \text{LN}(1.49 \times P^{0.216} \times W^{0.0545})$$

Donde:

- P : (Precipitación anual de ÷ ETP anual)
 W : Máximo de agua disponible en el suelo (mm)
 $\text{LN}()$: Logaritmo natural

La mayor precisión de la función se muestra en la Figura-5.8. Por medio de esta función puede estimarse la evapo-transpiración real (ETR) del Área de Estudio, considerando la precipitación, la evapo-transpiración potencial (ETP) y el tipo de suelo.

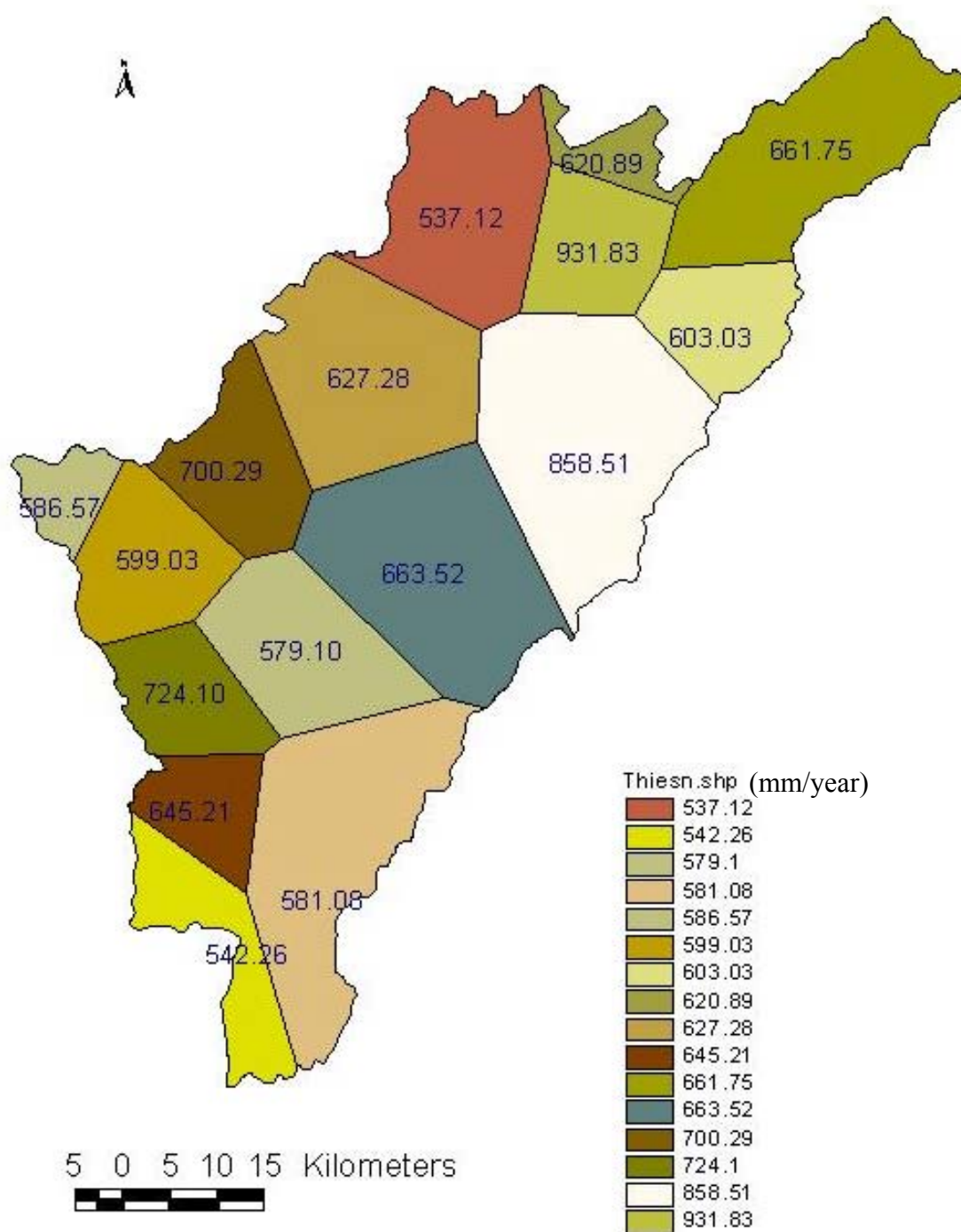


Figura-5.8 ETP anual

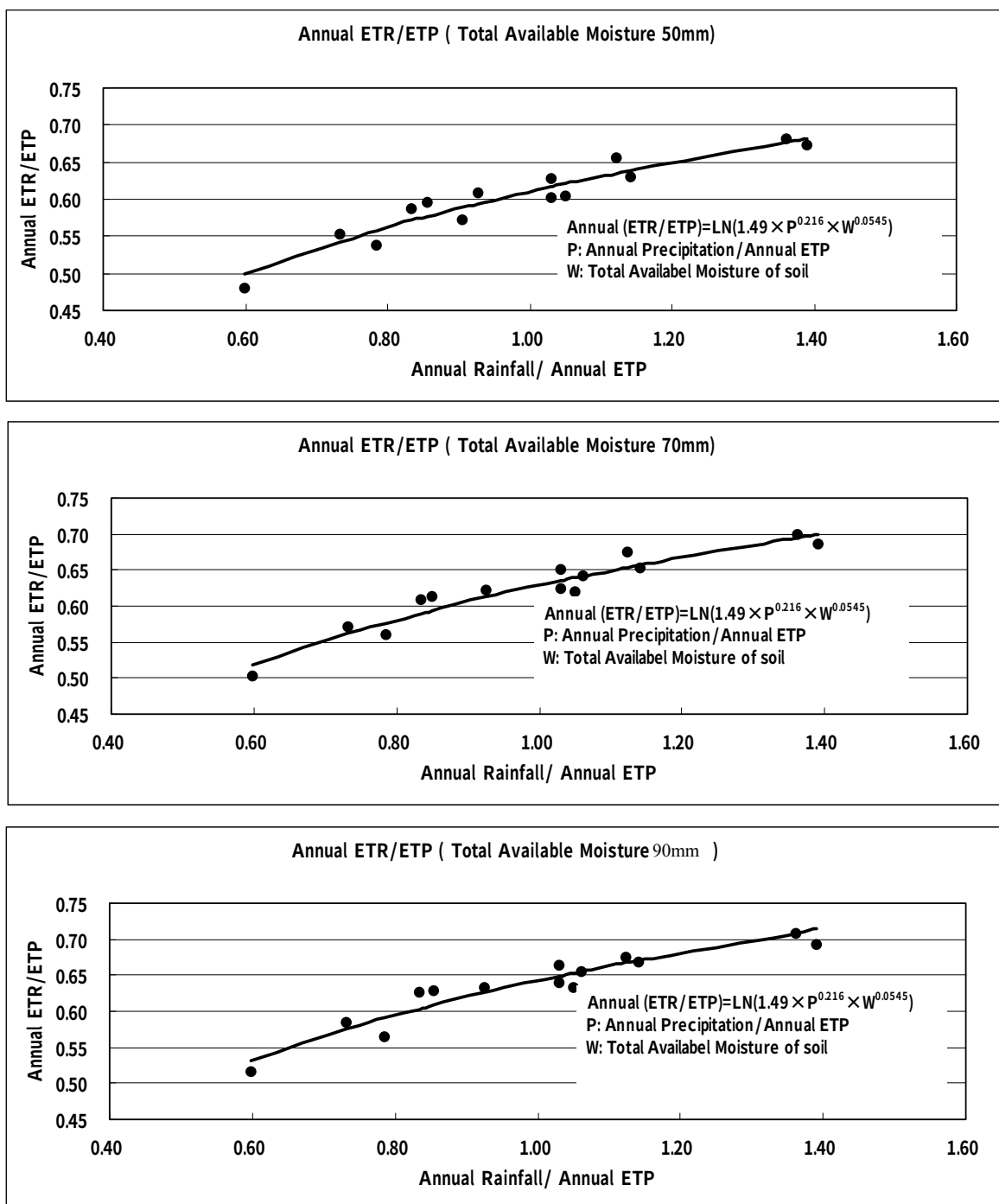


Figura-5.9 Resultados analizados de 14 estaciones (por tipo de suelo) y aproximación por función

(7) Evapo-transpiración real del Área de Estudio

La evapo-transpiración real del Área de Estudio se analizó utilizando la función que se obtuvo en sección anterior. Para el cálculo de la ETR, los mapas “Mapa de Precipitación Anual”, “Mapa de ETR Anual” y “Mapa de Humedad Total Disponible en el Suelo” se sobrepusieron y se aplicó la función. La ETR calculada se muestra en la Figura-5.8. El “Mapa de Humedad Disponible Total” lo obtuvo el Equipo del Estudio del “Mapa de uso de Suelos” elaborado por el Equipo de Estudio. Cómo se elaboró este mapa, se resume en la エラー! リンクが正しくありません。 .

Tabla-5.12 Descripción del mapa de humedad disponible total

Item	Método para estimación
Categoría de uso del suelo	①Bosque ②Suelo en pastos y cultivos ③Suelos desnudos, ④Agua ⑤ Área urbana
Humedad Disponible Total en la tierra	(Capacidad de campo (mm/m) – Punto de marchitamiento (mm/m) x Espesor del suelo (m) Dónde, (Capacidad de campo (mm/m) – Punto de marchitamiento (mm/m) se estimó como se describe debajo, refiriéndonos a los datos de la FAO Suelo arcilloso :180(mm/m) Suelo franco :140(mm/m) Suelo arenoso :100(mm/m) En “Agua”, ETR=ETP.
Espesor del suelo	El espesor del suelo se fijó de acuerdo con la clasificación topográfica. El espesor del suelo es 0.4m en la Sabana baja (E.L.<2600m) y en la Sabana alta (E.L.>2600m) El espesor del suelo es 0.2m en montañas y cerros.

(8) Recarga de agua subterránea

La recarga de Agua subterránea se calculó a partir de la ecuación (2).

$$\text{Recarga anual de aguas subterráneas} = P - \text{ETR} - (D_2 + G_{2-\text{baseflow}}) \quad (2)$$

P	: Precipitación en la cuenca (mm/año)
ETR	: Evapo-transpiración real de la cuenca (mm/año)
(D ₂ + G _{2-baseflow})	: Escorrentía de la cuenca (mm/año)

Para el cálculo de la recarga anual de aguas subterráneas, se solaparon los mapas “Mapa de Precipitación”, “Mapa ETR” y “Mapa de Descarga de Río”. La recarga de aguas subterráneas calculada se muestra en la Figura-5.11.

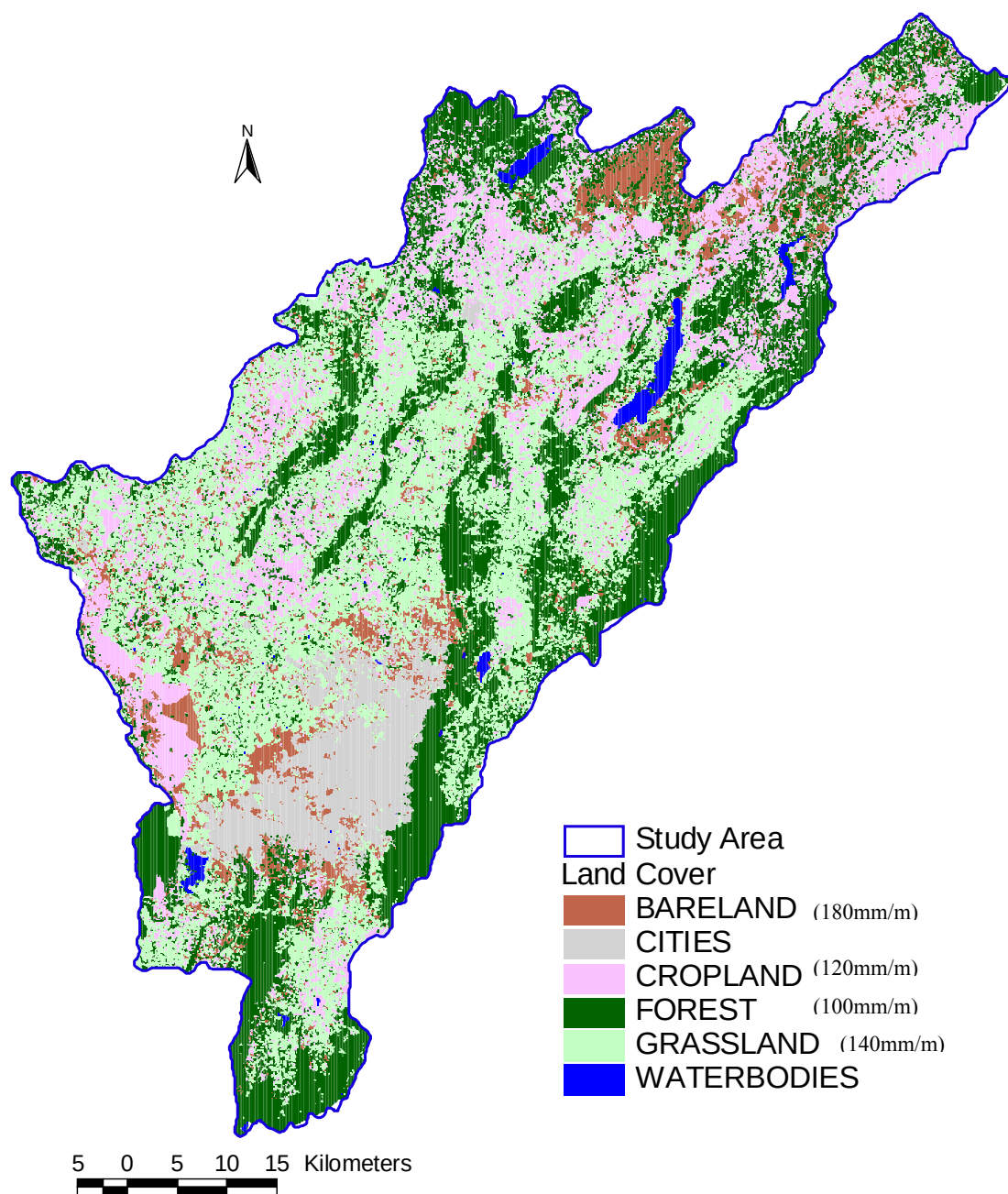


Figura-5.10 Clasificación de Humedad disponible total en el suelo

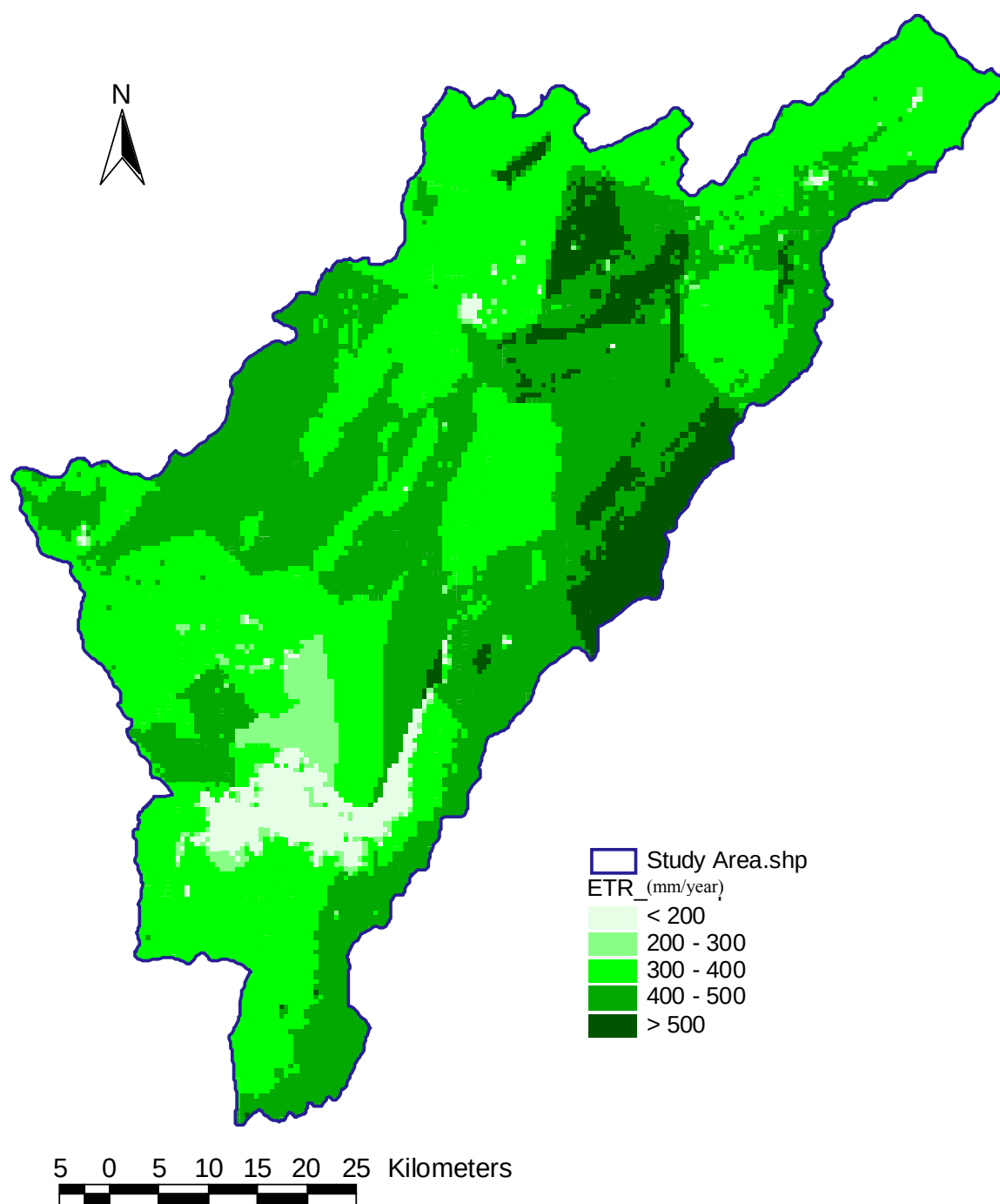


Figura-5.11 ETR anual

Tabla-5.13 Resultados del análisis de recarga de agua subterránea

Cuenca	Área de drenaje (km ²)	Precipitación anual (mm)	Escorrentía anual (mm)	ETR anual (mm)	Recarga de agua subterránea anual	
					(× 10 ⁶ m ³)	(mm)
Bogotá 1 -Bogota 3	36	707	270	333	71.0	105
Bogotá 4 -Bogota 6	111	727	186	391	34.7	149
Bogotá 7 -Bogotá 9	103	724	244	418	34.5	62
Bojaca	219	755	248	378	28.2	129
Chicu	134	751	150	414	25.1	187
Frio	194	838	353	385	19.4	100
Neusa	432	850	257	406	80.9	187
Sisga	152	913	365	405	21.7	143
Muna	128	727	330	339	7.49	58
Subachoque 1	32	600	120	409	2.23	71
Subachoque 2	386	833	268	415	57.9	150
Teusaca	353	896	307	423	58.7	166
Tomine	368	873	297	467	40.2	109
Tunjuelito	404	942	289	323	133	330
Total	4.268	805	271	391	615	144

Es imposible calcular la recarga de agua subterránea en la cuenca del río “Bogotá (3)E” por el mismo método que se aplicó a las otras cuencas, porque la cuenca “Bogotá (3)E” es muy desarrollada y la superficie se cubre con materiales artificiales y la lluvia no puede infiltrarse en la tierra. Por consiguiente, el balance hídrico y la recarga de agua subterránea en el área de la ciudad de Bogotá de la cuenca “Bogotá (3)E” se calculó basados en la relación mostrada debajo:

- Precipitación = Descarga del río + ETR
- Recarga de agua subterránea = 0 mm/año

El promedio de recarga de agua subterránea para toda el área (20 cuencas) de estudio se calculó en 144mm/año (615 millón m³/año, o 19.5m³/s).

< Recarga total de agua subterránea del Área de Estudio >

Área	Área de drenaje (km ²)	Recarga de agua subterránea	
		mm/año	m ³ /año
Toda el Área de Estudio incluyendo la Sabana de Bogotá	4,260	144	615,200,000

(9) Calibración del resultado de recarga de agua subterránea por características del suelo

La humedad del suelo tiene gran influencia en la estimación de la recarga de agua subterránea. Sin embargo, decidir cuál es exactamente la humedad del suelo, es difícil. Para evaluar los cambios en la recarga de agua subterránea calculada con cambios en el valor de la humedad del suelo, se hizo la calibración cambiando la humedad total disponible en el suelo (TAM). Los resultados de esta calibración se muestran en la Figura-5.13. Como aparece en la Figura-5.13, hay un pequeño cambio en la recarga de agua subterránea, aunque el cambio en el TAM sea bastante notorio.

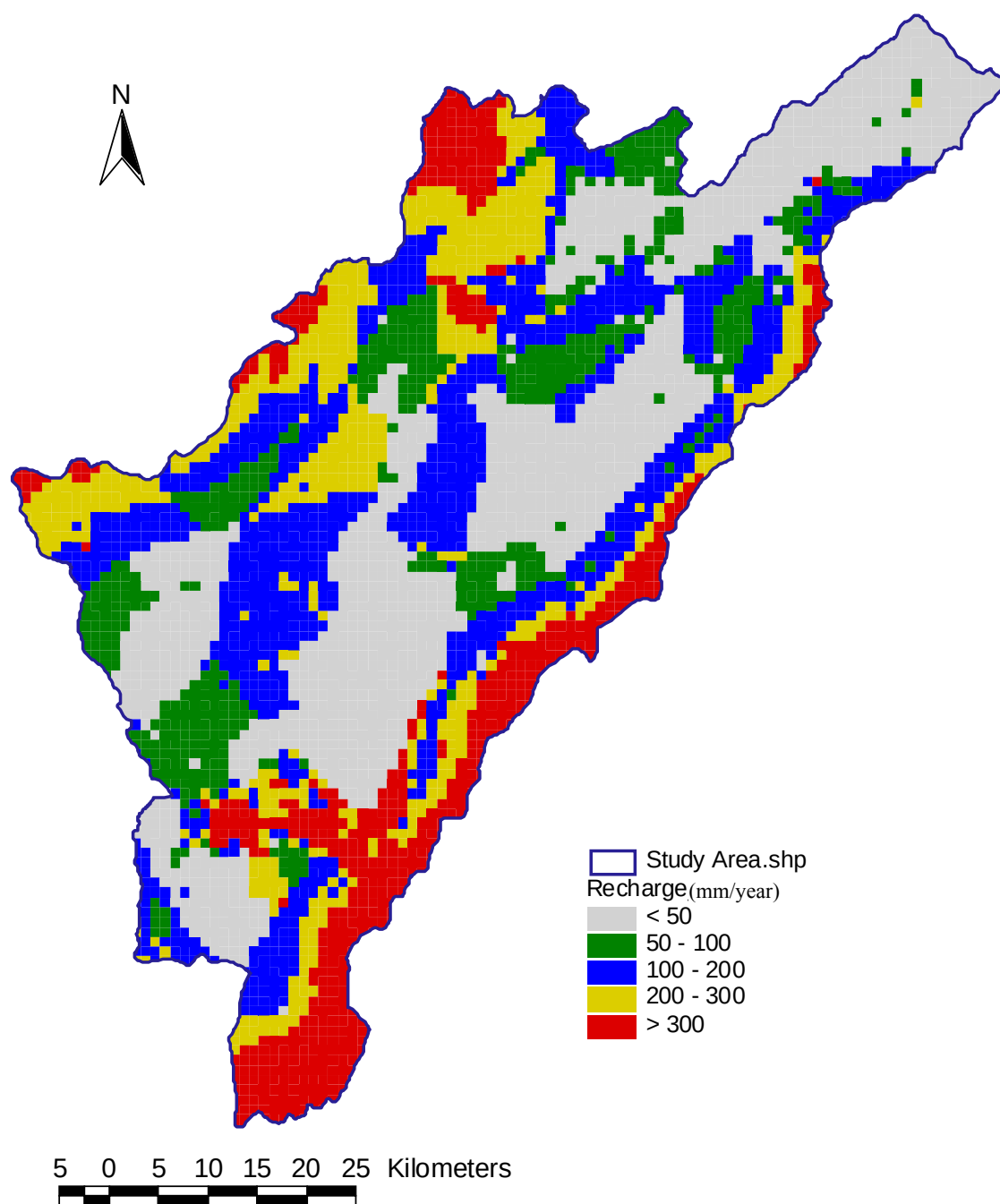


Figura-5.12 Recarga anual de agua subterránea

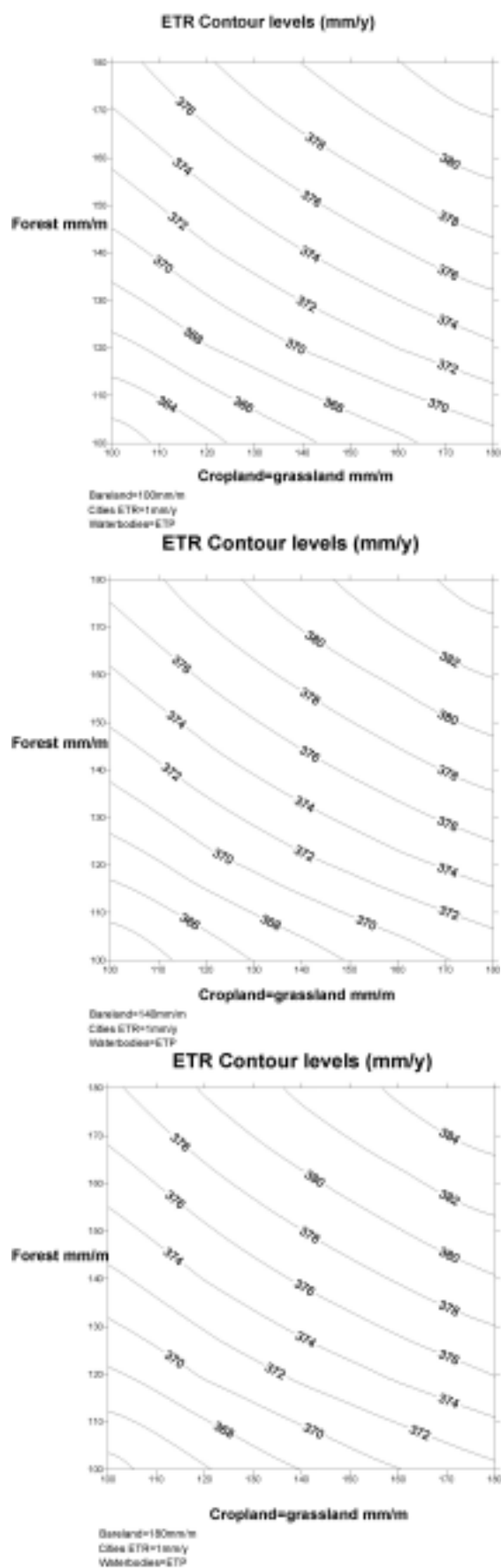


Figura-5.13 Resultados de la calibración