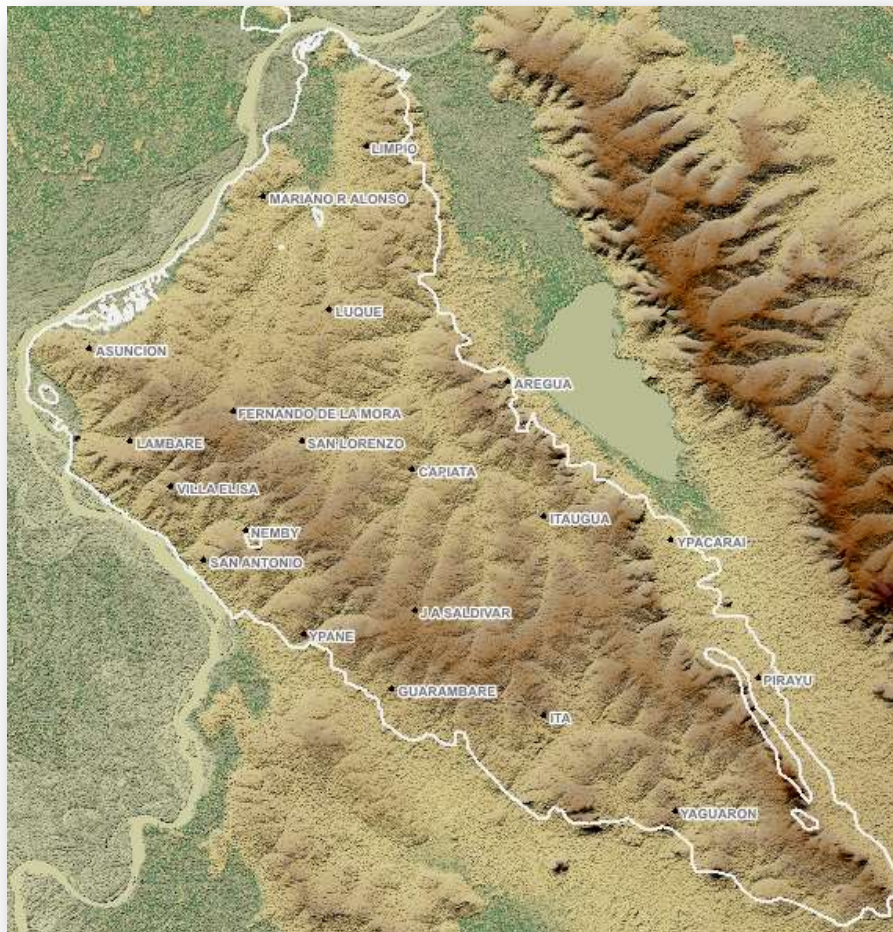


ESTUDIO DE RECURSOS HÍDRICOS Y VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DEL ACUÍFERO PATIÑO

PR-T1207



CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

MARZO 2018

Gestionado por



TEKOKHA
RESAI
SAMBIVHYHA
SECRETARÍA DEL
AMBIENTE



Financiación a través de la



Ejecución



INDICE

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	Objetivos	9
2	MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA Y TRANSPORTE DE SOLUTOS	9
3	MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO PATIÑO	12
4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	13
4.1	Definición geométrica del modelo	13
4.2	Generación de la malla de cálculo	15
	Definición de la discretización temporal.....	15
4.3	Parámetros hidráulicos	15
4.3.1	Permeabilidad hidráulica.....	15
4.3.2	Coeficiente de almacenamiento	16
4.4	Condiciones de contorno	17
4.4.1	Rio Paraguay.....	17
4.4.2	Red hídrica.....	18
4.5	Recarga del acuífero.....	19
4.5.1	Infiltración directa de agua de lluvia	19
4.5.2	Infiltración asociada a las pérdidas de las redes de abastecimiento y saneamiento.....	37
4.5.3	Implementación de la recarga en el modelo.	46
4.6	Extracciones de agua en el acuífero (MAA)	47
4.6.1	Datos procedentes de inventario de pozos.....	48
4.6.2	Cálculo de las demandas	52
4.7	Calibración y verificación	57
4.7.1	Datos disponibles para la calibración.....	57
4.7.2	Datos disponibles para la verificación.....	59
4.7.3	Resultados generales de la calibración	60
4.7.4	Verificación.....	83
5	RESULTADOS OBTENIDOS	84
6	MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS.....	86
6.1	Generalidades	86
6.1.1	Advección	86
6.1.2	Difusión	86
6.1.3	Dispersión.....	87

6.2	Hipótesis planteadas	88
6.3	Condiciones iniciales y fuentes de entrada de los elementos en el acuífero	88
6.4	Calibración del modelo de transporte	90
6.5	Interpretación de los resultados	91
6.6	Consideraciones	92
7	DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS	93
8	ESCENARIOS PARA EL SEGUIMIENTO Y CONTROL	93
8.1	Análisis de los resultados	94
9	ESCENARIOS PROSPECTIVOS ORIENTADOS A LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL ACUÍFERO 116	
9.1	Efecto del cambio climático en la recarga del acuífero Patiño	117
9.1.1	Escenarios de cambio climático	117
9.1.2	Estimación de la recarga en base al cambio climático	121
9.1.3	Efecto del cambio climático en la evolución de los niveles del acuífero Patiño	122
9.2	Escenarios de gestión del acuífero	125
9.3	Evolución de la expansión urbanística y social	125
9.3.1	Proyección de población futura	125
9.3.2	Escenarios modelados	127
9.3.3	Extracciones	127
9.3.4	Resultados	129
9.3.5	Interpretación de resultados	132
9.4	Evolución sostenible de la población	132
9.4.1	Proyección de población futura	132
9.4.2	Escenarios modelados	133
9.4.3	Extracciones	133
9.4.4	Resultados	135
9.4.5	Interpretación de resultados	138
10	CONCLUSIONES	139
11	BIBLIOGRAFÍA	141

INDICE de figuras

Figura nº01. Sección transversal hidrogeológica esquemática de Gran Asunción con el régimen de flujo de agua subterránea en el Acuífero Patiño. Fuente: Uso de Agua Subterránea en Gran Asunción – Problemas Actuales y Regulación propuesta (Mate, 2002).	13
Figura nº02. Zonas del modelo. En marrón la zona 1. En rosa la zona dos. La línea blanca señala la cota 0. Fuente: elaboración propia con el software Modflow	14
Figura nº03. Topografía asignada al dominio modelado. Fuente: elaboración propia	14
Figura nº04. Malla de diferencias finitas. A la izquierda malla completa, a la derecha detalle de la zona oriental. En rojo el cauce principal del Yukyry y en azul los nodos de las celdas en los que se asigna el elemento.....	15
Figura nº05. Interpolación lineal de los valores de conductividad hidráulica disponibles en el acuífero Patiño.	16
Figura nº06. Condiciones de contorno general en el límite norte. Contacto del Acuífero Patiño con los aluviales del río Paraguay.	17
Figura nº07. Condiciones de tipo dren para representar la red fluvial en el dominio del modelo.	18
Figura nº08. Métodos de descomposición del hidrograma, métodos visuales y estimados en función del área de drenaje. Fuente: (Kresic, 2007)	20
Figura nº09. Localización de la estación de aforo de la cuenca del río Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura nº10. Disponibilidad de datos de caudal circulante en la desembocadura del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura nº11. Resultado de la aplicación de la separación del hidrograma en el arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura nº12. Media de la descarga mensual en mm de la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura nº13. Representación del movimiento de agua en el modelo SWAT. Fuente: Manual del usuario SWAT, 2010.	27
Figura nº14. Esquema de la circulación del agua en el modelo SWAT. Fuente: Manual del usuario SWAT, 2010.	27
Figura nº15. Usos del suelo. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA) (MOPC, 2014) y actualizado con ortofotos actuales. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura nº16. Mapa de pendientes de las subcuencas del Acuífero Patiño. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura nº17. Distribución de subcuencas en la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura nº18. Representación de los resultados del modelo sin calibrar. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura nº19. Representación de los resultados del modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura nº20. Comparación entre los datos registrados en la estación de Aforo del arroyo Yukyry y la precipitación. Fuente: Elaboración propia.	32

Figura nº21. Representación de los datos registrados y los simulados a nivel mensual sin considerar los caudales altos. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura nº22. Balance multianual de la cuenca del arroyo Yukyry resultado en mm. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura nº23. Distribución mensual de la recarga en la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura nº24. Distribución espacial de la recarga para las diferentes cuencas que drenan el acuífero Patiño, expresada como % de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura nº25. Planos de red de agua potable y red de alcantarillado del Gran Asunción. Fuente: Catastro ESSAP	37
Figura nº26. Área cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP	38
Figura nº27. Área cubierta por la red de abastecimiento para cada municipio	39
Figura nº28. Recarga por municipio. Fuente: elaboración propia	41
Figura nº29. Zonas de recarga adicional asociada a la red de abastecimiento dividida por subcuenca. Fuente: elaboración propia.....	41
Figura nº30. Zonas de recarga adicional asociada a la red de alcantarillado dividida por subcuenca. Fuente: elaboración propia.....	42
Figura nº31. Área cubierta por la red de alcantarillado de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP	43
Figura nº32. Zonas de recarga adicional asociada a la red de alcantarillado dividida por subcuenca. Fuente: elaboración propia.....	46
Figura nº33. Discretización de la recarga por infiltración directa de la lluvia por subcuencas ..	47
Figura nº34. Pozos con dato de caudal nominal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de inventario disponibles.....	49
Figura nº35. Variación del volumen de extracción	50
Figura nº36. Área cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP	53
Figura nº37. Área cubierta por la red de abastecimiento.....	54
Figura nº38. Estimación de la población servida por la actual red de abastecimiento	54
Figura nº39. Calculo del a demanda poblacional en municipios cubiertos por ESSAP. Fuente: elaboración propia	55
Figura nº40. Calculo de la demanda agrícola en el Acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia	56
Figura nº41. Ubicación puntos de control	58
Figura nº42. Ríos (condiciones de contorno de tipo dren) de la cuenca del Yukyry considerados en la verificación del modelo numérico de flujo.....	59
Figura nº43. Evolución del caudal base del arroyo Yukyry simulado con SWAT	59
Figura nº44. Valores del caudal base medido en el arroyo Yukyry en el período 2006 -2007 ...	60
Figura nº45. Relación de valores medidos y valores calculados.	60
Figura nº46. Evolución del caudal en la cuenca del Yukyry. Modelo numérico.	83
Figura nº47. Balance hídrico del Acuífero Patiño	84
Figura nº48. Balance hídrico en los últimos seis años (2011 – 2016) según los resultados del modelo numérico de flujo.....	85

Figura nº49. Concentraciones iniciales de cloruros impuestas al modelo.....	89
Figura nº50. Resultados de la calibración del modelo de transporte	90
Figura nº52. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H1 (Recarga +5%, Bombeos -5%).....	96
Figura nº53. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H2 (Recarga +5%, Bombeos +5%)	97
Figura nº54. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H3 (Recarga +5%, Bombeos +15%).....	98
Figura nº55. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H4 (Recarga - 5%, Bombeos - 5 %).....	99
Figura nº56. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H5 (Recarga - 5%, Bombeos +5 %).....	100
Figura nº57. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H6 (Recarga - 5%, Bombeos +15 %).....	101
Figura nº58. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H7 (Recarga - 15%, Bombeos -5 %).....	102
Figura nº59. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H8 (Recarga - 15%, Bombeos 5 %).....	103
Figura nº60. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H9 (Recarga - 15%, Bombeos +15 %).....	104
Figura nº61. Ubicación de los puntos de los que se muestran en el presente informe los resultados de las simulaciones para el seguimiento y control.	105
Figura nº62. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 23. Escenarios H1, H5 y H9	106
Figura nº63. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 7. Escenarios H1, H5 y H9	106
Figura nº64. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 6. Escenarios H1, H5 y H9	107
Figura nº65. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 26. Escenarios H1, H5 y H9	107
Figura nº66. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 44. Escenarios H1, H5 y H9	108
Figura nº67. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 1. Escenarios H1, H5 y H9	108
Figura nº68. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 31. Escenarios H1, H5 y H9	109
Figura nº69. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 14. Escenarios H1, H5 y H9	109
Figura nº70. Evolución de los niveles simulados en el punto 23. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	110
Figura nº71. Evolución de los niveles simulados en el punto 6. Escenarios H0, H1, H5 y H9 ...	110
Figura nº72. Evolución de los niveles simulados en el punto 7. Escenarios H0, H1, H5 y H9 ...	111
Figura nº73. Evolución de los niveles simulados en el punto 26. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	111
Figura nº74. Evolución de los niveles simulados en el punto 44. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	112
Figura nº75. Evolución de los niveles simulados en el punto 1. Escenarios H0, H1, H5 y H9 ...	112

Figura nº76. Evolución de los niveles simulados en el punto 31. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	113
Figura nº77. Evolución de los niveles simulados en el punto 14. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	113
Figura nº78. Evolución de los niveles simulados en el punto 2. Escenarios H0, H1, H5 y H9...	114
Figura nº79. Evolución de los niveles simulados en el punto 17. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	114
Figura nº80. Evolución de los niveles simulados en el punto 24. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	115
Figura nº81. Evolución de los niveles simulados en el punto 35. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	115
Figura nº82. Evolución de los niveles simulados en el punto 42. Escenarios H0, H1, H5 y H9.	116
Figura nº91. Distribución de las diferencias piezométricas en la simulación aplicando una expansión urbanística tendencial y en un escenario extremo.....	130
Figura nº92. Distribución de las diferencias piezométricas en la simulación aplicando una expansión urbanística tendencial y en un escenario probable.....	131
Figura nº93. Distribución de las diferencias piezométricas al año 2050 en la simulación aplicando una expansión sostenible y en un escenario extremo.	136
Figura nº94. Distribución de las diferencias piezométricas al año 2050 en la simulación aplicando una expansión sostenible y en un escenario probable	137

INDICE de tablas

Tabla nº1. Conductividades hidráulicas constantes utilizadas en el modelo durante el proceso de calibración.	16
Tabla nº2. Descarga en mm por mes del acuífero sobre el arroyo Yukyry resultado de la desagregación del hidrograma.....	23
Tabla nº3. Resumen del grado de sensibilidad de los principales parámetros del modelo SWAT	30
Tabla nº4. Recarga por subcuencas en la cuenca del arroyo Yukyry	35
Tabla nº5. Balance del agua distribuida en el área de Gran Asunción. Fuente: Estudio básico para sector de agua potable y saneamiento (JICA, 2009).....	40
Tabla nº6. Volúmenes de infiltración por municipio. Fuente: elaboración propia.....	40
Tabla nº7. Área cubierta por la red de alcantarillado para cada municipio	44
Tabla nº8. Criterios de diseño establecido para las redes de alcantarillado sanitario. Fuente: Plan Maestro de alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales de Asunción y Área Metropolitana (ESSAP, 2012).	44
Tabla nº9. Volúmenes de infiltración por alcantarillado y por municipio. Fuente: elaboración propia	45
Tabla nº10. Recarga adicional. Fuente: elaboración propia	45
Tabla nº11. Promedio mensual de Volúmenes extraídos por ESSAP los últimos 5 años. Fuente: ESSAP.....	50
Tabla nº12. Promedio de horas de uso en los últimos 5 años. Fuente: propia a partir de datos ESSAP	51
Tabla nº13. Valores estadísticos de la calibración.	61
Tabla nº14. Escenarios previstos para realizar el seguimiento de estado del acuífero Patiño. Fuente elaboración propia	94

Tabla nº15. Resultados estadísticos para los diferentes escenarios. Los valores corresponden al tiempo equivalente a 20 años de simulación.....	95
Tabla nº16. Anomalías de precipitación presentadas en cada periodo respecto al período histórico.....	120
Tabla nº17. Anomalías de temperatura presentadas en cada periodo respecto al período histórico.....	121
Tabla nº18. Anomalías de recarga presentadas en cada periodo respecto al período histórico.....	122
Tabla nº19. Población proyectada a 2050. Fuente: cálculos realizados a partir de datos de DGEEC.....	126
Tabla nº20. Aumento de población hasta 2050 por distrito dentro del ámbito de estudio	128
Tabla nº21. Demanda servida con agua subterránea	129
Tabla nº22. Aumento de población hasta 2050 por distrito considerando el escenario tendencial definido por ICES (IADB, 2014).....	134
Tabla nº23. Aumento de población hasta 2050 por distrito considerando el escenario tendencial definido por ICES (IADB, 2014).....	135

1 INTRODUCCIÓN

La situación del acuífero Patiño está condicionada de forma importante por las elevadas presiones antrópicas que sufre. El acuífero abarca parte de la superficie urbana de Asunción y su área metropolitana, provocando un claro deterioro de la calidad de agua. Los vertidos incontrolados de tipo urbano e industrial dañan ostensiblemente este recurso estratégico que es utilizado de forma mayoritaria para uso doméstico.

Además, los bombeos continuados a lo largo del tiempo han condicionado los niveles y los flujos existentes y la relación con las masas de agua adyacentes en los límites del acuífero, pudiendo agravar el problema de la calidad del acuífero favoreciendo previsiblemente el proceso de intrusión salina que se está produciendo producto del contacto con el acuífero del Chaco en un área importante.

Esta situación ha llevado a las autoridades del Paraguay a estudiar el acuífero en repetidas ocasiones, generando una valiosa información antecedente que sirve de base para poder comprender el estado actual del acuífero y su evolución. En este mismo sentido desde la Secretaría del Ambiente (SEAM) se ha promovido el estudio **PR-T1207 “Estudio de Recursos Hídricos y Vulnerabilidad Climática del Acuífero Patiño”**. Financiado por el AECID a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) que tiene como objetivo último generar un plan de gestión del acuífero que garantice la sostenibilidad futura del acuífero.

1.1 Objetivos

El objetivo del presente documento es presentar el modelo integrado de agua superficial y subterránea, así como los resultados obtenidos después de su desarrollo, calibración y verificación

2 MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA Y TRANSPORTE DE SOLUTOS

La ley básica de la hidrología subterránea es conocida como Ley de Darcy y nos indica que el flujo específico de agua en un medio poroso subterráneo es proporcional al gradiente en un factor de proporcionalidad, k , llamado conductividad hidráulica del terreno. En el caso más general este factor tiene carácter tensorial.

$$V = -k \cdot i$$

donde i es el gradiente hidráulico.

La conductividad hidráulica es una característica intrínseca del terreno que indica la mayor o menor resistencia que ofrece este a la circulación del agua. Así, el flujo hidráulico en un terreno de elevada conductividad hidráulica necesitará menos gradiente que un terreno de menor conductividad hidráulica, en el que deberán darse unas condiciones de mayor gradiente, para que exista igual movimiento de agua.

La ley de Darcy se obtiene de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo laminar. El régimen de movimiento de un fluido puede conocerse a partir del valor del número adimensional de Reynolds (Re), que conceptualmente relaciona el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas según la expresión siguiente:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

donde:

v = velocidad de flujo en m/s

d = tamaño medio del diámetro de las partículas: d_{50} o en medios fisurados:

para fisuras muy extensas, el diámetro hidráulico d es igual a 2 veces el valor de la apertura de la fisura.

ρ = la densidad del fluido en g/cm^3

μ = la viscosidad dinámica en dinas.seg/cm^2

En medio poroso es válida la ley de Darcy cuando tenemos que: $Re < 1-10$

La ley de Darcy es estrictamente válida únicamente cuando predominan las fuerzas viscosas, es decir, cuando existe un régimen laminar. En las aguas subterráneas, dado que en general las velocidades son muy pequeñas, la ley de Darcy es casi siempre válida.

La ecuación general de flujo en aguas subterráneas se deriva de un simple balance de masas (Entradas – Salidas = Variación de almacenamiento) y de la Ley de Darcy y es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

El cálculo del transporte de solutos en acuíferos incluye los fenómenos de advección, la dispersión y el retardo.

La advección es el movimiento de solutos a favor del flujo de agua subterránea, provocado por el gradiente hidráulico. La dispersión corresponde a la expansión longitudinal de los solutos en el agua subterránea. Si no hubiera dispersión, los solutos viajarían a la velocidad promedio. Con la dispersión, algunos solutos se desplazan más rápido y otros más lentamente que la velocidad media. El retardo causa que la velocidad de los solutos sea inferior a la velocidad del agua subterránea.

La ecuación diferencial parcial que describe el transporte de solutos en tres dimensiones se puede escribir del siguiente modo (Javandel, I., 1984).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} v_{ic} + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k$$

Siendo

C la concentración de solutos disueltos en el acuífero,

t el tiempo,

D_{ij} la dispersión hidrodinámica,

x la distancia a lo largo de las respectivas coordenadas cartesianas,

V_i la velocidad del agua,

Q_s el flujo volumétrico por unidad de volumen de acuífero,

Θ la porosidad del medio y

$\sum_{k=1}^N R_k$ el término reactivo.

Para resolver estas ecuaciones diferenciales se debe disponer, además de las variables que la determinan, de dos elementos adicionales:

- Las condiciones de contorno en el instante $t = 0$, es decir, las condiciones iniciales en que: $h(x, y, z, t) = h_0(x, y, z, 0)$ para todo x, y, z
- Las condiciones de contorno en los límites del espacio donde se aplica la ecuación (p.ej. un límite impermeable, un contacto con el mar o un lago, etc.)

Existen diferentes métodos de resolución de las ecuaciones de flujo y transporte. Para situaciones concretas se pueden establecer simplificaciones y obtener ecuaciones de resolución sencilla. Para la resolución de las ecuaciones diferenciales se necesitan no obstante métodos numéricos, de los que existen tres principales:

- Elementos finitos
- Diferencias finitas
- Volúmenes finitos

El software utilizado para la construcción del modelo de flujo y transporte del acuífero Patiño ha sido Visual Modflow Flex 5.0. Se han utilizado los motores de cálculo Modflow 2005 y MD3TM.

Modflow utiliza el método de las diferencias finitas para la resolución de las ecuaciones., en el que el sistema de flujo subterráneo es dividido en una malla de celdas. Para cada una de ella, se define un único punto llamado nodo en el que se calcula el nivel piezométrico. Para los detalles de cómo se resuelve la ecuación de flujo a nivel matemático dirigimos al lector a Modular three-dimensional finite difference ground-water flow model (McDonald & Harbaugh, 1988).

El índice del presente documento se plantea siguiendo el esquema característico de la construcción de los modelos numéricos de acuíferos, distinguiendo entre los modelos de flujo y de transporte.

- 1) Definición del modelo conceptual de funcionamiento
- 2) Selección y construcción geométrica del dominio
- 3) Discretización temporal
- 4) Definición de parámetros
- 5) Definición de condiciones de contorno
- 6) Definición de condiciones iniciales
- 7) Calibración
- 8) Verificación

3 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO PATIÑO

El modelo conceptual de funcionamiento del Acuífero Patiño quedó definido en sus aspectos principales en el Diagnóstico del presente estudio (INCLAM-HQA, 2017). El 22 de diciembre de 2017 en la reunión de inicio de la fase de modelación del acuífero, se acordaron una serie de aspectos relativos a su funcionamiento que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- 1) Los contornos del acuífero corresponden a los afloramientos de las arenas terciarias que rellenan el graven, incluidos en el estudio de Diagnóstico.
- 2) A partir de los estudios geofísicos se asume un espesor desconocido, mayor de 600 metros. A efectos de construcción geométrica del modelo se definen dos horizontes por debajo de la topografía, uno 200 metros por debajo de la cota 0 (espesor medio de 300 metros) correspondientes al nivel de explotación del acuífero y otro a 500 metros por debajo de la cota 0 que se incluye para permitir los flujos regionales.
- 3) Los contornos equivalen a las fallas del graven y se consideran sub-verticales. No se incluye en el modelo el sector Benjamín Aceval por desconocimiento de las conexiones hidráulicas con el sector principal, al sureste del río Paraguay.
- 4) Los parámetros hidráulicos recopilados inducen a pensar que existe una gran homogeneidad en acuífero y se propone una permeabilidad y un coeficiente de almacenamiento constante. Se considera que, a grandes rasgos, el acuífero es libre en el horizonte de explotación.
- 5) Se consideran tres contornos en los límites del acuífero.
 - a) El contacto norte con el río Paraguay en el que se supone que el acuífero cede agua de forma difusa.
 - b) En el sector suroeste se considera que podría haber también flujo difuso hacia formaciones acuíferas externas al modelo.
 - c) El resto de los límites se consideran de flujo nulo, incluido la práctica totalidad de la falla este que separa el acuífero Patiño de la cuenca del lago Ypacaraí.
- 6) Otros límites considerados son los ríos y arroyos que configuran la red de drenaje de las cuencas hídricas en la zona de estudio. Se asume que drenan agua del acuífero, regulando así sus niveles.

También se determinó que la fecha inicial del modelo de calibración correspondería al mes de noviembre de 2006 y que se extendería el cálculo hasta el mes de diciembre de 2016 con una discretización temporal mensual.

Desde el punto de vista del transporte se consideró que en el estado actual de conocimiento y con los datos disponibles tan solo es razonable poner a prueba el modelo conceptual de Foster (Mate, 2002) según el cual se explica la salinidad de los pozos de Asunción en relación con unas aguas salinas profundas que podrían tener su origen en el Chaco o corresponder a aguas fósiles salinas asociadas al proceso de relleno del graven (ver Figura nº01)

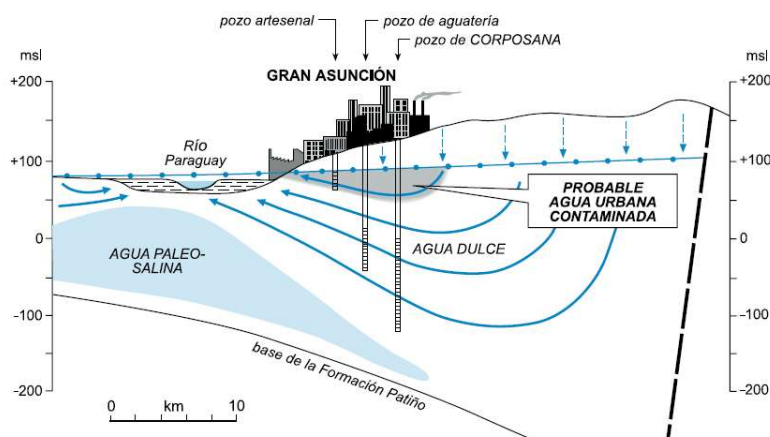


Figura nº01. Sección transversal hidrogeológica esquemática de Gran Asunción con el régimen de flujo de agua subterránea en el Acuífero Patiño. Fuente: Uso de Agua Subterránea en Gran Asunción – Problemas Actuales y Regulación propuesta (Mate, 2002).

4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1 Definición geométrica del modelo

Los límites del modelo corresponden al contorno geológico definido en el Diagnóstico. Integra totalmente los municipios de Asunción, Lambaré, Villa Elisa, Ñemby, Capiatá, San Lorenzo, Fernando de la Mora, Mariano Roque Alonso, Guarambaré y Julián Augusto Saldívar y parcialmente los de Ypané, Luque, Limpio, Areguá, Itauguá, Ypacaraí, Pirayú, Paraguari, Yguarón e Itá.

Se han definido tres horizontes, siguiendo los criterios expuestos en el apartado 3:

- Cota topográfica.
- Cota -200 m.
- Cota -500 m.

Esta disposición de horizontes genera 2 zonas de parámetros en el modelo (ver Figura nº02).

La Zona 1 queda delimitada por la cota topográfica y la cota -200 m.

La Zona 2 queda delimitada por cota -200 m y la -500 m.

La cota topográfica (ver figura 3) corresponde al modelo digital del terreno (DSM) con un paso de malla de 30 m. Cabe recordar que se estiman unas precisiones promedio de 20 m. en altura para esta topografía, situación que ha de tenerse en consideración en la calibración al utilizarse tanto para la acotación de pozos como de cotas drenaje de los ríos.

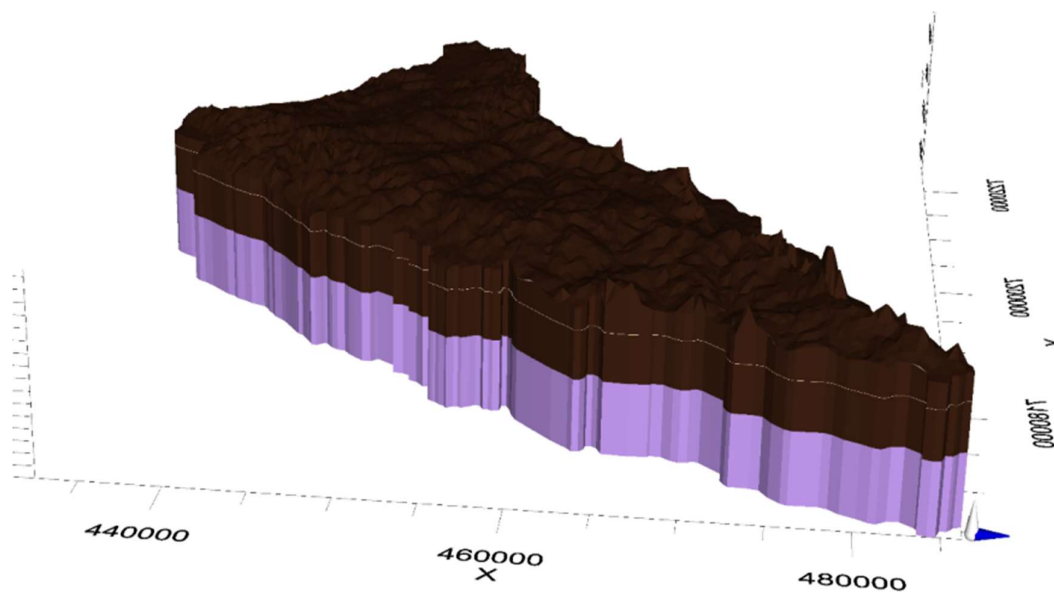


Figura nº02. Zonas del modelo. En marrón la zona 1. En rosa la zona dos. La línea blanca señala la cota 0.
Fuente: elaboración propia con el software Modflow

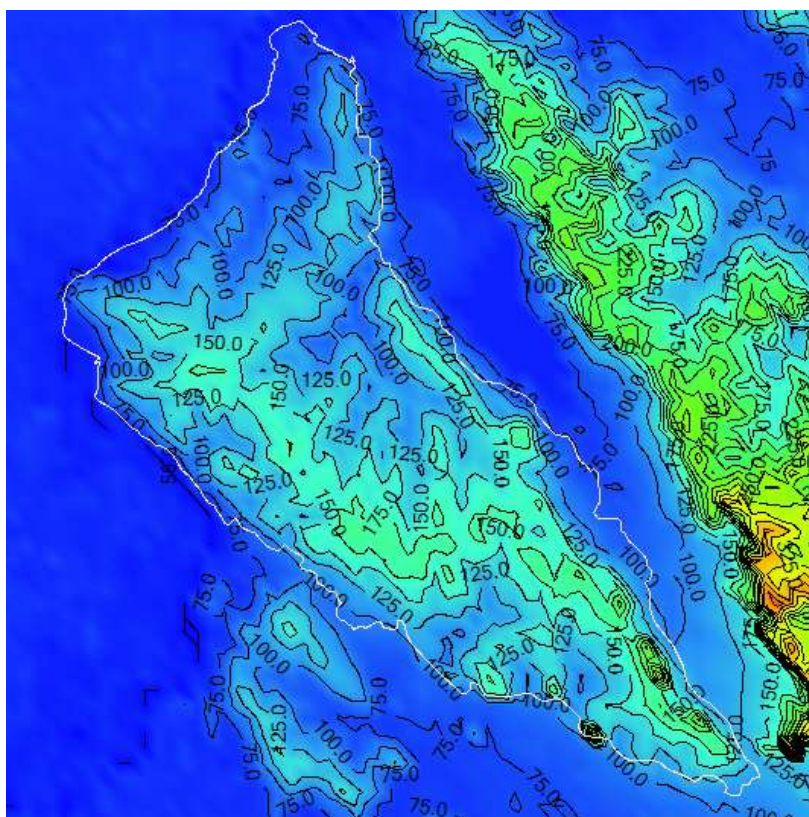


Figura nº03. Topografía asignada al dominio modelado. Fuente: elaboración propia

4.2 Generación de la malla de cálculo

La malla de cálculo se ha optimizado a 250x250 m con una inclinación de 32 grados. Las dimensiones de la malla son de 277 filas x 124 columnas, un total de 34.348 elementos por zona (ver Figura nº04).

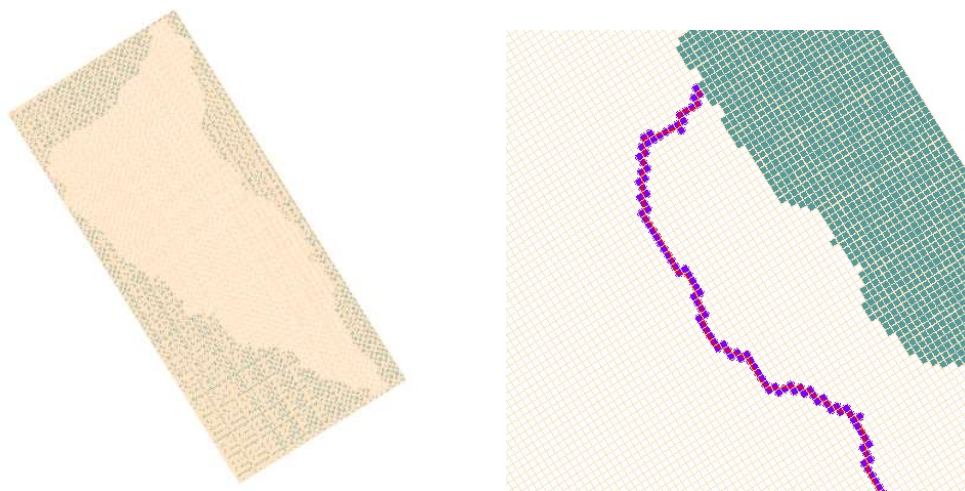


Figura nº04. Malla de diferencias finitas. A la izquierda malla completa, a la derecha detalle de la zona oriental. En rojo el cauce principal del Yukry y en azul los nodos de las celdas en los que se asigna el elemento.

Definición de la discretización temporal

Para la definición temporal de los cálculos que ha de realizar el modelo, se han considerado varios aspectos:

- Discretización temporal de las observaciones del nivel piezométrico.
- Discretización temporal de las extracciones.
- Necesidades futuras de control para la gestión del acuífero.

Se ha establecido que una discretización temporal mensual era suficiente a efectos de gestión y adecuada al conocimiento de la evolución de los niveles y las extracciones.

El período de cálculo es noviembre de 2006 a diciembre de 2016, en el que se dispone de datos de niveles piezométricos, datos de extracciones e información meteorológica para calcular la recarga.

4.3 Parámetros hidráulicos

4.3.1 Permeabilidad hidráulica

Durante el proceso de calibración se han considerado dos zonificaciones para el cálculo.

En el primer conjunto de cálculos se utilizó una parametrización por zonas. El cuadro de parámetros utilizados se puede consultar en Tabla nº1.

Grupo de cálculos	Zona	K (m/día)
1	1	1
	2	1
2	1	1
	2	0.4
3	1	0.4
	2	0.4

Tabla nº1. Conductividades hidráulicas constantes utilizadas en el modelo durante el proceso de calibración.

En el segundo conjunto de cálculos se utilizó una distribución de conductividades hidráulicas extraída de la recopilación realizada en el Diagnóstico (ver Figura nº05).

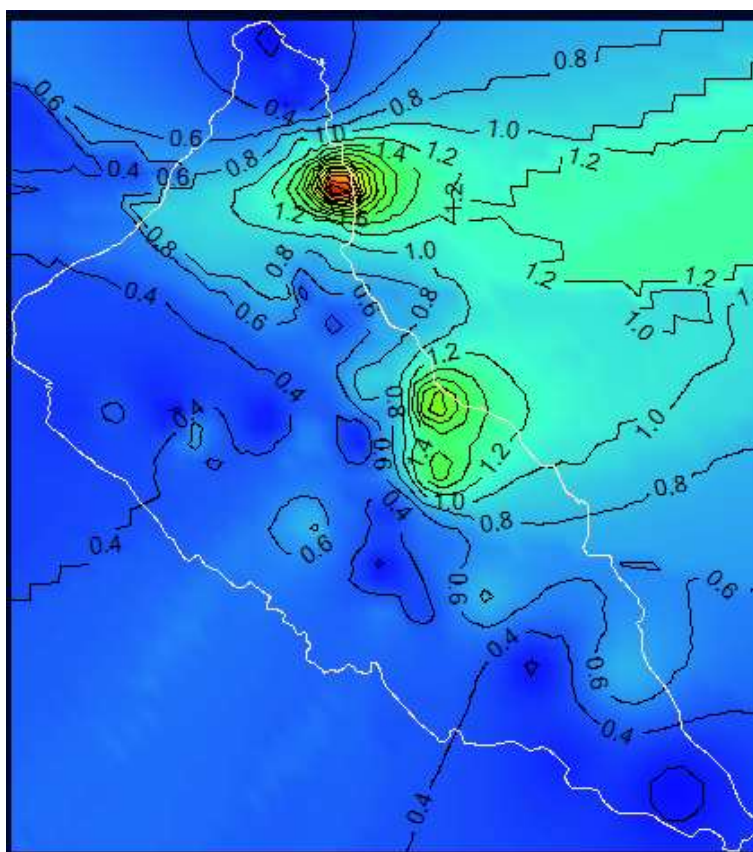


Figura nº05. Interpolación lineal de los valores de conductividad hidráulica disponibles en el acuífero Patiño.

4.3.2 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento se ha tratado como homogéneo por zonas. En la zona 1 se inició el proceso de calibración con un valor de 0.15, correspondiente a arenas en condiciones de acuífero libre. En la zona 2 se estableció un valor un orden inferior (0.01) para representar las condiciones de acuífero semi-cautivo al encontrarse bajo presión.

4.4 Condiciones de contorno

Se consideran dos tipos diferentes de condiciones de contorno. La conexión con el río Paraguay que configura el límite norte del acuífero y la red hídrica de drenaje conformada por el conjunto de arroyos y ríos de las cuencas internas del dominio modelado.

4.4.1 Río Paraguay

El río Paraguay se ha introducido en el modelo como una condición de contorno general. Esta condición se aplica para representar niveles que puedan estar influenciados por una gran masa de agua fuera del modelo de la que se conoce su elevación. Se debe aportar al modelo dicha elevación, la conductancia (la resistencia al flujo entre el contorno y el dominio del modelo, expresada en m/día), la distancia de la masa de agua al contorno y la cara de celda de la malla que intercambia agua con el contorno. A efectos de la calibración se ha separado el contorno del río Paraguay en sus sectores oeste (15.18 km), norte (27.6 km) y este (9.11 km) (ver Figura nº06)

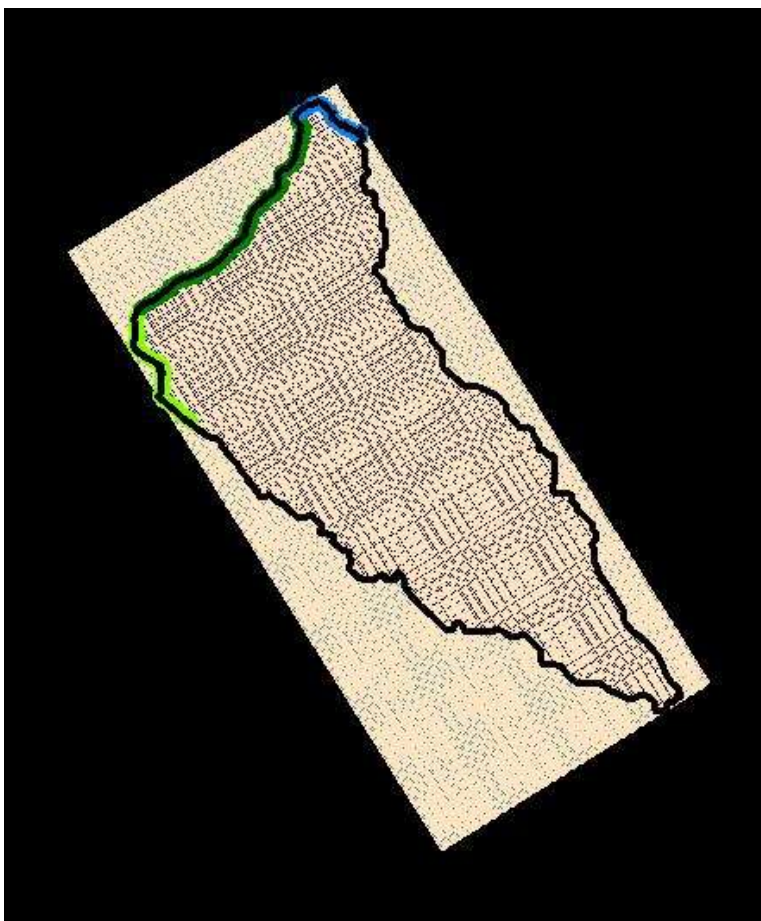


Figura nº06. Condiciones de contorno general en el límite norte. Contacto del Acuífero Patiño con los aluviales del río Paraguay.

4.4.2 Red hídrica

Asumiendo las elevadas precipitaciones en el dominio y las observaciones realizadas durante el diagnóstico, se asume que la red hídrica actúa como un sistema ganador respecto al acuífero. Es decir que lo drena, al situarse las cotas de los ríos por debajo de las cotas de los niveles freáticos y/o piezométricos de las aguas subterráneas circundantes. Se ha establecido esta característica a nivel general para todos los cursos fluviales, aunque no es descartable que puntualmente se den relaciones inversas en los que determinados tramos o arroyos pudieran actuar como perdedores (donantes de agua al acuífero).

A efectos de la modelación numérica, los ríos (ver Figura nº07) se han considerado como condiciones tipo dren. Este tipo de condición de contorno retira agua del acuífero con una tasa proporcional a la diferencia entre el nivel piezométrico en el acuífero y una presión o elevación prefijada. Se asume entonces que para las situaciones en las que esta elevación sea superior al nivel piezométrico en el acuífero, el dren no tendrá efecto. Esta condición de contorno nunca genera entradas netas al acuífero.

Para la definición de los ríos como drenes se han aportado al modelo las cotas topográficas de cada elemento y la conductancia, que expresa en m/día la resistencia al flujo entre el contorno y el dominio del modelo.

Para la optimización de los tiempos de cálculo se ha tenido que realizar una simplificación de los cursos fluviales que puede añadir un cierto error asociado a las cotas de drenaje.

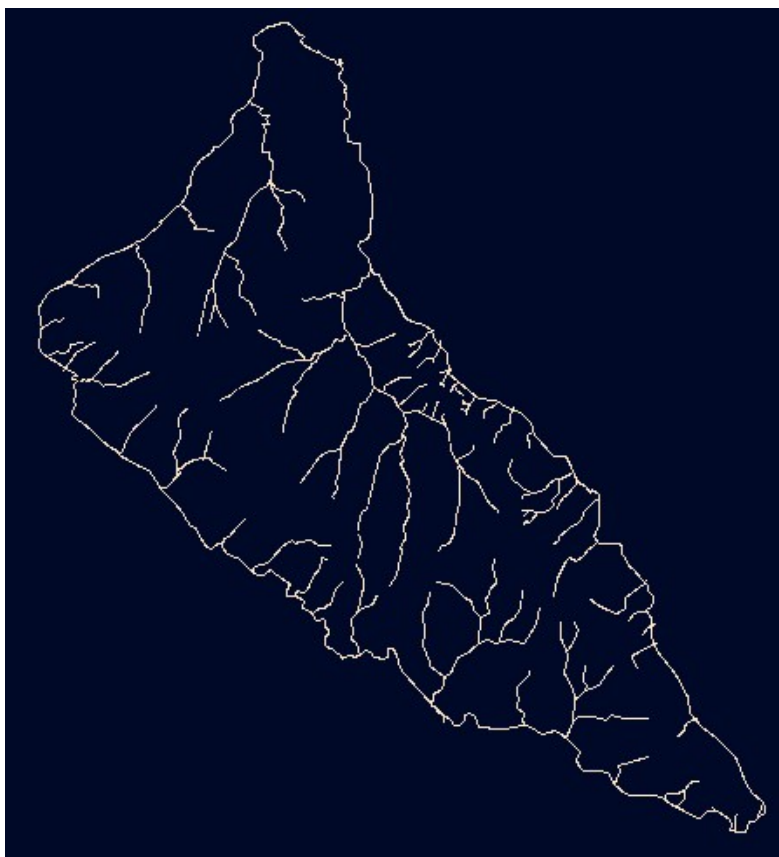


Figura nº07. Condiciones de tipo dren para representar la red fluvial en el dominio del modelo.

4.5 Recarga del acuífero

4.5.1 Infiltración directa de agua de lluvia

La determinación de la recarga en un acuífero es una de las principales y al mismo tiempo tareas que presentan una mayor dificultad, ya que es un parámetro muy variable que se produce a través de grandes superficies de terreno y que por tanto presenta variaciones importantes en relación a las coberturas del terreno, el uso del suelo, la geología, la geomorfología y los aspectos climáticos que se dan en una superficie determinada. Los componentes individuales de la recarga no pueden ser medidos directamente en campo y deben ser estimados de forma indirecta a través de métodos de balance de agua, donde se consideran mediciones de precipitación, temperatura, fluctuaciones piezométricas, aportaciones de agua en los cursos fluviales o contenido de humedad en el suelo o capacidad de infiltración, entre otras. (Kresic, 2007)

La estimación de la recarga lleva consigo aparejada una elevada incertidumbre en su definición, y se debe tener esto muy presente en el proceso de estimación y en la aplicación de este parámetro en los modelos de simulación. Una variación de un 15% o un 10% de la recarga puede tener una repercusión limitada en la fluctuación de los niveles piezométricos si se compara con otros parámetros, pero puede ser un parámetro clave o determinante si se está evaluando la explotación sostenible del acuífero.

Existen diversos métodos para estimar la recarga de los acuíferos, la elevada incertidumbre asociada a estos procesos lleva consigo la necesidad de utilizar diferentes métodos, en base a la información disponible y de esta forma poder aumentar en la medida de las posibilidades la fiabilidad del dato a utilizar.

En base a los datos existentes, se ha optado por determinar la recarga mediante la utilización de modelos de balance de agua en el suelo, que se ha ajustado y calibrado gracias a la utilización de la separación del hidrograma en la cuenca del arroyo Yukyry, y la calibración del modelo de simulación de flujo del acuífero.

En base a estos tres métodos se ha alcanzado una función de recarga continua en el tiempo desde el año 2000 a la actualidad que abarca el conjunto de la superficie del acuífero.

4.5.1.1 Separación del hidrograma del arroyo Yukyry

La separación del hidrograma de aportación para la determinación del flujo base se podría enmarcar según (Scanlon, Healy, & Cook, 2002) dentro de las técnicas de estimación a través de aguas superficiales.

Consiste en analizar el hidrograma en una estación de aforo y desagregarlo en la parte de escorrentía superficial y escorrentía subterránea o flujo base. Entendiendo este último como la descarga que realiza el acuífero sobre los cursos fluviales que lo drenan.

Existen diversos métodos para realizar la separación de los componentes del hidrograma, el primero de forma geométrica, entendiéndose que el punto C en la figura nº08 termina la escorrentía superficial y comienza la escorrentía subterránea o flujo base, este punto se proyecta hacia atrás y se intersecta con la proyección del punto donde se produce la máxima descarga (punto B), el punto A es aquel en el que se inicia la escorrentía superficial. La unión de estos tres puntos mediante líneas rectas, deja un área bajo esta que se considera el flujo base correspondiente a la aportación del acuífero.

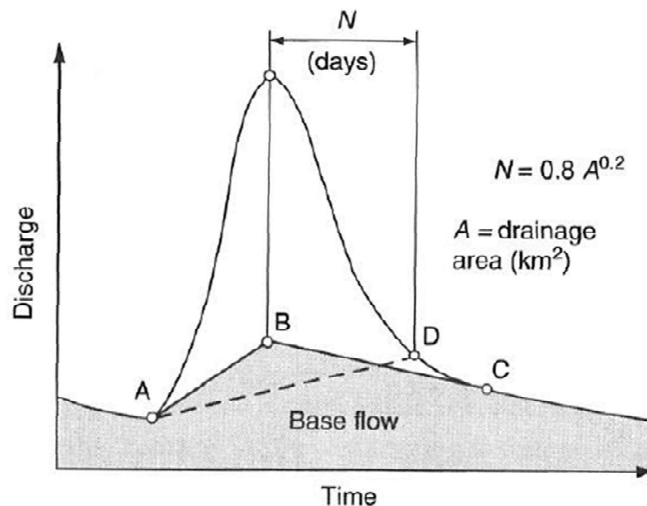


Figura nº08. Métodos de descomposición del hidrograma, métodos visuales y estimados en función del área de drenaje. Fuente: (Kresic, 2007)

El segundo método se basa en una relación empírica entre la superficie de la cuenca, donde se encuentra el punto D, considerado punto de inflexión donde termina la escorrentía superficial o tiempo en el que se produce la caída o decaimiento del hidrograma (t_f), en base a la siguiente fórmula (Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, 1982)

$$t_f = 0.8A^{0.2}$$

En base a esta sencilla fórmula se basa un gran número de programas destinadas a realizar la separación de los hidrograma, como es el caso de programa PART de la USGS, donde a partir del caudal diario registrado en una estación de aforo se realiza la desagregación del hidrograma considerando de forma iterativa las diferentes recesiones que se encuentran utilizando la expresión anterior. Una explicación detallada de este método se puede encontrar en (Rutledge, 1998).

En la cuenca del arroyo Yukyry se ha realizado la desagregación del hidrograma de caudales diarios registrados en la estación que se sitúa sobre el puente la calle Wenceslao Martínez que cruza el río Yukyry ver figura nº09.

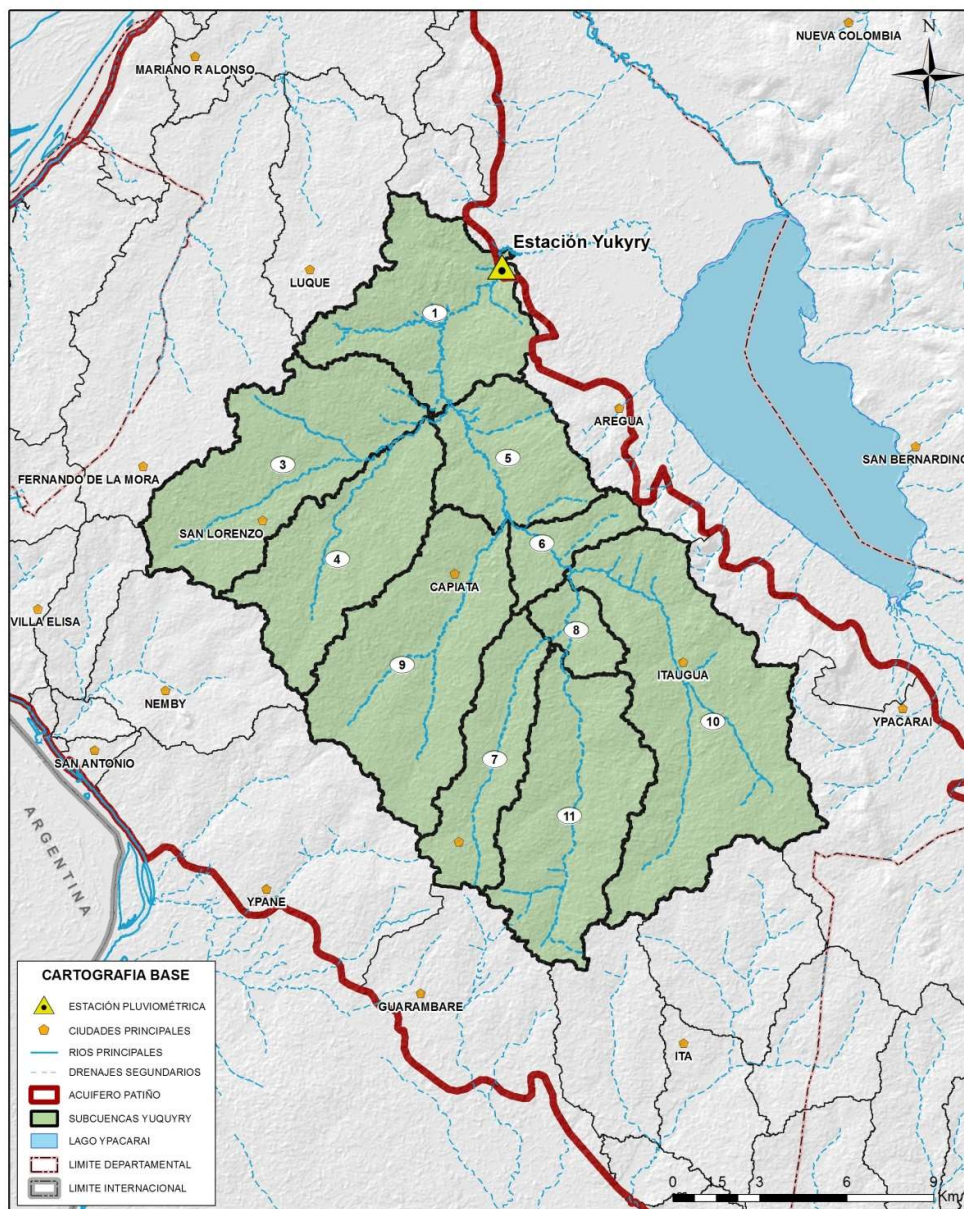


Figura nº09. Localización de la estación de aforo de la cuenca del río Yuckyry. Fuente: Elaboración propia.

Sobre esta estación se tienen datos entre el año 2005 y el año 2008 y desde 2015 hasta la actualidad. En la figura nº10 se puede consultar la disponibilidad de datos en el período considerado.

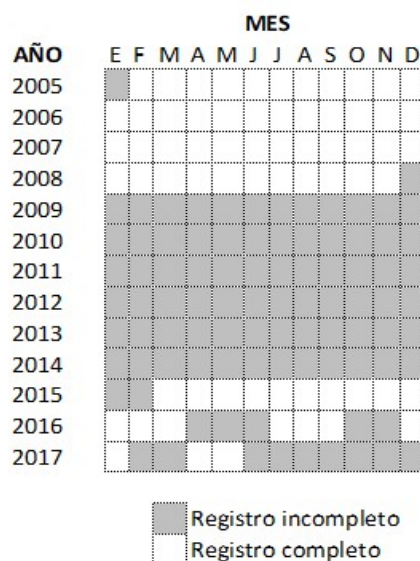


Figura nº10. Disponibilidad de datos de caudal circulante en la desembocadura del arroyo Yukyry.
Fuente: Elaboración propia.

La desagregación utilizada requiere que exista una continuidad en el dato diario, ya que busca recesiones de forma sucesiva desde un momento de arranque. Por tanto este trabajo únicamente se ha podido realizar en período comprendido entre febrero de 2005 y noviembre de 2008.

Es resultado obtenido mediante este proceso se puede observar en la figura nº11, donde se apreciar el flujo base en la serie de color rojo del gráfico.

Los valores obtenidos resultado de la aplicación de este proceso se pueden consultar en la tabla nº2, donde se muestra la distribución de la descarga por mes en milímetros y el resultado anual de dicha descarga.

El resultado muestra como la descarga es bastante constante durante el año, teniendo sus picos en los meses de mayo y junio coincidiendo con los picos de caudal registrado.

En el período se registra una media de descarga **anual de 140 mm**, resultando un **10,1%** de la precipitación en el período comprendido entre el año 2005 y 2008.

Hay que tener en consideración que este valor está altamente **subestimado** ya que el valor de descarga está íntimamente relacionado con las extracciones de agua que desde el acuífero se producen en el conjunto de la cuenca.

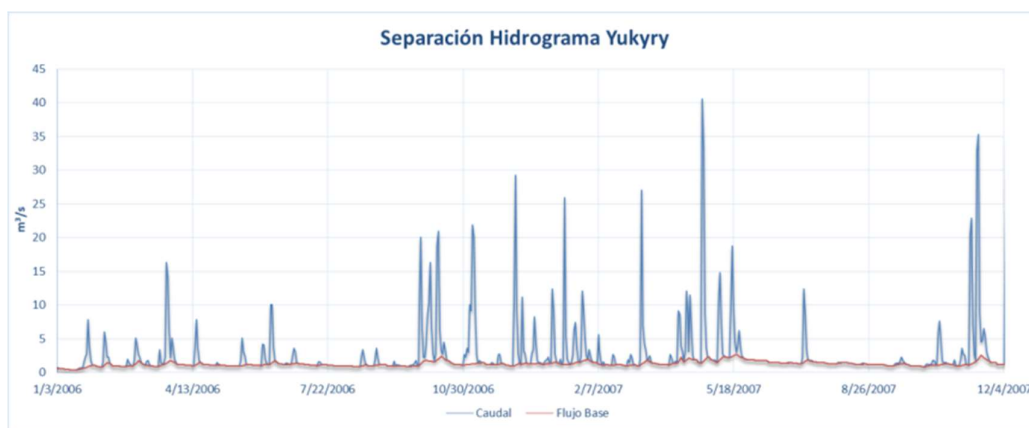


Figura nº11. Resultado de la aplicación de la separación del hidrograma en el arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
2005	-	6,10	5,59	9,40	18,54	15,49	10,16	8,89	10,16	13,72	9,91	7,87	-
2006	5,84	8,38	11,94	10,16	9,65	11,43	10,16	9,14	8,89	16,00	11,18	11,18	123,95
2007	13,21	9,91	11,43	15,75	19,56	13,72	13,46	11,68	9,91	9,91	13,97	14,22	156,72
2008	13,72	12,19	11,94	14,99	15,49	14,22	13,72	13,72	10,67	10,67	9,65	-	-

Tabla nº2. Descarga en mm por mes del acuífero sobre el arroyo Yukyry resultado de la desagregación del hidrograma

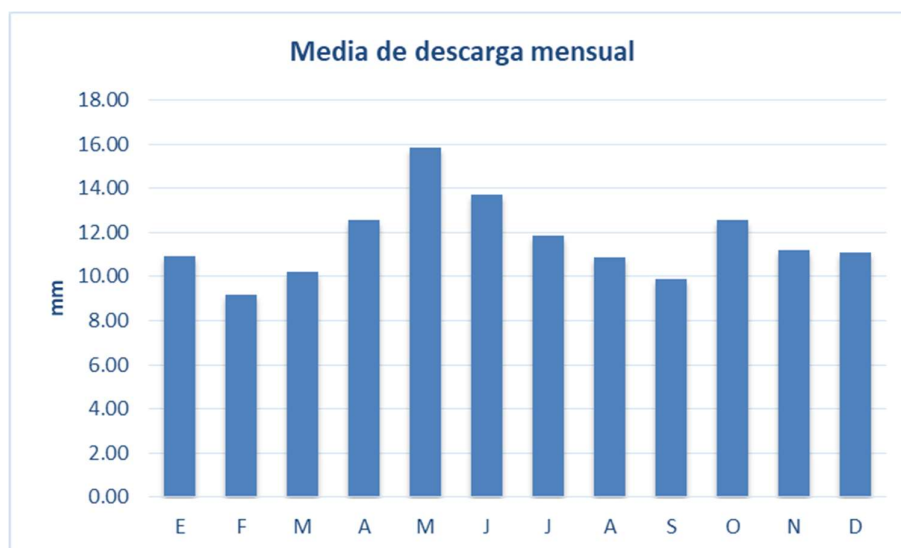


Figura nº12. Media de la descarga mensual en mm de la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1.2 Estimación de la recarga a partir de la aplicación de modelos (SWAT)

Existen un gran número de modelos matemáticos que simulan el movimiento del agua en el suelo, y la infiltración que se produce a través de los diferentes horizontes que se producen en el suelo.

Entre los modelos existentes se pueden distinguir entre los modelos que utilizan relaciones empíricas, modelos que utilizan la ecuación de infiltración de Green-Ampt y por último aquellos que recurren a la fórmula de Richards (Kresic, 2007).

La estimación de la recarga se ha realizado utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), liderado por el Texas Water Resources Institute de la Universidad de Texas.

El modelo que se inicia a principio de los años 90, y ha ido incorporando un conjunto de modificaciones que lo lleva a ser unos de los modelos hidrológicos más utilizados a nivel mundial.

La Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una Cuenca hidrográfica (SWAT); fue desarrollada por Dr. Jeff Arnold para el USDA el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). Esta fue ideada para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado.

SWAT es un modelo a escala de cuenca, operando de manera continua en el tiempo a intervalos diarios, diseñado para predecir en cuencas sin mediciones, el impacto que tienen las actividades de manejo en la producción de agua, sedimentos y químicos de la agricultura. El modelo se fundamenta en procesos físicos; es computacionalmente eficiente con capacidad para realizar simulaciones sobre largos períodos de tiempo. Entre los principales componentes se incluye clima, hidrología, propiedades y temperatura del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, biocidas, bacterias- patógenos y manejo de la tierra.

En el modelo SWAT, la cuenca se divide en subcuencas y éstas, a su vez, se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRUs), las cuales son unidades homogéneas en uso y manejo de la tierra y en las características del suelo. Las HRUs representan porcentajes del área de una subcuenca y no tienen identificación espacial dentro de una simulación SWAT. Alternativamente, una cuenca puede dividirse solamente en subcuencas caracterizadas por el tipo de suelo y por el uso y manejo de la tierra dominantes. Infiltración asociada a las pérdidas de las redes de abastecimiento y saneamiento (Zhou, Huang, Pontius, & Hong, 2016)

SWAT requiere datos climáticos diarios de entrada, incluyendo precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, los cuales pueden ser registros medidos o generados por el mismo modelo; si tiene que generarlos, los calcula de una tabla que contiene 13 variables climáticas mensuales introducidas por el usuario, estimadas a partir de mediciones de largo plazo de los registros climáticos. SWAT realiza un balance hidrológico general para cada HRU, en el cual la precipitación, más riego y deshielo, se divide en escorrentía superficial e infiltración, redistribución del agua en el perfil del suelo, evapotranspiración, flujo subsuperficial lateral proveniente del perfil del suelo y flujo de retorno desde los acuíferos superficiales. La recarga debajo del perfil del suelo se distribuye entre los acuíferos superficial y profundo. Desde el primero, además del flujo de retorno, también puede ocurrir evapotranspiración por plantas con raíces profundas (término llamado 'revap'); el agua que va al acuífero profundo, se asume que sale del sistema (Zhou et al., 2016).

Los parámetros más significativos que intervienen en el modelo numérico del programa de simulación, son enumerados a continuación:

- ✓ **CN2** es el valor inicial del número de curva para la condición de humedad II que se utiliza para calcular la escorrentía superficial en el método creado por el Servicio de Conservación de Suelos. Está incluido en la base de datos del modelo hidrológico.

- ✓ **SOL_AWC** es la capacidad de cada capa de suelo para almacenar agua. Aparece en la ecuación de la capacidad de campo.

$$AWC = FC - WP$$

Donde FC es la capacidad de campo y WP es el punto de marchitamiento.

- ✓ **SOL_K** es la conductividad hidráulica saturada del suelo. En principio es un valor específico según la tipología de suelo.

- ✓ **ALPHA_BF** es el factor alfa del agua subterránea. Es un índice directo de la respuesta del caudal subterráneo a la recarga. La mejor forma de determinarlo es analizando periodos en los que no hay recarga en la cuenca. Se utiliza para modificar la cola del hidrograma.

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,D}} \right] = \frac{1}{BFD} \cdot \ln[10] = \frac{2.3}{BFD}$$

Donde α_{gw} es la constante de recesión del caudal base y BFD es el número de días de caudal base de la cuenca.

- ✓ **GWQMIN** es el nivel del umbral freático necesario para que el agua subterránea contribuya al cauce principal. El caudal base entra a la corriente si la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede el valor umbral especificado. El sistema de agua subterránea se encuentra muy localizado lo que da a lugar a que el flujo subterráneo horizontal sea muy limitado, como así también su aporte al flujo regional.

- ✓ **SURLAG** es el coeficiente de retardo del escurrimiento superficial que controla la fracción de lluvia neta que llegará al cauce en 24 horas. En grandes cuencas con tiempo de concentración mayor a un día, solamente una porción de la escorrentía llega al canal principal en el día que es generada. Al disminuir este coeficiente, más agua se retiene en almacenamiento, reduciendo de este modo la magnitud de los picos de escorrentía a valores próximos a los observados.

- ✓ **GWREVAP** es el coeficiente de revaporización del agua subterránea. Si el valor se aproxima a cero, el movimiento del agua del acuífero superficial a la zona de raíz es restringida; si se aproxima a uno, la tasa de transferencia del acuífero superficial a la zona de raíz se aproxima al rango de evapotranspiración potencial. El rango de variación que permite SWAT es [0.02 y 0.20].

- ✓ **GW_DELAY** es el retardo del flujo subterráneo (en días).

- ✓ **CNCOEF** es un coeficiente de ponderación utilizado para calcular el coeficiente de retención cuando el número de curva diario depende de la evapotranspiración de las plantas. Al disminuir el coeficiente se obtiene mayor retención de agua en la cuenca, esto es compatible con las características de regiones de baja pendiente natural.
- ✓ **ICN** es el Método de Cálculo del Número de Curva diario. El número de curva se utiliza para calcular la escorrentía superficial en el método creado por el Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service, 1972). Es una función de la permeabilidad del suelo, uso de la tierra y condiciones antecedentes de agua en el suelo. Se definen tres condiciones de humedad antecedente: I- seco, II- humedad promedio, y III – húmedo. Para ICN fue seleccionado el método en función de la evapotranspiración de las plantas, ya que lo hace menos dependiente del almacenaje de agua en el suelo y más dependiente del clima antecedente. En áreas de llanura se obtiene demasiada escorrentía al utilizar el método que contempla la humedad del suelo solamente.
- ✓ **ESCO** es el factor de compensación de la evaporación del suelo. El rango de este parámetro va de 0 a 1. Si el valor es próximo a 0 se produce mayor evaporación.

$$E_{soil,y} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot ESCO$$

Donde E_{soil} es la demanda evaporada para una capa en específico (ly), para la capa inferior (zl) y la capa superior (zu).

- ✓ **SLSUBSN** es la longitud del pendiente (en metros).
- ✓ **EPCO** es el factor de compensación de la evapotranspiración del suelo.
- ✓ **CH_K2** es la conductividad del cauce. Principalmente es parámetro se utiliza para modificar la distribución temporal del flujo, es decir, de la forma del hidrograma.

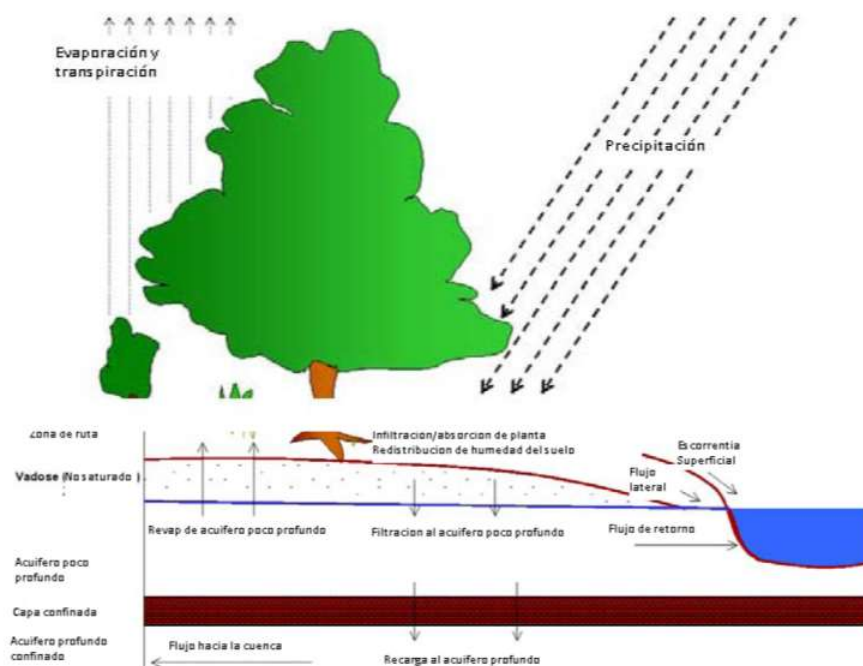


Figura nº13. Representación del movimiento de agua en el modelo SWAT. Fuente: Manual del usuario SWAT, 2010.

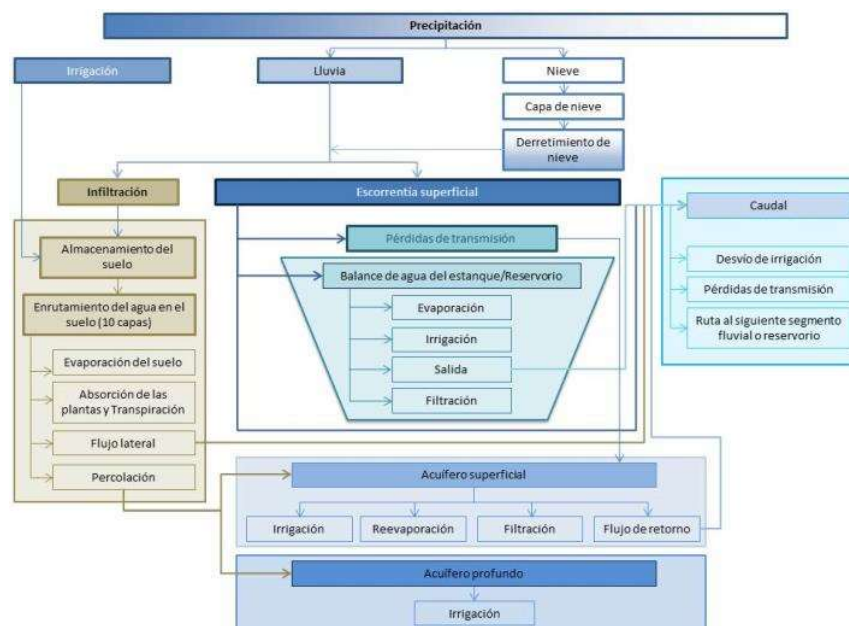


Figura nº14. Esquema de la circulación del agua en el modelo SWAT. Fuente: Manual del usuario SWAT, 2010.

Las bases teóricas donde se explican las diferentes ecuaciones que gobiernan la circulación del agua por los diferentes depósitos existentes se pueden consultar en la documentación teórica (Zhou et al., 2016).

4.5.1.3 El modelo SWAT de la cuenca del arroyo Yukyry

La estimación de la recarga en base a la modelación matemática aplicando el modelo SWAT se ha realizado para el conjunto de cuencas que drenan el acuífero Patiño. La calibración del modelo únicamente se ha podido realizar en la cuenca del arroyo Yukyry, la única cuenca que tiene un registro de caudal en continuo en la desembocadura de la cuenca. El registro es muy escaso tal y como se puede observar en la figura nº10, donde se dispone de 6 años con datos de forma discontinua. En el resto de cuencas no se dispone de estos datos y por tanto se han construido los modelos extrapolando los parámetros obtenidos en la cuenca del Yukyry, considerando las características propias de cada una de las cuencas.

Para poder construir el modelo es necesario introducir los datos climáticos de la cuenca estos datos se generan a partir de la información diaria de temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, que fueron analizados e incorporados en base de datos durante la fase de Diagnóstico.

Además de estos datos, se incorporan los usos del suelo, tipo de suelo y pendiente, datos que han sido recogidos durante la fase de Diagnóstico anteriormente citada (ver figura nº15 y figura nº16).

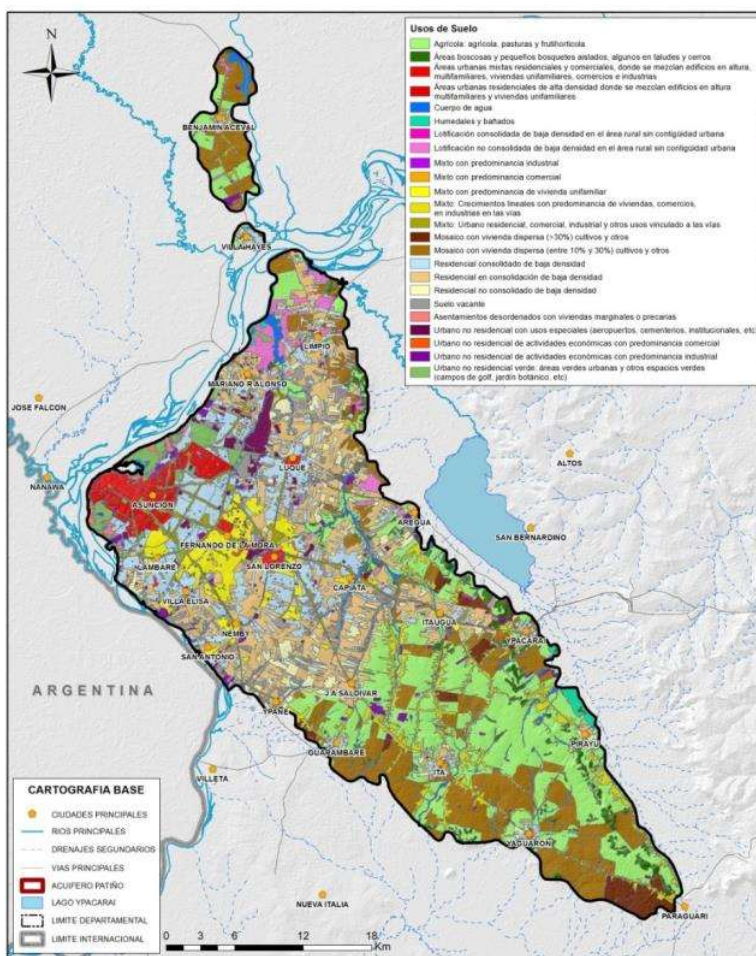


Figura nº15. Usos del suelo. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA) (MOPC, 2014) y actualizado con ortofotos actuales. Fuente: Elaboración propia.

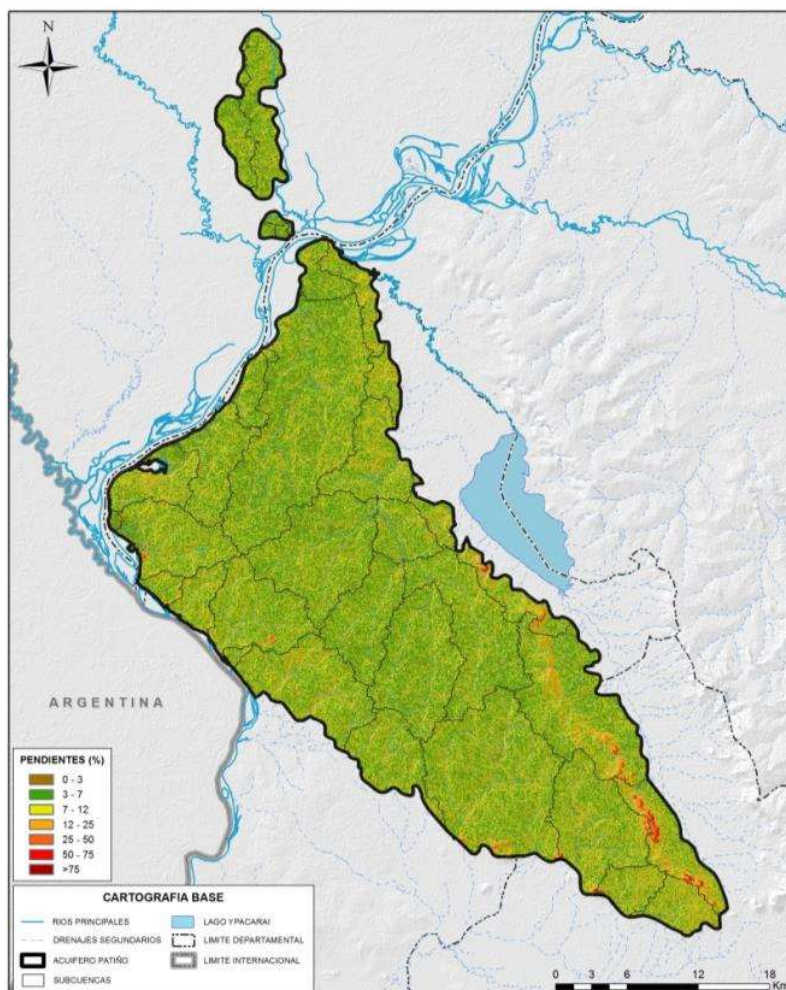


Figura nº16. Mapa de pendientes de las subcuencas del Acuífero Patiño. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los pasos más importantes en la generación del modelo es su construcción geométrica, basada en subcuencas, las cuales aíslan zona del territorio determinadas donde se obtienen resultados de aportación de caudal.

En el caso del río Yukyry se ha realizado una discretización de la cuenca donde se han generado un conjunto de 11 subcuencas distribuidas tal y como se muestra en la figura nº17.

En base a estos datos se ha calculado el balance diario utilizando el método del **Número de Curva (CN)** para la determinación de la escorrentía superficial, y la formulación propuesta por **Heargreaves** para la determinación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) siendo estos los métodos más importantes a destacar en la modelación matemática del balance de agua en el suelo.

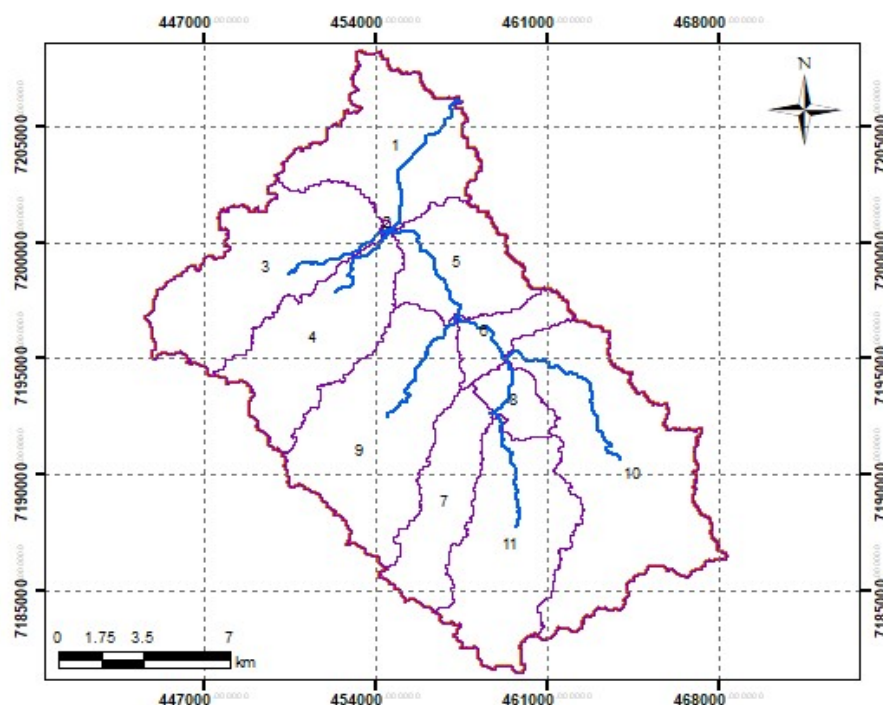


Figura nº17. Distribución de subcuencas en la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1.3.1 Calibración del modelo de aguas superficiales

Una vez se ha ejecutado el modelo de la cuenca del arroyo Yukyry se procede a su calibración, modificando los parámetros de las ecuaciones que gobiernan la transferencia de agua en el suelo, esta modificación se realiza con el objetivo de alcanzar el mejor ajuste posible entre los datos medidos en la estación de aforo del arroyo Yukyry y los datos simulados resultantes de la ejecución del modelo.

Existen un conjunto de parámetros que producen una mayor variación a los resultados del modelo, y por tanto que el modelo es más sensible a su variación, después de un análisis de sensibilidad, los parámetros que ofrecen una mayor sensibilidad al modelo son los siguientes:

Parámetro modificado	Significado	Grado de sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
CN2	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Esc. superficial, Esc. Subsuperficial, flujo temporal
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo	Alto	Escurrimiento superficial
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Alto	Escurrimiento superficial
GW_REVAP	Coeficiente del "revap" del agua subterránea	Medio	Flujo base
GWQMN	Profundidad umbral del agua en el acuífero somero		
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	Alto	Esc. Superficial, Flujo lateral
ALPHA_BF	Factor alfa del flujo base	Bajo	Flujo base
EPCO	Factor de compensación de la evapotranspiración del suelo	Bajo	Evapotranspiración

Tabla nº3. Resumen del grado de sensibilidad de los principales parámetros del modelo SWAT

El resultado inicial que aporta el modelo, sin calibrar, y el que se muestra una vez calibrado se puede observar en la figura nº18

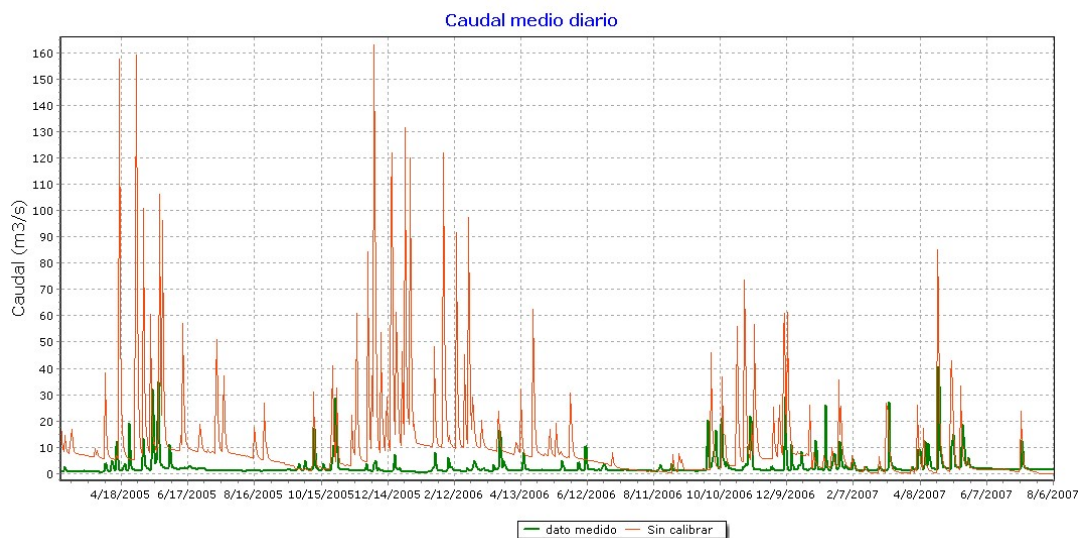


Figura nº18. Representación de los resultados del modelo sin calibrar. Fuente: Elaboración propia.

Para mejorar el proceso de calibración se ha aumentado la infiltración, bajando el parámetro de Numero de Curva, con la intención de bajar las puntas, aún y así existe un elevado volumen de agua en el sistema, y por tanto se ha aumentado al Evapotranspiración Real aumentando el parámetro SOL_AWC y el parámetro ESCO, este ha sido una cuestión clave, ya que se ha tenido que extremar los parámetros de ETP y ETR para poder reproducir la realidad observada. Por último se han ajustado los parámetros de descarga del acuífero para poder reproducir de la forma más fidedigna posible el caudal de descarga obtenido en el capítulo 4.5.1.1.

El resultado obtenido después de realizar los ajustes de los parámetros antes descritos es el que se muestra en la figura nº19, donde se aprecia de forma visual un buen ajuste para los caudales bajos y una inadecuada representación de los caudales altos. Por tanto desde un punto de vista de la calibración, esta se debería definir por insatisfactoria.

Después de realizar un análisis exhaustivo de los datos, todo parece indicar que la estación de aforo no está recogiendo bien los caudales altos, tal y como se muestra en la figura nº20 donde para muy diferentes precipitaciones que pueden oscilar entre 40 y 140 mm en un día se registran caudales muy similares. Como es el caso de diciembre de 2006, donde para una precipitación cercana a los 100 mm se registraron 29 m³/s y en enero de 2007 para una precipitación de unos 20 mm se registraron 26 m³/s.

Dada esta circunstancia se ha optado por realizar la calibración del modelo para los caudales bajos (Inferior a 50 m³/s) considerando además que son los que intervienen de forma más importante en la determinación de la recarga, dado que están influenciados por la descarga del acuífero.

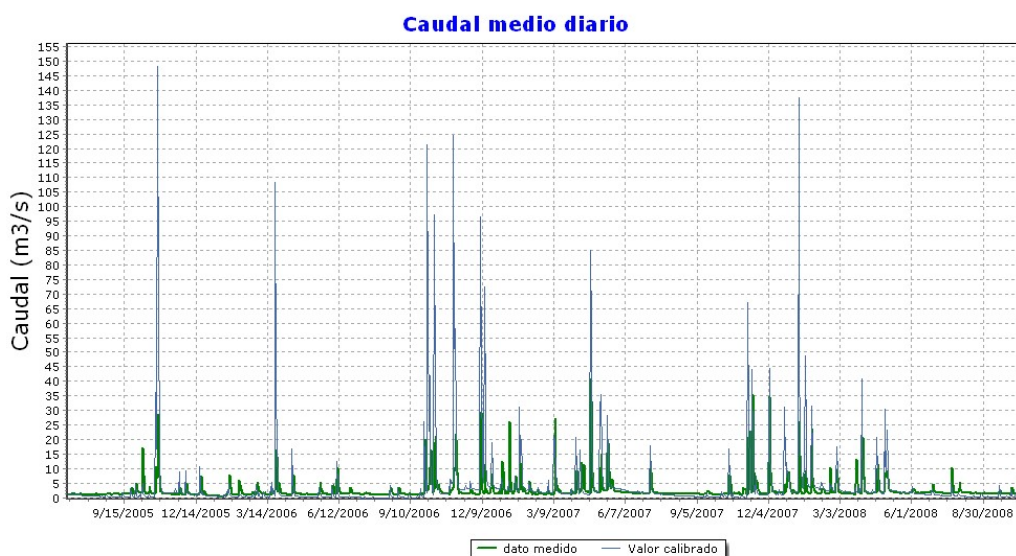


Figura nº19. Representación de los resultados del modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.

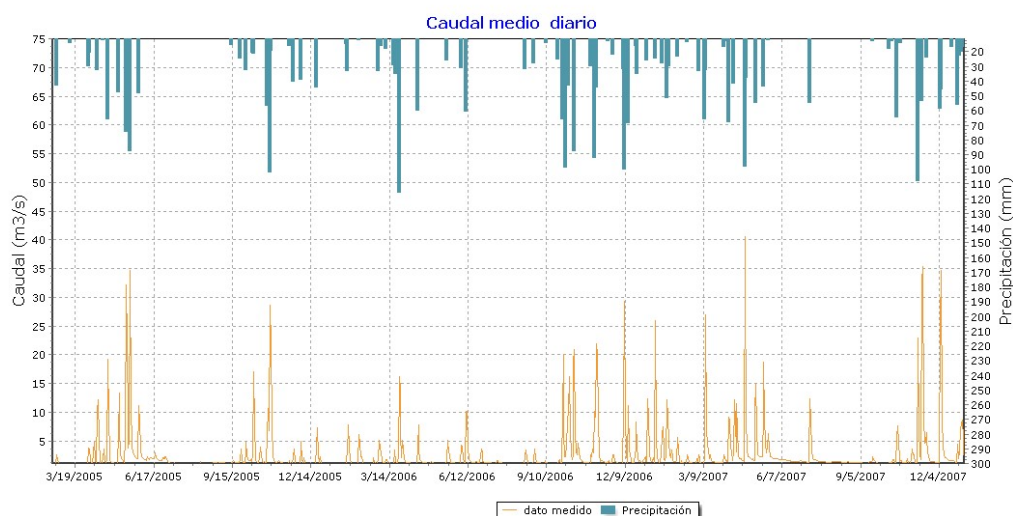


Figura nº20. Comparación entre los datos registrados en la estación de Aforo del arroyo Yukyry y la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

Realizando nuevamente el ajuste a nivel mensual, pero esta vez sin considerar los caudales altos, se puede observar en la figura como existen un buen ajuste.

Se ha analizado desde un punto estadístico el ajuste obtenido calculando la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) (D. N. Moriasi et al., 2007a) mediante las fórmulas que se muestran a continuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

El resultado obtenido para el índice NSE es de 0,54 y para el PBIAS -2,52, valores que según (D. N. Moriasi et al., 2007b), se podría considerar un ajuste entre adecuado y bueno.

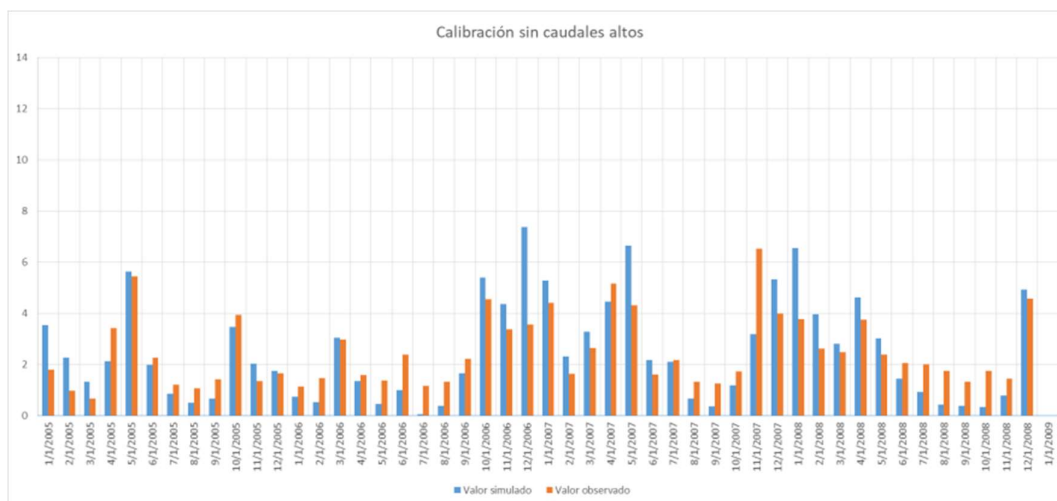


Figura nº21. Representación de los datos registrados y los simulados a nivel mensual sin considerar los caudales altos. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1.3.2 Resultados obtenidos

Una vez aplicada la calibración del modelo se obtiene el resultado de cada uno de los parámetros que interviene en el ciclo hidrológico de la cuenca. El balance multianual resultado de la aplicación del modelo en la cuenca del Yukyry se puede observar en la figura nº22.

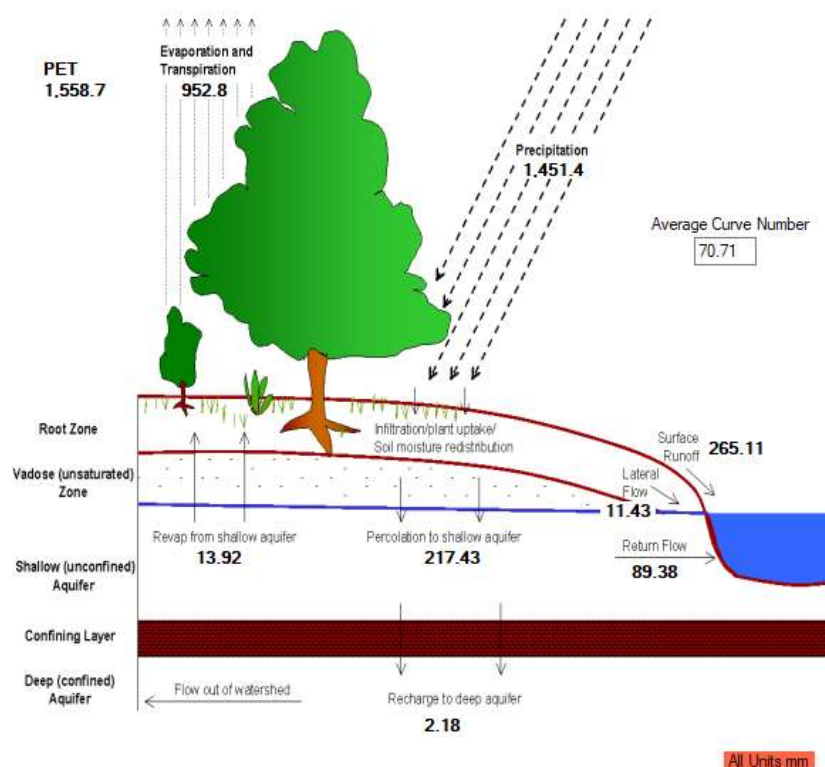


Figura nº22. Balance multianual de la cuenca del arroyo Yukyry resultado en mm. Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de este modelo ofrece una función de recarga a nivel diario y mensual que sirve como entrada (Input) del modelo Modflow. El resultado de la recarga en la cuenca del río Yukyry se muestra en la tabla

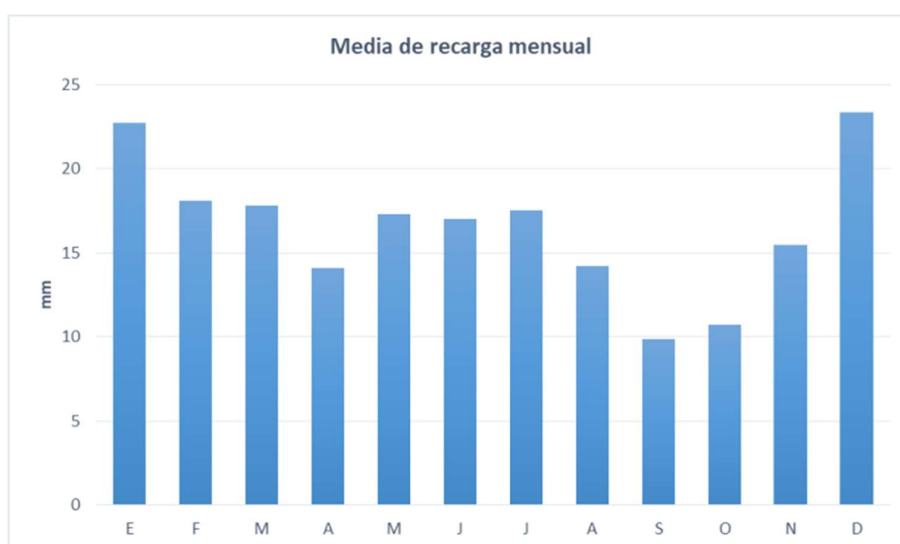


Figura nº23. Distribución mensual de la recarga en la cuenca del arroyo Yukyry. Fuente: Elaboración propia.

La media anual de la recarga en el periodo de cálculo son **198,4 mm** que representa un **14 %** de la precipitación media anual en el período.

Comparado con el resultado obtenido de la desagregación del hidrograma (apartado 4.5.1.1) donde el porcentaje de descarga se situaba en 140 mm y 10 % de la precipitación, se puede considerar que el resultado obtenido del modelo SWAT está dentro de lo esperado, considerando la corta serie desagregada y la no consideración de las extracciones.

El resultado obtenido por subcuencas se puede observar en la tabla nº4, cabe tener presente que este valor solo debe interpretarse de forma orientativa ya que no se dispone de puntos de calibración intermedios que permitirían realizar una mejor estimación.

Subcuenca Yukyry	Recarga anual en mm
1	159.4
2	136.7
3	191.4
4	191.5
5	159.4
6	190.4
7	191.0
8	190.5
9	191.0
10	290.5
11	290.3

Tabla nº4. Recarga por subcuencas en la cuenca del arroyo Yukyry

Por último en base a los parámetros de calibración obtenidos de la cuenca del Yukyry y de la experiencia obtenida en la modelación realizada, se ha realizado una estimación de la recarga para el conjunto de las cuencas del acuífero Patiño. Para aquellas cuencas más pequeñas que drenan hacia los bordes del acuífero se ha hecho una interpolación en base a los resultados de las cuencas colindantes.

De esta manera se obtiene el resultado que se muestra en la figura nº24 a nivel multianual, la serie mensual obtenida se ha utilizado como función de recarga para la construcción del modelo ModFlow.

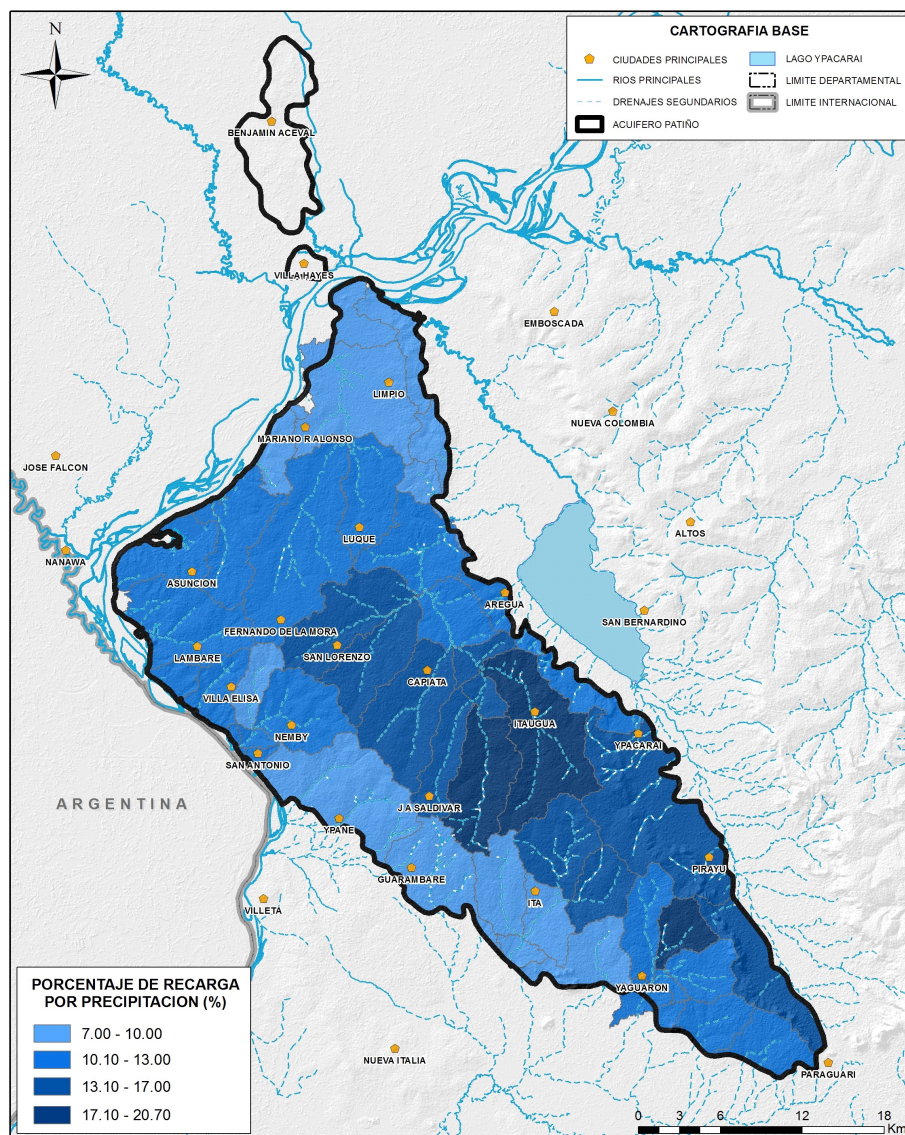


Figura nº24. Distribución espacial de la recarga para las diferentes cuencas que drenan el acuífero Patiño, expresada como % de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Infiltración asociada a las pérdidas de las redes de abastecimiento y saneamiento

El establecimiento de áreas urbanas genera sobre el medio hidrogeológico alteraciones locales que deben considerarse como pequeñas variaciones a la recarga debido a pérdidas de la red de suministro, de drenaje pluvial y/o cloacal que establecen una dinámica de escurrimiento subterráneo distinta a la del entorno regional.

Para realizar el cálculo de este tipo de infiltraciones se ha consultado en el catastro de ESSAP los planos de alcantarillado y red de agua potable de la ciudad de Asunción y su área metropolitana que fueron actualizados en 2015. De esta manera se obtiene el área “afectada” por este tipo de infiltraciones.

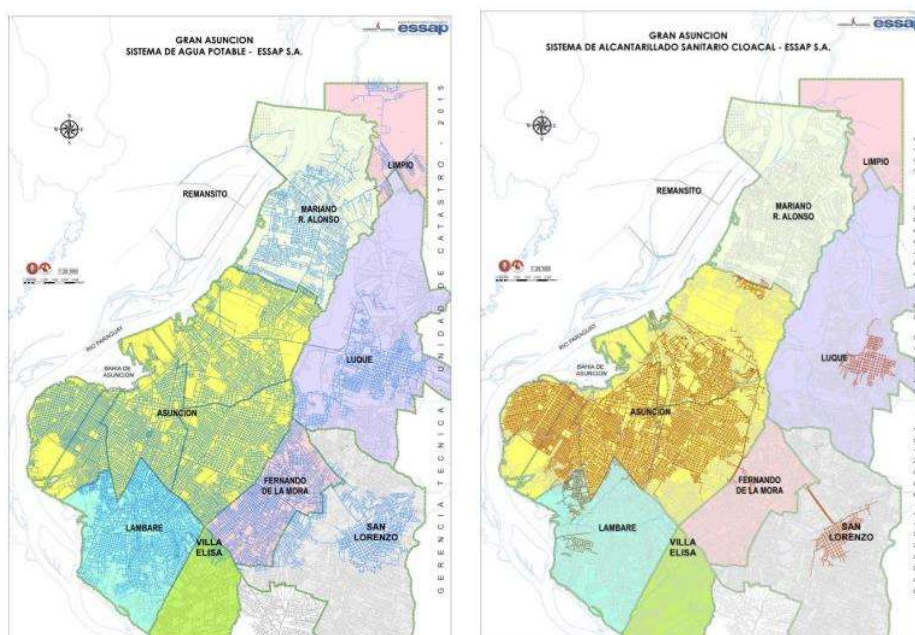


Figura nº25. Planos de red de agua potable y red de alcantarillado del Gran Asunción. Fuente. Catastro ESSAP

Para poder introducir los datos de recarga por infiltración al modelo es necesario calcularlos a nivel de subcuenca definida en el modelo. Sin embargo, el cálculo de pérdida por abastecimiento y red de saneamiento se realiza a partir de datos de población, es decir a nivel de municipio (de los cuales se dispone de datos oficiales de población), para luego extrapolarlo a las subcuencas definidas.

Los cálculos realizados se detallan en los siguientes apartados.

4.5.2.1 Pérdidas de la red de abastecimiento

La recarga asociada a las pérdidas de la red de abastecimiento se considera únicamente sobre aquella área cubierta por la red de ESSAP ya que gran parte del recurso es agua “importada”, es decir, procede de una fuente de agua superficial y no del propio acuífero. El primer paso es definir esta área, lo que se realizó a partir de la digitalización del plano facilitado por Catastro de ESSAP.

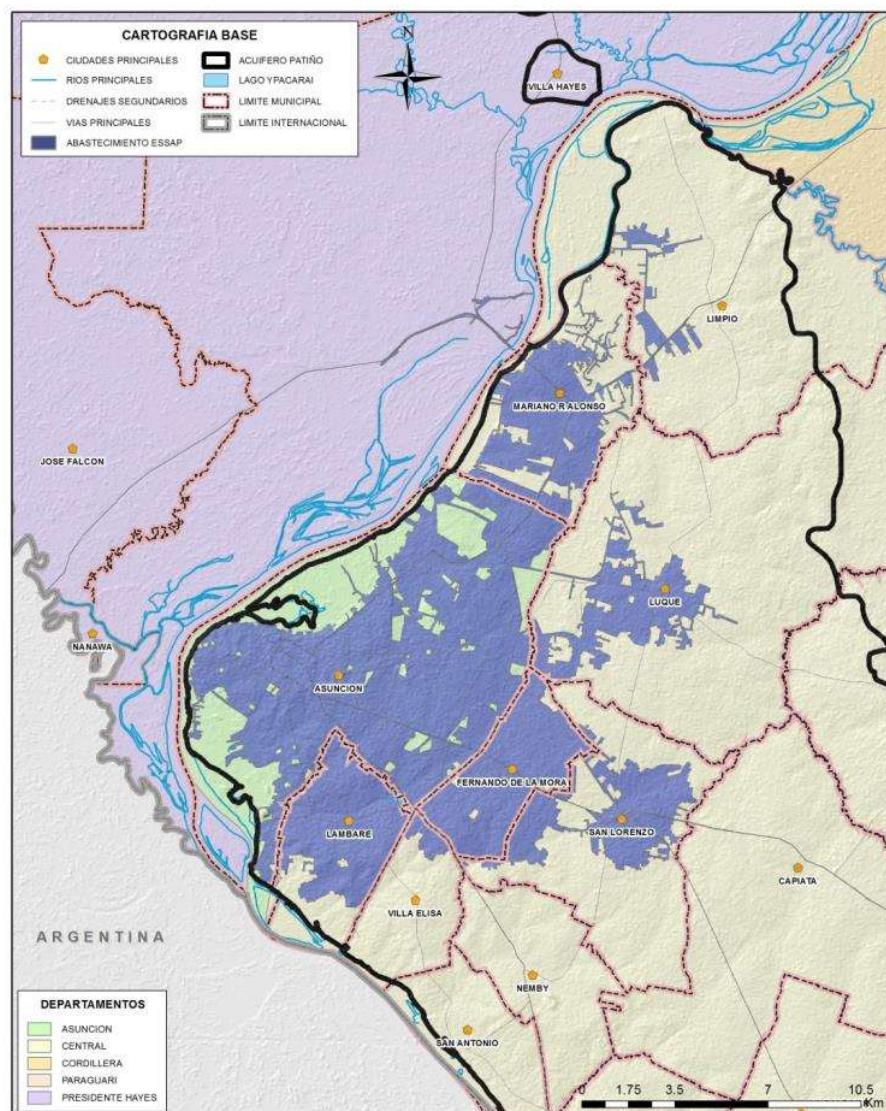


Figura nº26. Área cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP

El volumen de agua infiltrado por pérdidas en la red se calcula a partir del volumen servido que se calcula a partir de la dotación. Por ello, el área se dividió en función de los municipios, de esta manera se puede calcular la población servida en estas áreas ya que a nivel de municipio se dispone de datos oficiales de población suministrados por el Anuario estadístico de la DGEEC (DGEEC, 2017).

Como se observa en la figura, son 8 municipios los que están servidos por ESSAP: Asunción, Lambaré, San Lorenzo, Luque, Fernando de la Mora, Mariano Roque Alonso en casi su totalidad y una zona muy pequeña de Limpio y Villa Elisa. En el resto del área del Acuífero Patiño este tipo de recarga no se considera ya que el agua para uso poblacional de los demás prestadores procede de pozos locales que extraen agua del propio acuífero.

Analizando las áreas cubiertas por la red de abastecimiento de ESSAP y comparando por el área total del municipio se obtiene el porcentaje de municipio que cuenta con red de abastecimiento, es decir, el área “afectada” por la recarga asociada a las pérdidas de la red de abastecimiento, estimando que son importadas del río Paraguay.

DISTRITO	Área total (km ²)	Área cubierta por red de abastecimiento (km ²)	Porcentaje cobertura (%)
Asunción	113,44	83,69	73,8
Fernando de la Mora	20,77	20,14	96,9
Lambaré	23,91	19,22	80,4
Luque	152,84	14,49	9,5
Mariano Roque Alonso	37,29	20,75	55,6
San Lorenzo	56,68	15,71	27,7
Limpio	90,57	3,39	3,7
Villa Elisa	17,79	1,65	9,3

Figura nº27. Área cubierta por la red de abastecimiento para cada municipio

Una vez identificadas las áreas de recarga se procede al cálculo del volumen de agua que se infiltraría al acuífero debido a las pérdidas de la red. Para ello se realiza el cálculo de la demanda a partir de la dotación estimada y de la población servida por dicha red, y a esta demanda se le aplica un rendimiento. En resumen, el volumen total de infiltración vendría dado por la fórmula:

$$\text{Dotación (l/hab.día)} * \text{Pobl.servida (hab)} * \text{rendimiento}$$

Por una parte, para el cálculo de la dotación de agua potable por habitante y día se han utilizado los datos del año 2012. Según los datos del Anuario Estadístico del año 2014 de la DGEEC, para ese año, la producción de agua potable por parte de la empresa ESSAP supuso un volumen anual de 130.587.569 m³ tan solo en el área del Gran Asunción. Ese volumen, según datos indicados en el mismo Anuario sirvió para dar abastecimiento a una población estimada de 1.237.405 habitantes. Dividiendo el volumen de agua potable producido por los habitantes totales se obtienen una dotación **de 289,1 l/hab.día**.

Por otra parte, los datos de población utilizados proceden de las proyecciones de población estimadas en el Anuario estadístico del Paraguay 2015 (DGEEC, 2017). Hay que considerar que la población servida estimada para cada municipio no corresponde necesariamente con el área cubierta por el servicio, por ejemplo, en el caso de Luque y San Lorenzo se observa un porcentaje de cobertura del 9,5% y del 27,7% respectivamente, sin embargo, la zona de servicio se concentra en el núcleo urbano, donde reside una gran parte de la población del municipio. En estos 2 casos se ha considerado una población urbana del 50% que recibiría agua desde la red de agua potable. Con el mismo razonamiento, en los municipios de Asunción y Fernando la Mora se ha considerado que la totalidad de la población estaría siendo beneficiada por la red de abastecimiento.

Finalmente, el agua pérdida por fugas en la red de abastecimiento se ha cuantificado a partir de los datos recogidos en el estudio básico para sector de agua potable y saneamiento (JICA,

2009), tal y como se muestra en la Tabla nº5. En dicho estudio el volumen de fugas se valoró en 23,17%. Por lo tanto, para los cálculos posteriores se considera como aproximación una pérdida del **25%** del volumen.

Volumen distribuido (9,542m ³)	Volumen efectivo (5,747m ³) 60.23%	Volumen con tarifa (5,365m ³) 56.23%	Volumen con tarifa (con medidor) (3,736m ³) 39.15%	Volumen contabilizado (5,365m ³) 56.23%
			Volumen con tarifa (sin medidor) (1,629m ³) 17.08%	
		Volumen sin tarifa (382m ³) 4.00%	Volumen para uso público, etc. (con medidor) (0m ³) 0%	Volumen no contabilizado (4,177m ³) 43.77%
			Volumen para uso público, etc. (sin medidor) (382m ³) 4.0%	
	Volumen no efectivo (3,795m ³) 39.77%	Otro volumen no efectivo (1,584m ³) 16.60%	Volumen de agua captada ilegalmente (429m ³) 4.5%	
			Volumen de agua insensible por medidor (1,154m ³) 12.1%	
		Volumen de fuga (2,211m ³) 23.17%	Volumen de fuga en las tuberías de impulsión	
			Volumen de fuga en el tanque y tuberías de distribución	
			Otro volumen de fuga	

Tabla nº5. Balance del agua distribuida en el área de Gran Asunción. Fuente: Estudio básico para sector de agua potable y saneamiento (JICA, 2009)

La siguiente tabla muestra el valor de población servida considerada, y el volumen de infiltración obtenido a partir de un rendimiento del 25% y una dotación del 289,1 l/hab.día.

DISTRITO	Área de cobertura (%)	% de población servida (%)	Población total (hab)	Población servida (hab)	Volumen infiltración (l/día)
Asunción	73,8	100	524.190	524.190	37.885.832,3
Fernando de la Mora	96,9	100	170.361	170.361	12.312.841,3
Lambaré	80,4	80.4	173.884	139.803	10.104.242,7
Luque	9,5	50	268.247	134.124	9.693.812,1
Mariano Roque Alonso	55,6	55,6	99.658	55.410	4.004.757,8
San Lorenzo	27,7	50	254.358	127.179	9.191.862,2
Limpio	3,7	3,7	136.323	5.044	364.555,1
Villa Elisa	9,8	9,8	77.287	7.574	547.420,0

Tabla nº6. Volúmenes de infiltración por municipio. Fuente: elaboración propia

Estos volúmenes de infiltración calculados se asocian al área correspondiente cubierta por la propia red de abastecimiento y se multiplican por 30 para obtener un valor mensual.

$$\text{Volumen total infiltrado (l/día)} / \text{área (m}^2\text{)} * 30 = \text{Recarga (l/mes)}$$

Con las consideraciones mencionadas, en la siguiente tabla se muestra la recarga calculada para cada zona y según el municipio donde se ubica. Estos valores constituyen una recarga

adicional que será introducida en el modelo únicamente en la zona concreta donde se produce (y no a nivel de municipio o subcuenca).

DISTRITO donde se ubica la zona de recarga	Área de cobertura (%)	Área cubierta por red de abastecimiento (km ²)	Volumen infiltración (l/día)	Área cubierta por red de abastecimiento (km ²)	Recarga (mm/mes)
Asunción	85,0	96,69	37.885.832,3	83,69	11,74
Fernando de la Mora	96,9	20,14	12.312.841,3	20,14	15,86
Lambaré	80,4	19,22	10.104.242,7	19,22	15,77
Luque	9,5	14,49	9.693.812,1	14,49	17,35
Mariano Roque Alonso	55,6	20,75	4.004.757,8	20,75	5,01
San Lorenzo	27,7	15,71	9.191.862,2	15,71	15,18
Limpio	3,7	3,39	364.555,1	3,59	3,04
Villa Elisa	9,8	1,65	547.420,0	1,65	11,33

Figura nº28. Recarga por municipio. Fuente: elaboración propia

Una vez establecida la recarga para cada zona delimitada, se divide por subcuencas, tal y como se muestra en la Figura nº29.

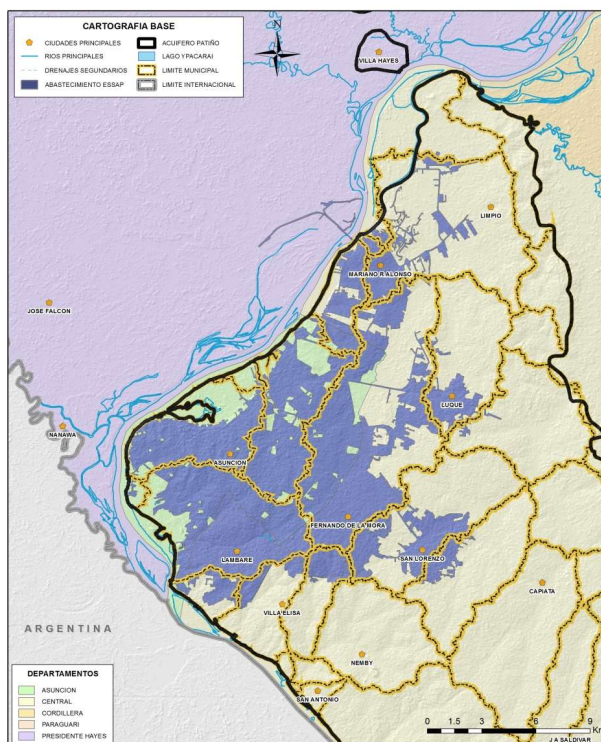


Figura nº29. Zonas de recarga adicional asociada a la red de abastecimiento dividida por subcuenca.
Fuente: elaboración propia

Una vez establecida la recarga, el resultado se asocia a las subcuencas que se han definido para el modelo, ya que no pueden introducirse a nivel de municipio. Para ello cada zona de recarga se divide según el límite de subcuenca.

Adicionalmente, para facilitar su introducción al modelo se ha suavizado y limpiado cada polígono de espacios huecos, tal y como se muestra en la Figura nº30.

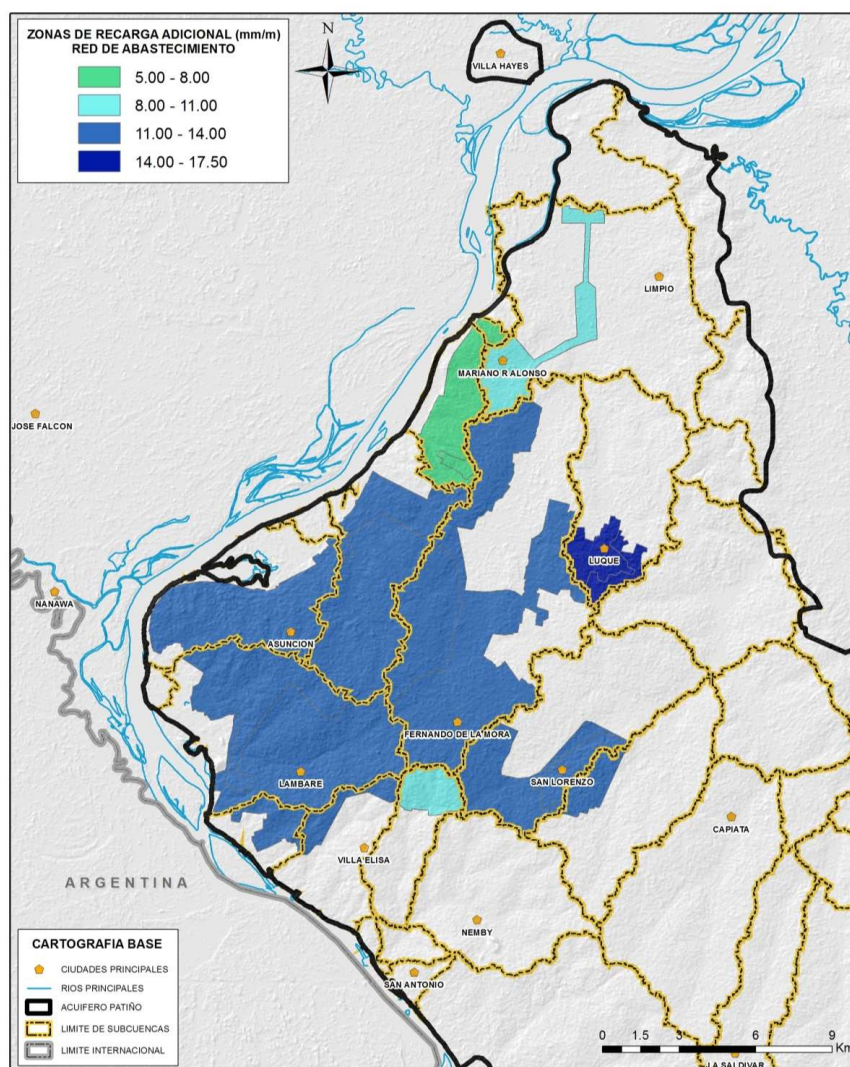


Figura nº30. Zonas de recarga adicional asociada a la red de alcantarillado dividida por subcuenca.
Fuente: elaboración propia

4.5.2.2 Pérdidas de la red de alcantarillado

Al igual que para la red de abastecimiento, la red de alcantarillado tiene asociadas unas pérdidas que contribuyen en cierta medida con la recarga del acuífero.

La recarga asociada a las pérdidas de la red de alcantarillado se considera únicamente sobre aquella área cubierta por la red de ESSAP, que es la que aporta agua de una fuente superficial (río Paraguay). El primer paso es definir esta área, lo que se realizó a partir de la digitalización del plano facilitado por Catastro de ESSAP.

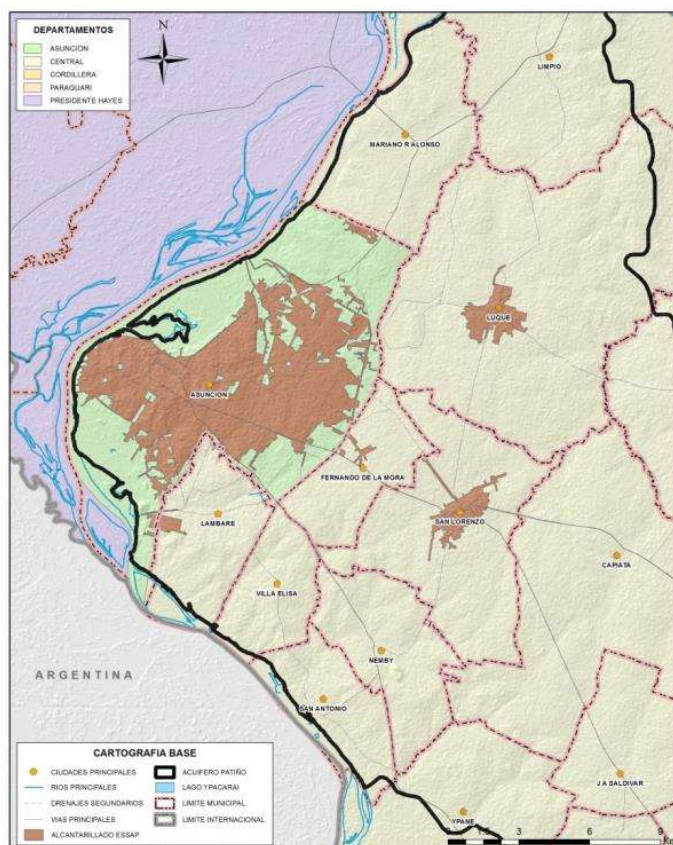


Figura nº31. Área cubierta por la red de alcantarillado de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP

El volumen de agua infiltrado por pérdidas en la red se calcula a partir de la dotación considerada por habitante. Por ello, se procedió como en el apartado anterior, dividiendo esta área en función de los municipios, de esta manera se puede calcular la población existente en estas áreas ya que a nivel de municipio se dispone de datos oficiales de población suministrados por el Anuario estadístico de la DGEEC (DGEEC, 2017).

Como se observa en la Figura nº31, la cobertura de red de alcantarillado no es muy extensa comparada con la red de abastecimiento, solo abarca la zona urbana de 3 municipios (Asunción, Luque y San Lorenzo) y alguna zona puntual de Fernando la Mora y Lambaré.

Analizando las áreas cubiertas por esta red y comparando por el área total del municipio se obtiene el porcentaje de municipio que cuenta con saneamiento, es decir, el área “afectada” por la recarga asociada a las pérdidas de la red de alcantarillado.

DISTRITO	Área total (km²)	Área cubierta por red de abastecimiento (km²)	Porcentaje cobertura (%)
Asunción	113,44	56,08	49,4
Fernando de la Mora	20,77	0,50	2,4
Lambaré	23,91	0,70	2,9
Luque	152,84	3,62	2,4
San Lorenzo	56,68	3,94	6,9

Tabla n°7. Área cubierta por la red de alcantarillado para cada municipio

Una vez identificadas las áreas de recarga se procede al cálculo del volumen de agua que se infiltraría al acuífero debido a las pérdidas de la red. Para ello se realiza el cálculo del volumen de agua a partir de la dotación estimada, y a esta demanda se le aplica un rendimiento.

En resumen, el volumen total de infiltración vendría dado por la fórmula:

$$\text{Dotación (l/hab.día)} * \text{Pobl.servida (hab)} * \text{rendimiento}$$

Por una parte, para el cálculo de la dotación considerado para la red de alcantarillado se han consultado los parámetros de diseño utilizados para los proyectos de red de alcantarillado sanitario, tal y como han sido establecidos en el Plan Maestro de alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales de Asunción y Área Metropolitana (ESSAP, 2012). En este documento se consideran 200 l/hab.día (ver Tabla n°8).

Tabla 3.14 Criterios de Diseño de las Redes de Alcantarillado Sanitario

Criterios de Diseño	2012	2022	2032	2042
Dotación de agua (l/hab/día)	200	223	247	270
Coeficiente de retorno	0.8	0.8	0.8	0.8
Coef. Km/h punta (1.25*1.5)	1.88	1.88	1.88	1.88
Coef. de infiltración	0.63	0.63	0.63	0.63
Coef. de aporte ilegales	1.25	1.2	1.15	1.08
Coeficiente Kmd diario	1.25	1.25	1.25	1.25

Tabla n°8. Criterios de diseño establecido para las redes de alcantarillado sanitario. Fuente: Plan Maestro de alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales de Asunción y Área Metropolitana (ESSAP, 2012).

Por otra parte, los datos de población utilizados proceden de las proyecciones de población estimadas en el Anuario estadístico del Paraguay 2015 (DGEEC, 2017). Hay que considerar que la población estimada que cuenta con red de alcantarillado sanitario para cada municipio no corresponde necesariamente con el área cubierta por el servicio. Al igual que en el apartado anterior se considera un porcentaje de población servida del 20% en los casos de Luque y San Lorenzo, ya que la zona de servicio se concentra en el núcleo urbano, donde reside una gran parte de la población del municipio.

A efectos del modelo, se considera que las aportaciones de Lambaré y Fernando la Mora puede ser obviadas ya que apenas abarcan 0,5 y 0,7 km² y corresponden a zonas limítrofes con Asunción.

Finalmente, el agua pérdida por fugas en la red de alcantarillado, al igual que el apartado anterior se ha cuantificado a partir de los datos recogidos en el estudio básico para sector de agua potable y saneamiento (JICA, 2009), ya que no se dispone de datos más específicos. En dicho estudio el volumen de fugas se valoró en 23,17%. Por lo tanto, para los cálculos posteriores se considera una pérdida del **25%** del volumen.

La siguiente tabla muestra el valor de población servida considerada, y el volumen de infiltración obtenido a partir de un rendimiento del 25% y una dotación del 200 l/hab.día.

DISTRITO	Área de cobertura (%)	% de población servida (%)	Población total (hab)	Población servida (hab)	Volumen infiltración (l/día)
Asunción	49,4	49,4	524190,0	258950	12.947.493,0
Luque	2,4	20	268247,0	53650	2.682.470,0
San Lorenzo	6,9	20	254358,0	50872	2.543.580,0

Tabla nº9. Volúmenes de infiltración por alcantarillado y por municipio. Fuente: elaboración propia

Estos volúmenes de infiltración calculados se asocian al área correspondiente cubierta por la propia red de abastecimiento y se multiplican por 30 para obtener un valor mensual.

$$\text{Volumen total infiltrado (l/día)} / \text{área (m}^2\text{)} * 30 = \text{Recarga (l/mes)}$$

Con las consideraciones mencionadas, en la siguiente tabla se muestra la recarga calculada para cada zona y según el municipio donde se ubica. Estos valores constituyen una recarga adicional que será introducida en el modelo únicamente en la zona concreta donde se produce (y no a nivel de municipio o subcuenca).

DISTRITO donde se incluye la zona de recarga	Área de cobertura (%)	Porcentaje de población servida (%)	Población total (hab)	Población servida (hab)	Área cubierta por red de abastecimiento (km ²)	Recarga (mm/mes)
Asunción	49,4	49,4	524190,0	258950	56,08	6,93
Luque	2,4	20	268247,0	53650	3,62	22,22
San Lorenzo	6,9	20	254358,0	50872	3,94	19,36

Tabla nº10. Recarga adicional. Fuente: elaboración propia

Una vez establecida la recarga, el resultado se asocia a las subcuencas que se han definido para el modelo, ya que no pueden introducirse a nivel de municipio. Para ello cada zona de recarga se divide según el límite de subcuenca. En este caso, la recarga adicional asociada a San Lorenzo y Luque se asocia a la subcuenca correspondiente, y en el caso de Asunción el polígono se dividirá según las subcuencas que la componen.

Adicionalmente, para facilitar su introducción al modelo se ha suavizado y limpiado cada polígono de espacios huecos, tal y como se muestra en la Figura nº32.

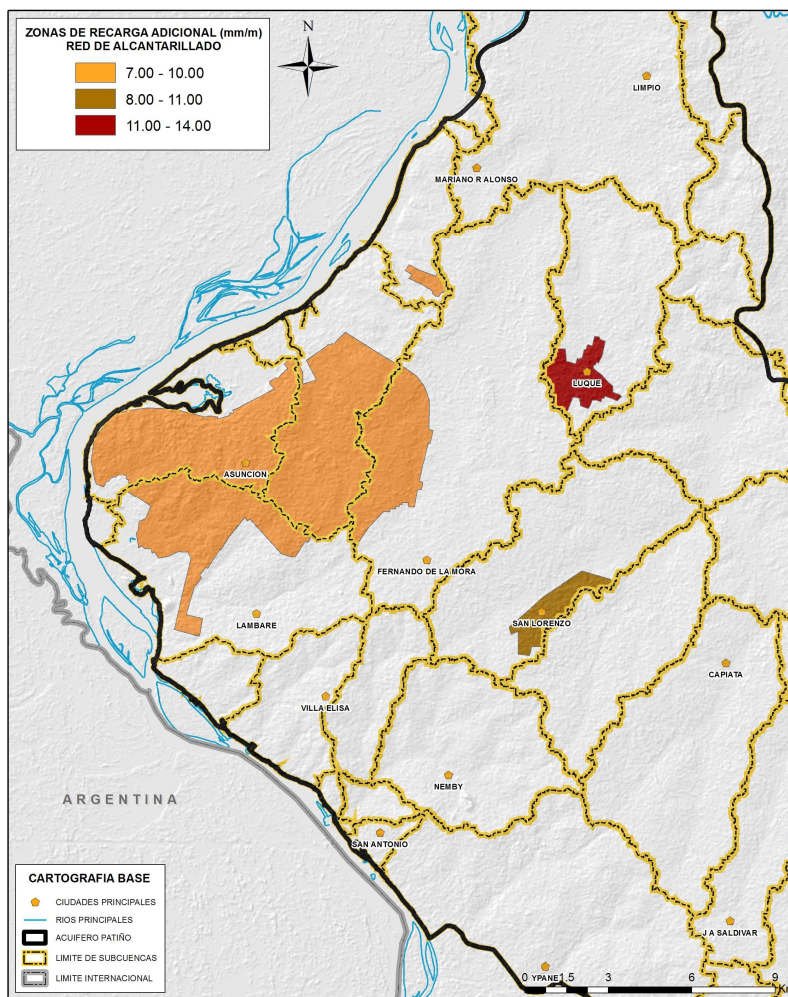


Figura nº32. Zonas de recarga adicional asociada a la red de alcantarillado dividida por subcuenca.
Fuente: elaboración propia

4.5.3 Implementación de la recarga en el modelo.

A partir de los resultados calculados se han generado 76 funciones de tiempo que engloban la totalidad del dominio y que incorporan los diferentes orígenes de la recarga. En la Figura nº33 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las zonas de recarga incorporadas en el modelo distinguiendo las zonas que tan solo reciben recarga directa por infiltración de lluvia de las que también incorporan recargas por pérdidas de redes de abastecimiento y alcantarillado y/o retornos de riego.

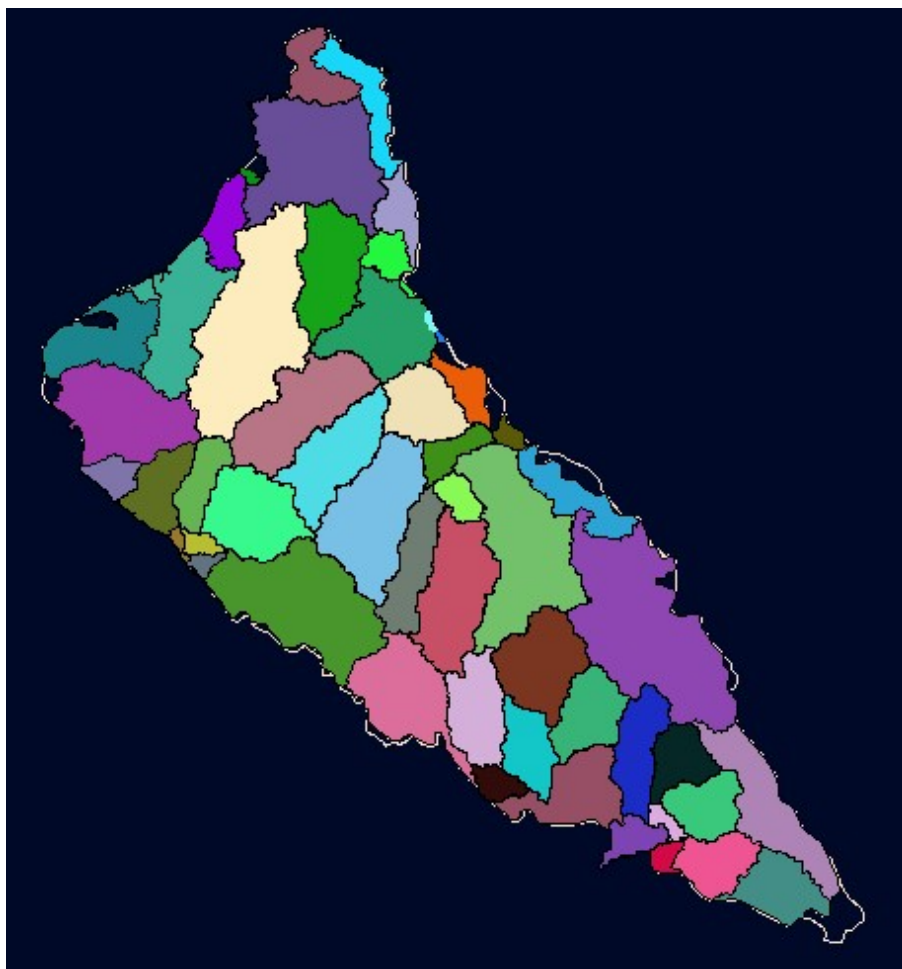


Figura nº33. Discretización de la recarga por infiltración directa de la lluvia por subcuencas

4.6 Extracciones de agua en el acuífero (MAA)

La cuantificación del volumen de extracción de las aguas subterráneas es un cálculo que tiene asociada una gran incertidumbre cuando no existe un control exhaustivo de los pozos y fuentes de agua subterránea.

Al no tener datos concretos de extracciones de agua, estas se deben calcular a partir de toda la información recopilada. Para ello, se han llevado a cabo 2 análisis diferentes, cuyos valores finales podrán ser comparados y permitirán extraer una conclusión bastante aproximada al valor real de las extracciones actuales del Acuífero Patiño:

- Datos de pozos, obtenidos de los diferentes inventarios realizados los últimos años
- Cálculo de demandas en base a datos socioeconómicos de la región

4.6.1 Datos procedentes de inventario de pozos

4.6.1.1 Selección de pozos

Un primer método para determinar el volumen de extracción de agua del acuífero es el análisis de datos existentes sobre caudales de extracción de pozos en los diferentes inventarios y estudios realizados hasta el momento.

Se tienen datos de un total de 3515 pozos derivados de los diversos estudios anteriores incluyendo el inventario del estudio actual realizado en agosto del 2017. De todos estos datos, solo un total de 1268 pozos disponen de dato de caudal nominal (865 de estudios anteriores y 403 de los pozos inventariados en 2017). Aquellos que disponen de datos son principalmente los procedentes de:

- Inventario de agosto 2017
- Datos ESSAP
- Datos ERSSAN
- Datos del banco de datos elaborado en 2007 donde se incluían valores facilitados por SENASA

Como se puede observar en la siguiente figura, la distribución de los pozos inventariados cubre la totalidad del área del Acuífero Patiño. Cabe precisar que aquellos que disponen de datos de caudal también presentan una distribución regular en todo el ámbito a excepción del área de Asunción, donde se dispone de muy poca información de los pozos existentes, en su gran mayoría fuera de uso. Sin embargo, esto no supone una limitación para conocer el caudal promedio de extracción ya que justamente esa área no es representativa del uso de agua subterránea ya que queda cubierta por los servicios de ESSAP



Figura nº34. Pozos con dato de caudal nominal. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de inventario disponibles

4.6.1.2 Cálculo frecuencia de extracción

Para calcular el volumen promedio de extracción se debe conocer al menos el valor del caudal nominal de los pozos y su frecuencia de extracción.

En este caso, debido a los pocos datos disponibles y la gran heterogeneidad de éstos, no se tienen datos precisos de frecuencia de extracción, por lo tanto, este valor se debe estimar a partir de información existente del régimen de explotación de pozos que actualmente están en uso.

Con este fin se han consultado datos de extracción de los últimos años de los pozos que actualmente están en explotación por ESSAP. Con ellos, se ha identificado una frecuencia de bombeo promedio que se extrapolará en los datos de caudal horario obtenidos de los inventarios.

En la siguiente tabla se indican los pozos actualmente explotados por ESSAP con su caudal nominal y el promedio de volúmenes mensuales extraídos durante los últimos 5 años.

POZO	Q (m3/h)	2013 (m3/mes)	2014 (m3/mes)	2015 (m3/mes)	2016 (m3/mes)	2017 (m3/mes)
Pozo 1	24	11910	12023	10549	10197	6751
Pozo2_SA	72	30672	29928	25092	32602	44870
Lucerito	9	5950	4424	5685	3940	0
L.Grande	45	38160	35492	34419	37228	38162
Pozo2_SL	54	33290	36496	34673	31200	33129
Pozo 4	54	47539	46843	49371	16841	8297
Pozo 5	59	11534	20516	28778	27296	23175
Primav.	62	40112	22402	7510	5745	10875
Pozo2_LUQE	40	10464	12656	10981	13411	13722
C.Via	46	30310	17476	12444	9690	1398
Colegial	68	49085	42497	41388	40880	41940
C.Corà	50	0	22440	34333	35026	34561
Mbachio	60	42024	28417	28449	30525	28366

Tabla nº11. Promedio mensual de Volúmenes extraídos por ESSAP los últimos 5 años. Fuente: ESSAP

Un primer análisis que se extrae de estos datos es un descenso progresivo de los volúmenes de extracción en gran parte de los pozos. En la figura siguiente se refleja la variación de estas extracciones en tanto por 1, donde se observa que, a excepción de los pozos Cerro Corà, Pozo S2A y Lucerito, el volumen de agua subterránea extraída ha ido en descenso, en algunos casos de más del 50%, en los últimos 5 años, lo que indicaría que el porcentaje de uso de agua superficial para el abastecimiento iría en aumento.

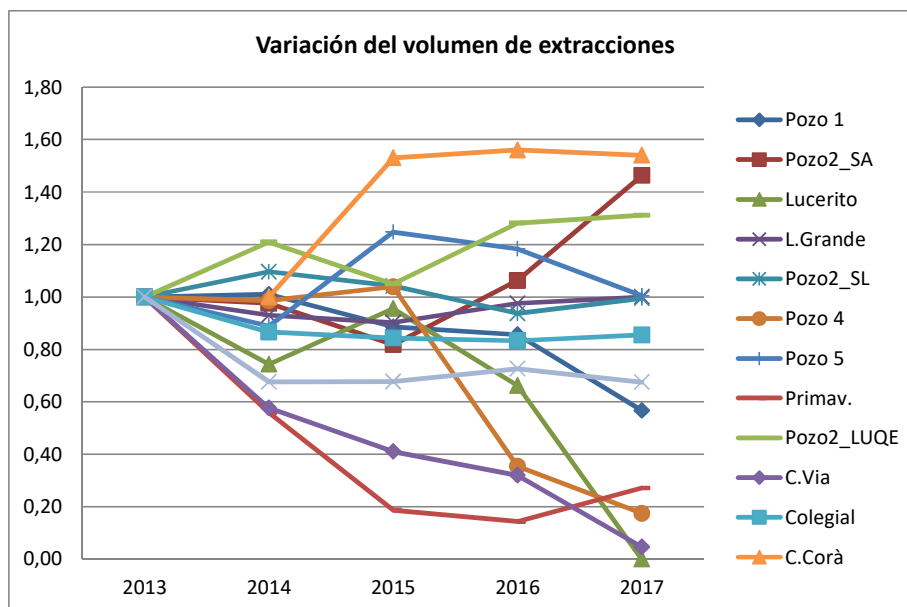


Figura nº35. Variación del volumen de extracción

Dada la tendencia descendiente de las extracciones, para el cálculo de frecuencia se partirá de los datos del último año (2017). En la siguiente tabla se detallan las extracciones de cada pozo a nivel horario y sus horas de uso diario promedio obtenidas al dividir este valor por el caudal nominal y multiplicar por 24.

Horas promedio de uso = Caudal extraído (m³/h) / Caudal nominal (m³/h) * 24

POZO	Q	2013		2014		2015		2016		2017	
	m3/h	m3/h	h de uso	m3/h	h de uso	m3/h	h de uso	m3/h	h de uso	m3/h	h de uso
Pozo 1	24	16,54	16,54	16,70	16,70	14,65	14,65	14,16	14,16	9,38	9,38
Pozo2_SA	72	42,60	14,20	41,57	13,86	34,85	11,62	45,28	15,09	62,32	20,77
Lucerito	9	8,26	23,33	6,14	17,35	7,90	22,30	5,47	15,45	0,00	0,00
Pozo2_SL	54	46,24	20,55	50,69	22,53	48,16	21,40	43,33	19,26	46,01	20,45
Pozo 4	54	66,03	29,34	65,06	28,92	68,57	30,48	23,39	10,40	11,52	5,12
Pozo 5	59	16,02	6,52	28,49	11,59	39,97	16,26	37,91	15,42	32,19	13,09
Primav.	62	55,71	21,57	31,11	12,04	10,43	4,04	7,98	3,09	15,10	5,85
Pozo2_LUQE	40	14,53	8,72	17,58	10,55	15,25	9,15	18,63	11,18	19,06	11,44
C.Via	46	42,10	21,96	24,27	12,66	17,28	9,02	13,46	7,02	1,94	1,01
Colegial	68	68,17	24,06	59,02	20,83	57,48	20,29	56,78	20,04	58,25	20,56
C.Corà	50	0,00	0,00	31,17	14,96	47,69	22,89	48,65	23,35	48,00	23,04
Mbachio	60	58,37	23,35	39,47	15,79	39,51	15,80	42,40	16,96	39,40	15,76
Promedio de horas de uso			17,51		16,48		16,49		14,28		12,21

Tabla nº12. Promedio de horas de uso en los últimos 5 años. Fuente: propia a partir de datos ESSAP

Al igual que se ha dicho anteriormente, la frecuencia de extracción de agua subterránea presenta una tendencia a la disminución.

Una vez analizados estos datos se puede estimar que la frecuencia de bombeo de agua subterránea sería de un promedio de **12 horas al día**.

4.6.1.3 Cálculo del volumen de extracción

Una vez obtenida la frecuencia promedio de extracción, se calcula el volumen de extracción total a partir de los datos de los pozos de los inventarios existentes.

Como se ha dicho en los apartados anteriores, existe un total de 1268 pozos que disponen de dato de caudal nominal.

La suma de estos datos es de 19.269 m³/h.

Suponiendo una frecuencia promedio de 12 h diarias, se obtiene una extracción de 221.238 m³/día, lo que equivale a 84.398.220 m³/año.

Como se ha comentado anteriormente, este valor resulta orientativo ya que no se conoce la fiabilidad de los datos iniciales y además los inventarios utilizados corresponden a diferentes fechas y diferentes metodologías de trabajo.

Por lo tanto, el volumen total de las extracciones estimado según los datos de los pozos existentes sería de un valor aproximado de **84,4 hm³/año**.

4.6.2 Cálculo de las demandas

El segundo método que se utiliza para estimar el volumen de las extracciones es el cálculo de las demandas. En base a los usos calculados y la proporción de agua subterránea empleada para cubrir dicha demanda, se estimará un volumen de extracción aproximado.

A continuación se analizan los datos para la estimación de la demanda para uso poblacional, industrial y agrícola según el origen de procedencia del recurso.

4.6.2.1 Demanda poblacional

EL uso poblacional es el que tiene más peso actualmente en el área de estudio y la proyección va en aumento ya que según datos de la DGEEC la tasa de crecimiento anual es de cerca del 3% para las zonas urbanas y del 0,5% en las áreas rurales.

Para determinar la demanda referente al uso poblacional se han tomado los datos de población y proyecciones del Informe “Proyección de la población por sexo y Edad según distrito 2000-2025. Revisión 2015” elaborado por la DGEEC.

En el ámbito de estudio la mayor parte del recurso es de origen subterráneo procedente de pequeños pozos locales, Juntas de Saneamiento o pozos comunitarios. El uso de agua superficial para abastecimiento se limita únicamente al área cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP, procedente del río Paraguay. En el resto del territorio el uso poblacional es en su práctica totalidad, de origen subterráneo debido la gran cantidad de sedimentos que arrastra el río y la falta de existencia de plantas de potabilización.

Por lo tanto, de igual manera que se realizó durante la etapa de diagnóstico del presente estudio, la demanda poblacional se calculará a partir de la dotación y la población proyectada a 2017 pero diferenciando según su origen en base al área que está cubierta por la red de abastecimiento actual.

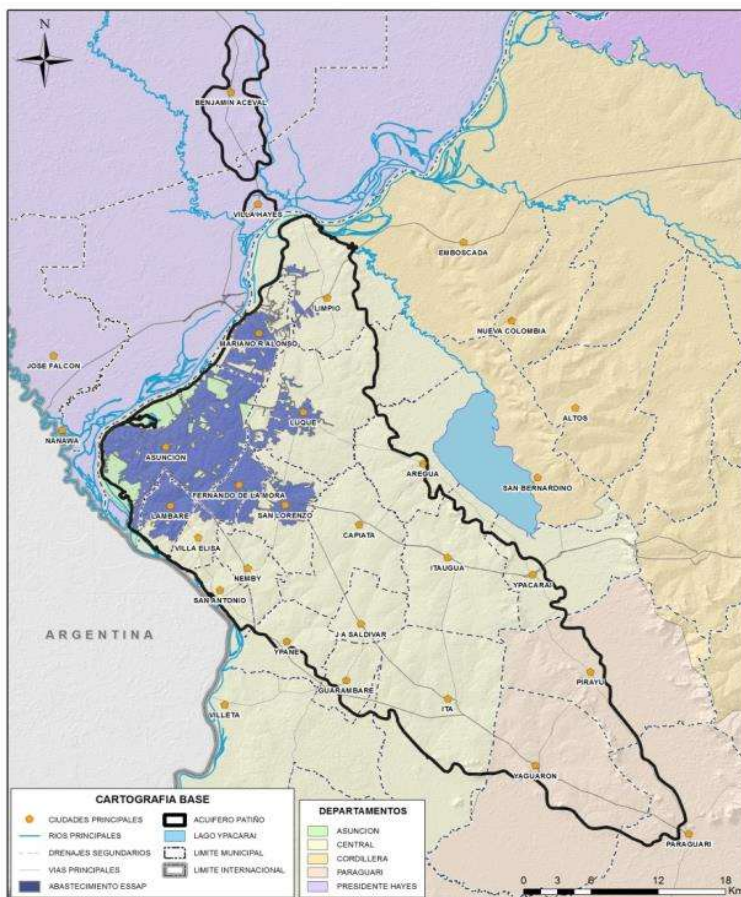


Figura nº36. Área cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP. Fuente: elaboración propia a partir de datos del catastro de ESSAP

Como se observa en la figura, 8 municipios están servidos por ESSAP: Asunción, Lambaré, San Lorenzo, Luque, Fernando de la Mora, Mariano Roque Alonso en casi su totalidad y una zona muy pequeña de Limpio y Villa Elisa.

Analizando las áreas cubiertas por la red de abastecimiento y comparando por el área total del municipio se obtiene el porcentaje de municipio que cuenta con red de abastecimiento. Lógicamente este porcentaje es relativo ya que se parte de un mapeo de la red que no necesariamente cubre todas las áreas, con lo cual no obtenemos un valor muy acorde con la realidad. Por ejemplo, en el caso de Asunción obtenemos un porcentaje de cobertura del 73,8%, cuando deberíamos considerar que el 100% de su población

DISTRITO	Área total (km²)	Área cubierta por la red de abastecimiento	Porcentaje cobertura (%)
Asunción	113,4437	83,6928	73,8
Fernando de la Mora	20,7747	20,1365	96,9
Lambaré	23,9142	19,2175	80,4
Luque	152,8428	14,4976	9,5
Mariano Roque Alonso	37,2908	20,7505	55,6
San Lorenzo	56,6804	15,7058	27,7
Limpio	90,5695	3,3877	3,7
Villa Elisa	17,7935	1,6547	9,3
TOTAL			

Figura nº37. Área cubierta por la red de abastecimiento

DISTRITO	Porcentaje cobertura (%)	Porcentaje considerado (%)
Asunción	73,8	100
Fernando de la Mora	96,9	100
Lambaré	80,4	100
Luque	9,5	50
Mariano Roque Alonso	55,6	55,6
San Lorenzo	27,7	50
Limpio	3,7	3,7
Villa Elisa	9,3	9,3
TOTAL		

Figura nº38. Estimación de la población servida por la actual red de abastecimiento

Partiendo de los datos de la población proyectada a 2017 (DGEEC, 2017), y considerando únicamente los municipios servidos por ESSAP, se obtiene el volumen de agua potable correspondiente al uso poblacional.

DISTRITO	Población proyectada a 2017	Demanda estimada (m3/año)
Asunción	524.190	55.319.558
Fernando de la Mora	170.361	17.978.777
Lambaré	173.884	14.423.568
Luque	268.247	20.240.991
Mariano Roque Alonso	99.658	10.517.249
San Lorenzo	254.358	26.843.267
TOTAL	1.490.698	145.323.410

Figura nº39. Cálculo de la demanda poblacional en municipios cubiertos por ESSAP. Fuente: elaboración propia

Por otra parte, según los datos recogidos en ESSAP, durante el año 2017 se extrajo un volumen total de 4 hm³ en los pozos actualmente explotados. Este dato sirve para comparar al volumen total servido que se estima a partir de la dotación y de la población servida con el volumen procedente de recurso subterráneo.

Es decir, que la demanda cubierta por ESSAP sería de 145,32 hm³/año de los cuales solamente 4 hm³ corresponderían a agua procedente del acuífero.

Área no cubierta por ESSAP:

La demanda total poblacional calculada en el documento diagnóstico del presente estudio se estimó en 242,85 hm³/año, valor que incluía la totalidad del recurso demandado sin distinguir su procedencia superficial o subterránea.

Por diferencia se obtiene la demanda asociada a la zona no cubierta por la red de abastecimiento de ESSAP. Por lo tanto:

$242,85 - 145,32 = 97,53$ hm³/año corresponde al volumen de agua que abastece municipios no servidos por ESSAP, es decir, que se alimentan básicamente de agua subterránea.

En conclusión:

Añadiendo los 4 hm³ de pozos de ESSAP a los 97,53 hm³/año de pozos de Juntas de saneamiento y particulares, se obtiene un total de 101,53 hm³/año que procederían de agua subterránea para abastecer el uso poblacional.

4.6.2.2 Uso Industrial

El uso de agua con fines industriales se puede estimar a partir del número y tipología de industrias dependientes del Acuífero Patiño. Sin embargo, no existe un registro del uso de agua con fines industriales.

Según el “Estudio de Uso industrial del agua en el Acuífero Patiño” Tesis de Maestría FC y T – UCA elaborada por Rocío Ramírez en 2006, el consumo de agua para uso industrial en el área del acuífero Patiño era de 6,68 hm³/año, aunque en su momento se consideró un volumen subestimado y se decidió adoptar **10 hm³/año** como valor de referencia.

No se dispone de datos precisos de origen del recurso que cubre la demanda industrial, sin embargo, tras analizar los resultados obtenidos en las visitas de campo y el inventario realizado en agosto del 2017 durante la elaboración del diagnóstico del presente estudio, se puede realizar la aproximación que este tipo de demanda se cubre con agua procedente de pozo en su totalidad.

4.6.2.3 Uso Agrícola

Tal y como se plasmó en el documento de diagnóstico del presente estudio (INCLAM-HQA, 2017), el volumen de uso de agua para fines agrícolas es difícil de determinar ya que no se dispone de datos suficientes para cuantificarlo de una manera pormenorizada. Los datos de cultivos y volumen de producción del informe “Quinquenio 2010/2014: serie histórica por departamento y rubro agrícola-pecuario” (MAG/DGP/Unidad de Estudios Agropecuarios, Marzo 2015) se recogen a nivel departamental y no se dispone de información para concretizar que tipo de cultivos se ubican dentro del área de Acuífero Patiño, cuantas campañas se realizan y cuál es la procedencia del recurso utilizado.

Por ello, se realizó una aproximación del uso del agua según los siguientes datos:

- **Información de área agrícola** obtenida del mapa de usos del suelo del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción PEMA (MOPC, 2014), el cual nos indica que el 21,24% (25.725 ha) de suelos está destinado a uso agrícola, engolando este porcentaje los cultivos agrícolas, pasturas y frutihortícolas.
- **Información de necesidades de agua de cultivo**, se tomó como referencia el documento Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs de la FAO, donde se indica Valores Aproximados de las Necesidades de Agua de Cultivo. Siendo reservados en la estimación y según la tipología de cultivos de la zona (frutilla, mandioca, maíz, poroto, Ka'a He'e) se decidió tomar como dato de necesidades del cultivo el valor de 350 mm de agua/periodo crecimiento total de cultivo.

Se muestra en el siguiente cuadro los datos y resultados obtenidos para el cálculo de la demanda de agua para uso agrícola.

Cultivo	Necesidad de agua de cultivo (mm / período de crecimiento total)	Superficie de cultivo (ha)	Demanda de cultivo (m3)	Demanda de cultivo (hm3)
Agrícola, pasturas y frutihortícola	350	25.725	90.037.500	90,04
TOTAL			90.037.500	90,04

Figura nº40. Cálculo de la demanda agrícola en el Acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia

Resultando como estimación final **90,04 hm³** de volumen de agua para uso agrícola.

A este valor debe considerarse que se ha considerado la totalidad de la superficie tipificado como agrícola, pero que no necesariamente se cultiva el 100% de esta área.

En este caso es difícil cuantificar cual es el porcentaje de esta demanda que se cubre con agua subterránea y cual con agua superficial. A priori, según el tipo de cultivo y la localización de estos, las necesidades agrícolas serían cubiertas por recurso superficial procedente de humedales y lagos así como del agua procedente de las precipitaciones. Solamente una pequeña parte, considerada como despreciable respecto el volumen total usado, estaría servida por recurso subterráneo.

4.6.2.4 Resumen de demandas

Las demandas cubiertas por agua subterránea son básicamente la poblacional y la industrial.

Como se ha cuantificado en apartados anteriores, la demanda poblacional tendría un volumen de extracción estimado de 101,5 hm³/año, y el industrial de 10 hm³/año.

En total, las extracciones para cubrir las demandas servidas con recurso subterráneo serían de 111,5 hm³/año.

La conclusión es que existe una gran incertidumbre en el cálculo de las extracciones ya que no se dispone de datos fiables ni comprobables. Sin embargo, a partir de datos de pozos y datos de demanda se llega a una aproximación del valor de las extracciones que resultan muy similares y que nos permiten acotar estas extracciones.

Es decir, tras el análisis realizado, el volumen anual de extracción se estima en una franja de valores situados entre 84 hm³/año y 111 hm³/año

A efectos del modelo, se toma un valor de extracciones del orden de 100 hm³/año.

4.7 Calibración y verificación

La calibración del modelo se ha realizado de forma manual. Se han ejecutado del orden de 100 pasadas con el modelo modificando diferentes parámetros y condiciones de contorno (conductancia y adición y supresión de elementos).

4.7.1 Datos disponibles para la calibración

Se ha dispuesto de los datos correspondientes a la red de seguimiento del PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN DEL SECTOR AGUA Y SANEAMIENTO – PM-SAS (ver Figura nº41)

En total han sido 393 datos incorporados a la calibración correspondientes al período noviembre de 2006 – diciembre de 2016.

De estos 393 datos se han eliminado algunos datos incoherentes en los estadios iniciales y se han modificado las cotas topográficas en aquellos casos en los que existía una clara diferencia entre la topografía considerada para el punto y la que ofrece el modelo digital del terreno.



Figura nº41. Ubicación puntos de control

4.7.2 Datos disponibles para la verificación

La verificación del modelo se ha realizado a través de la comparación de los caudales drenados en la cuenca del Yukyry (ver Figura nº42) y los valores correspondientes al caudal base de los modelos de simulación de aguas subterráneas ejecutadas para el cálculo de la recarga directa por precipitación (ver Figura nº43). También se dispone de la segregación del hidrograma de los valores medidos en el arroyo Yukyry en el año 2006-2017 (ver Figura nº11).

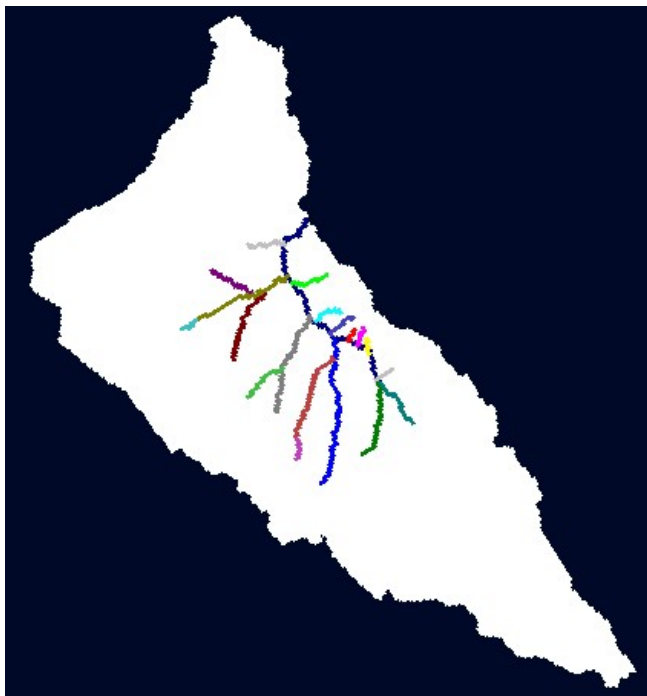


Figura nº42. Ríos (condiciones de contorno de tipo dren) de la cuenca del Yukyry considerados en la verificación del modelo numérico de flujo

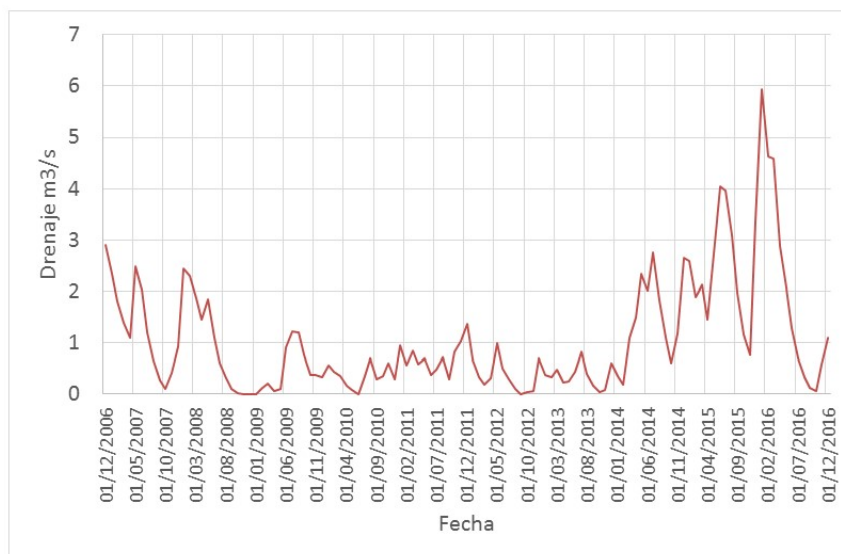


Figura nº43. Evolución del caudal base del arroyo Yukyry simulado con SWAT

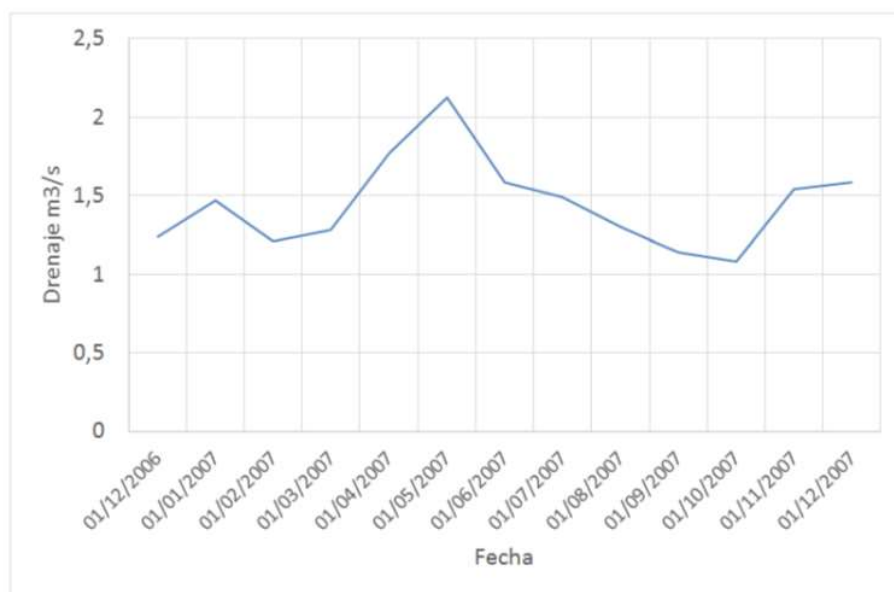


Figura nº44. Valores del caudal base medido en el arroyo Yukury en el período 2006 -2007

El valor promedio del caudal base medido en los años 2006-2007 fue de 1.44 m³/s. El promedio de la simulación de SWAT para el período 2006- 2017 es de 1.05 m³/s y marca picos importantes asociados a las precipitaciones en el último período (2014 – 2016)

4.7.3 Resultados generales de la calibración

A nivel estadístico la calibración se puede considerar muy buena. En la Figura nº45 se representan los residuales del cálculo. Se aprecia como los residuales se distribuyen a lo largo de la recta de calibración perfecta (valor calculado igual al valor medido). En la Tabla nº13 se muestran los estadísticos de la calibración.

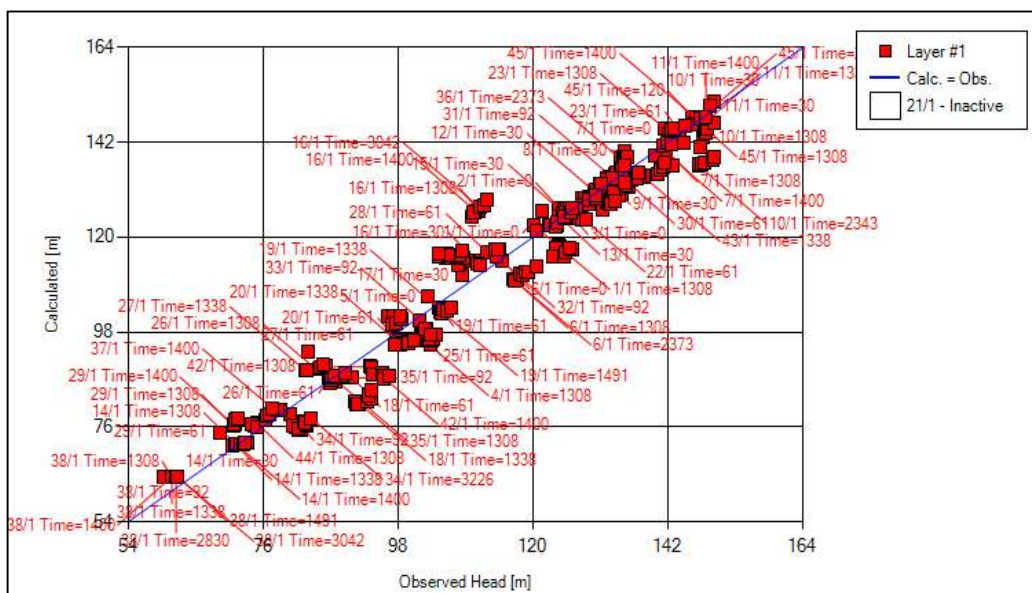


Figura nº45. Relación de valores medidos y valores calculados.

Parámetro	Valor	Unidades
Residual mínimo	0.019	m
Residual máximo	16.28	m
Media de residuales	-0.81	m
Media residuales absolutos	3.77	m
Error estándar de las estimaciones	0	m
Media cuadrática de los residuos	5.019	m
RMS normalizado	5.59	%
Coefficiente de Correlación	0.98	-

Tabla nº13. Valores estadísticos de la calibración.

El coeficiente de correlación indica que no hay grandes desviaciones y que la mayoría de los puntos están sometidas a errores similares.

El error promedio es -0.81. Por regla general se debe aspirar a valores en el rango 0.5 - -0.5. Por lo tanto, es un valor ligeramente superior al óptimo. No obstante, se considera que la mejora de estos valores, a través de la modificación de la recarga o de parámetros, no es razonable abordarlo desde el punto de vista de la calibración ya que tiene más relación con el conocimiento del modelo conceptual, en especial:

- 1) Distribución espacial y valor total de las extracciones en el acuífero. Es importante conocer la situación actual y su evolución en la zona de Asunción.
- 2) Evoluciones temporales de las extracciones.
- 3) Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento.

No obstante, se han realizado algunas pruebas que mejoran este aspecto. Un coeficiente de almacenamiento mayor en la zona central del acuífero podría reducir la desviación hacia un promedio negativo, pero se ha considerado no aplicarlo en la calibración. En futuras mejoras del modelo se deberá cotejar si esa es la solución apropiada o lo son el aumento de la recarga o la disminución de las extracciones.

La media cuadrática normalizada se sitúa en 5.59 % que supone un error global aceptable. La media de los residuales absolutos de 3.77 se sitúa dentro del rango de los potenciales errores asociados a las cotas y su valor normalizado es muy bajo (4.3 %).

El error máximo es elevado (16.28 m). Corresponde al punto 16 que presenta una evolución muy coherente con la observada pero las tendencias de equilibrio que tienen lugar durante los primeros tiempos de cálculo la sitúan muy por encima de los valores medidos. Esta situación parece tener su origen en la inexistencia de extracciones en toda la región de Gran Asunción. Este punto y el estado estacionario (ver apartado 4.6) parecen reclamar una extracción importante, como mínimo a nivel puntual, en Asunción.

Parámetros obtenidos de la calibración y modificaciones del modelo conceptual

En el modelo calibrado se ha utilizado la distribución de permeabilidades (ver apartado 4.3.1), un coeficiente de almacenamiento de 0.01 para la zona 2 (profunda) y de 0.06 para la zona 1 (superficial).

Se ha optado por eliminar la supuesta conexión hidráulica del contorno suroeste con los acuíferos colindantes al obtenerse una muy buena calibración tan solo con el drenaje producido por los arroyos en la zona.

Resultados por zonas

En las siguientes figuras se muestran todas las curvas de evolución de los niveles piezométricos observados y medidos. No se incluye el punto 21 por que queda fuera del ámbito de la modelación. Tampoco se incluyen los puntos 3,8 y 25 porque disponen de un valor en la situación inicial.

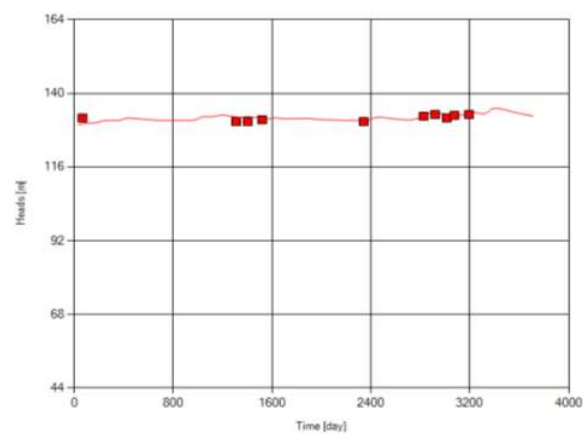
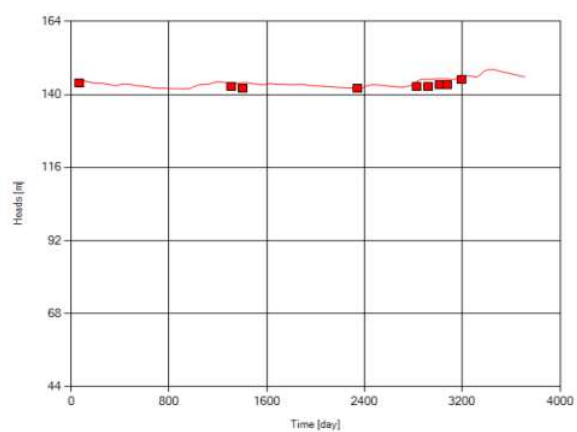
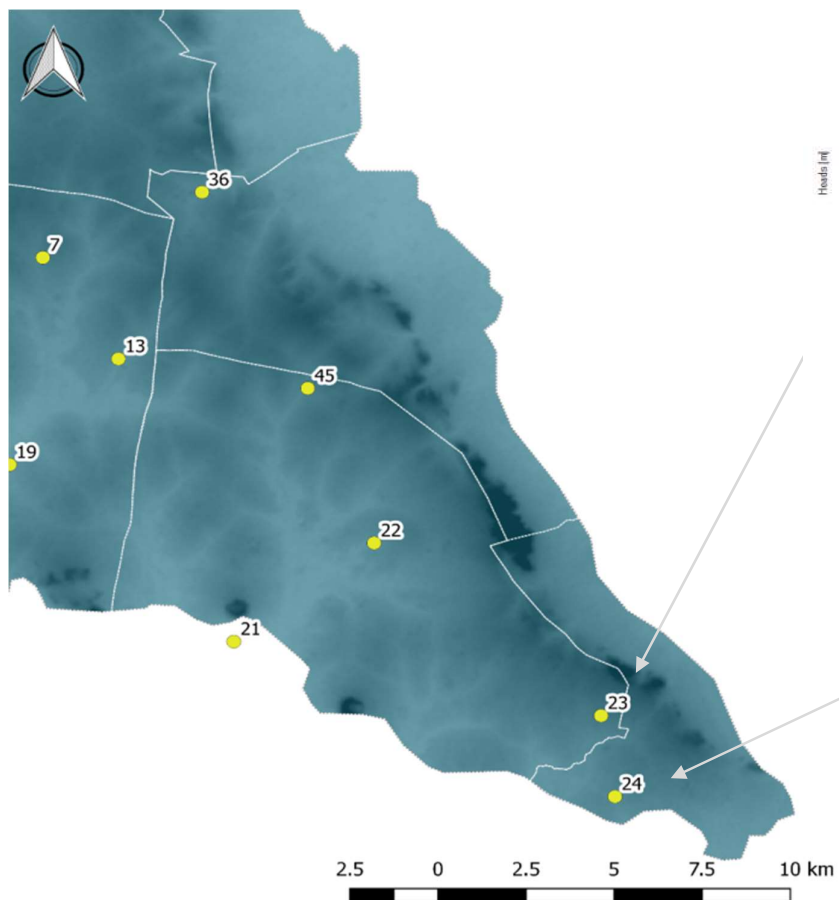
Se puede apreciar que todos los sectores presentan puntos con una buena calibración tanto a nivel de valor absoluto como por la evolución y el rango de variación de los niveles.

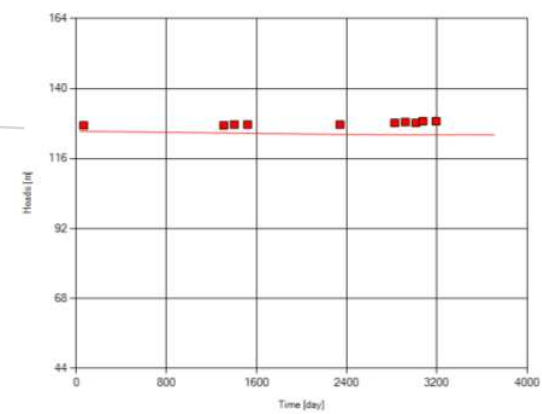
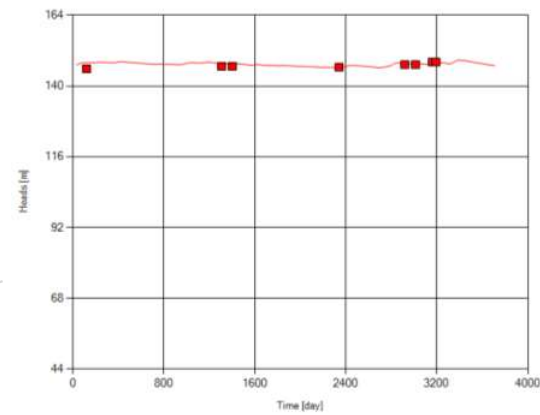
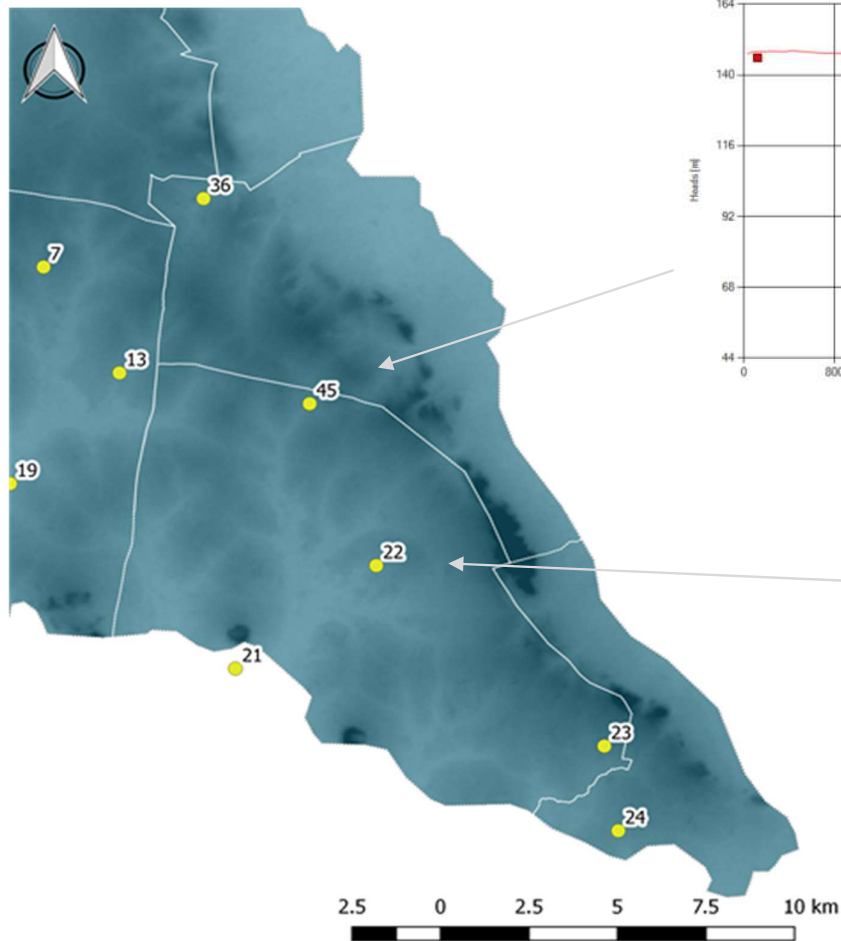
Los puntos más conflictivos se tratan a continuación y se propone una valoración de los posibles motivos de la desviación mostrada.

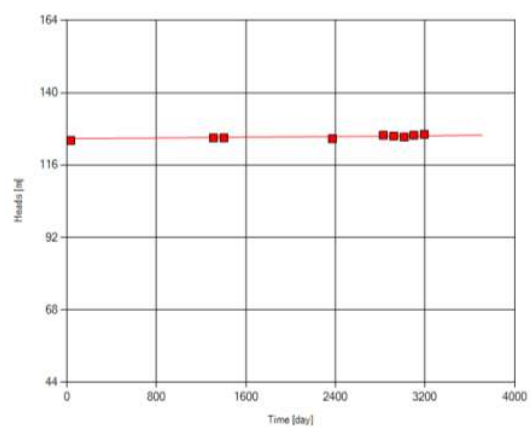
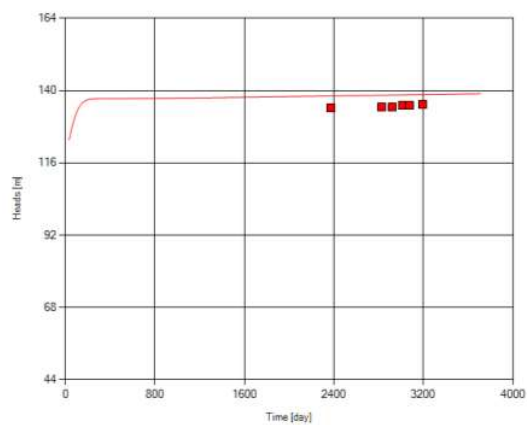
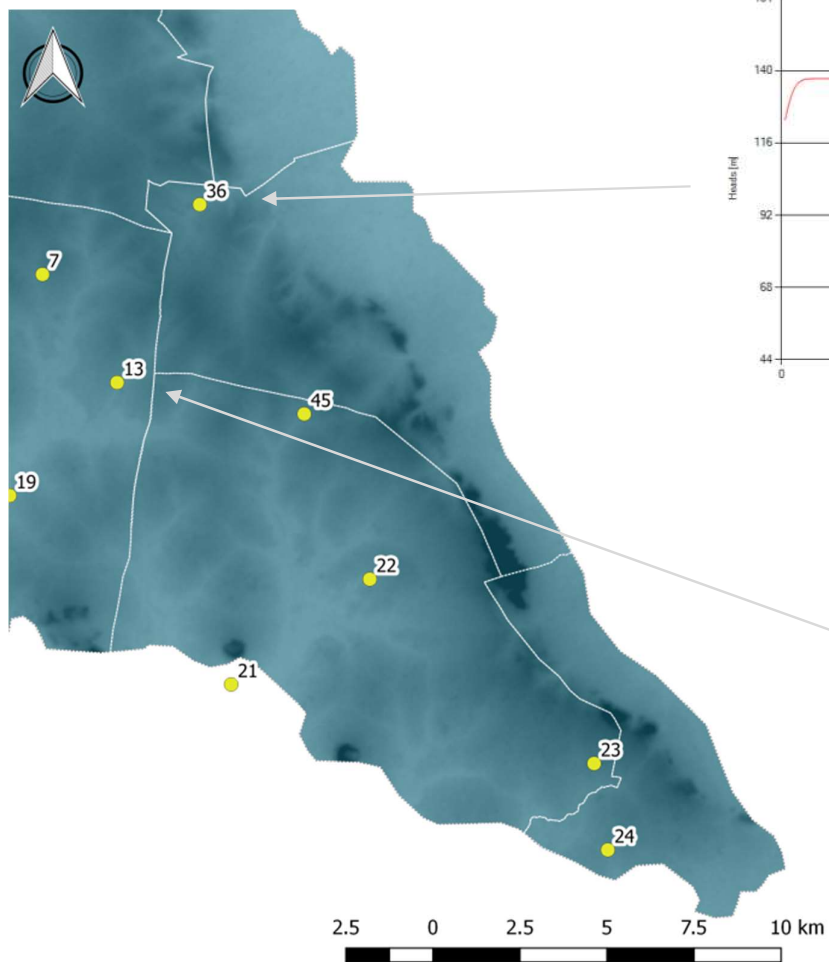
Punto 16 – Este punto presenta una buena evolución, pero situada muchos metros por encima de la medida. Se produce un equilibrio respecto a la piezometría inicial que eleva los niveles. El punto más próximo (17) también presenta residuales positivos. Es posible que en esta zona existan explotaciones desconocidas o drenajes de algún tipo que depriman los niveles. Estas explotaciones podrían situarse en la zona de cabecera, en Fernando de la Mora y el sur de Asunción. Otros factores a considerar podrían ser un drenaje muy elevado en el arroyo Mbocayaty y el de Villa Elisa.

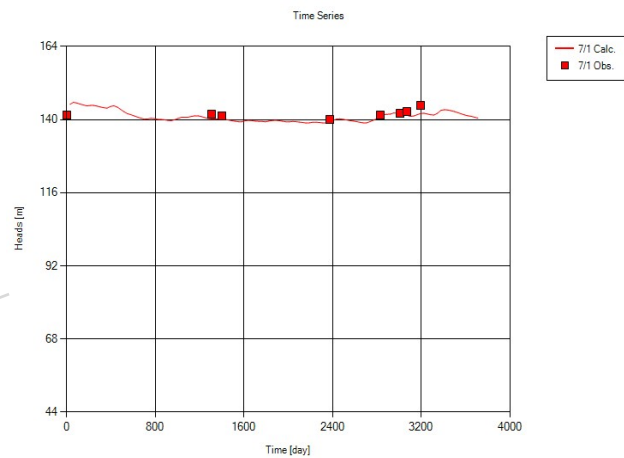
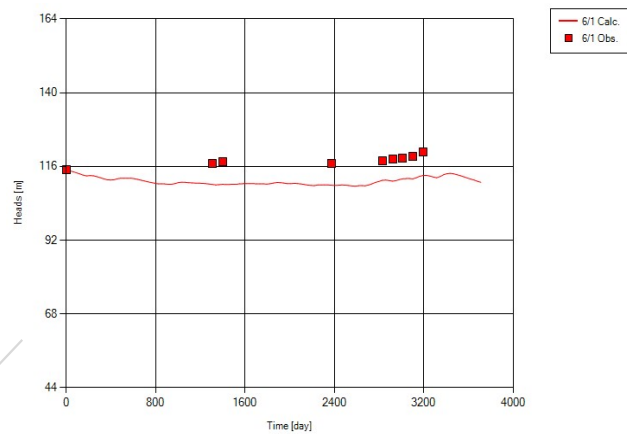
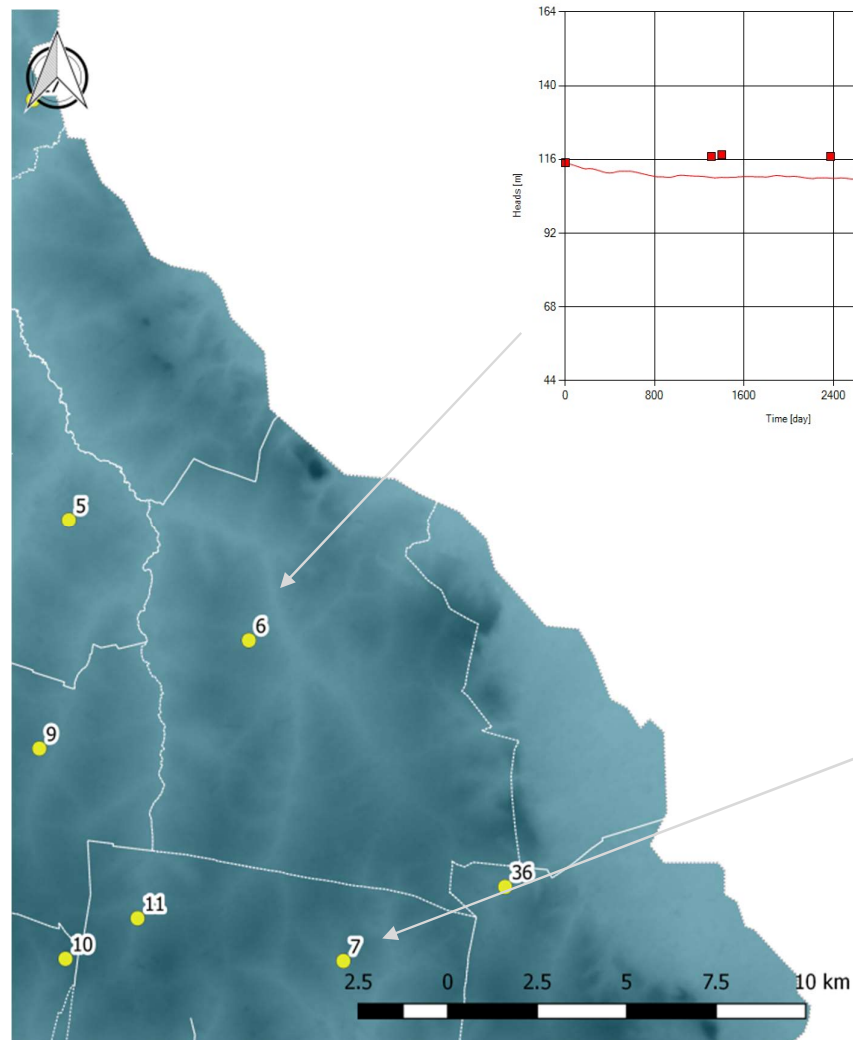
Punto 5 – En la cuenca de Yukyry este punto y el punto 6 en menor medida establecen el equilibrio por debajo de los valores medidos. Si observamos otros puntos de esta zona central del acuífero Patiño (punto 2 y el punto 10 en especial) parece que en determinadas situaciones el equilibrio entre las extracciones y la recarga podría estar siendo deficitario. Las pruebas respecto al drenaje forzado por los ríos no modifican de manera sensible esta situación.

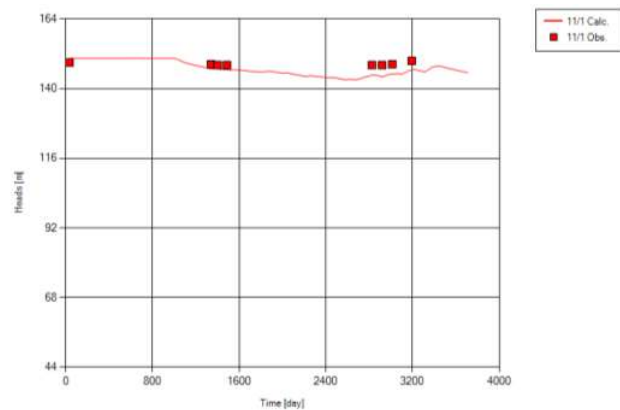
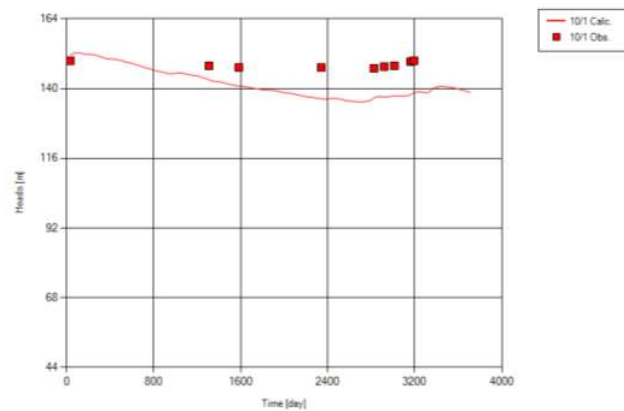
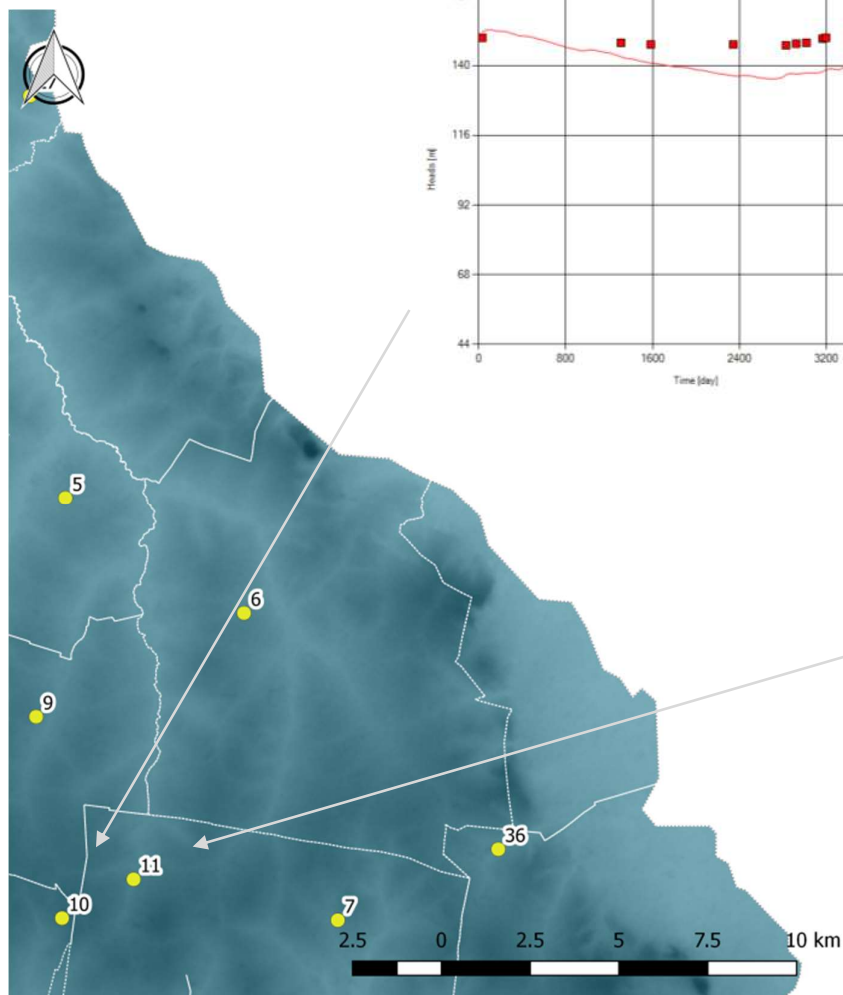
Punto 40 - Este es el único punto con una clara evolución de descenso. El modelo no es capaz de reproducirla. En el contexto de la calibración y el modelo conceptual parece claro que existen explotaciones locales de mayor intensidad que las consideradas en el acuífero.

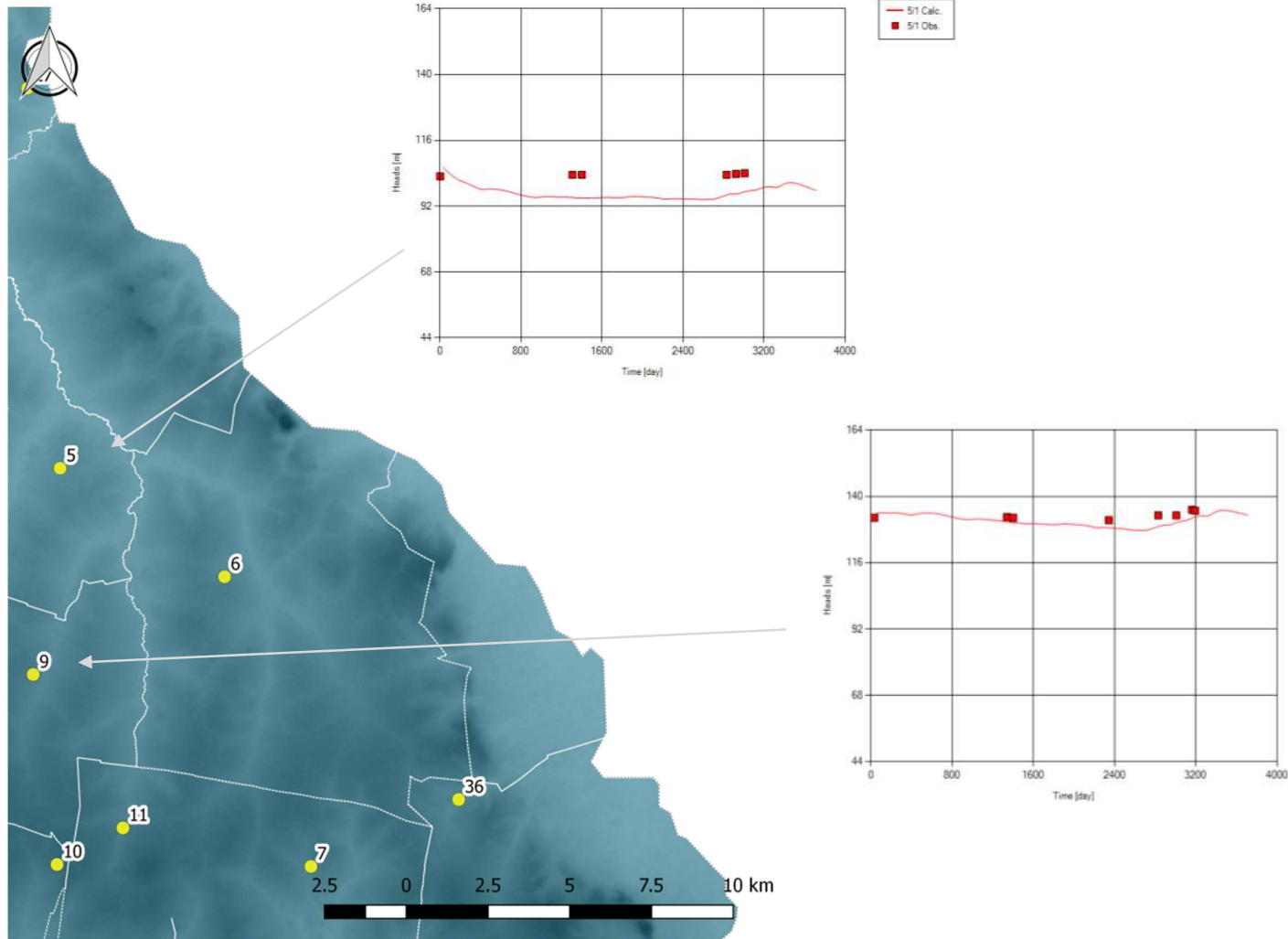


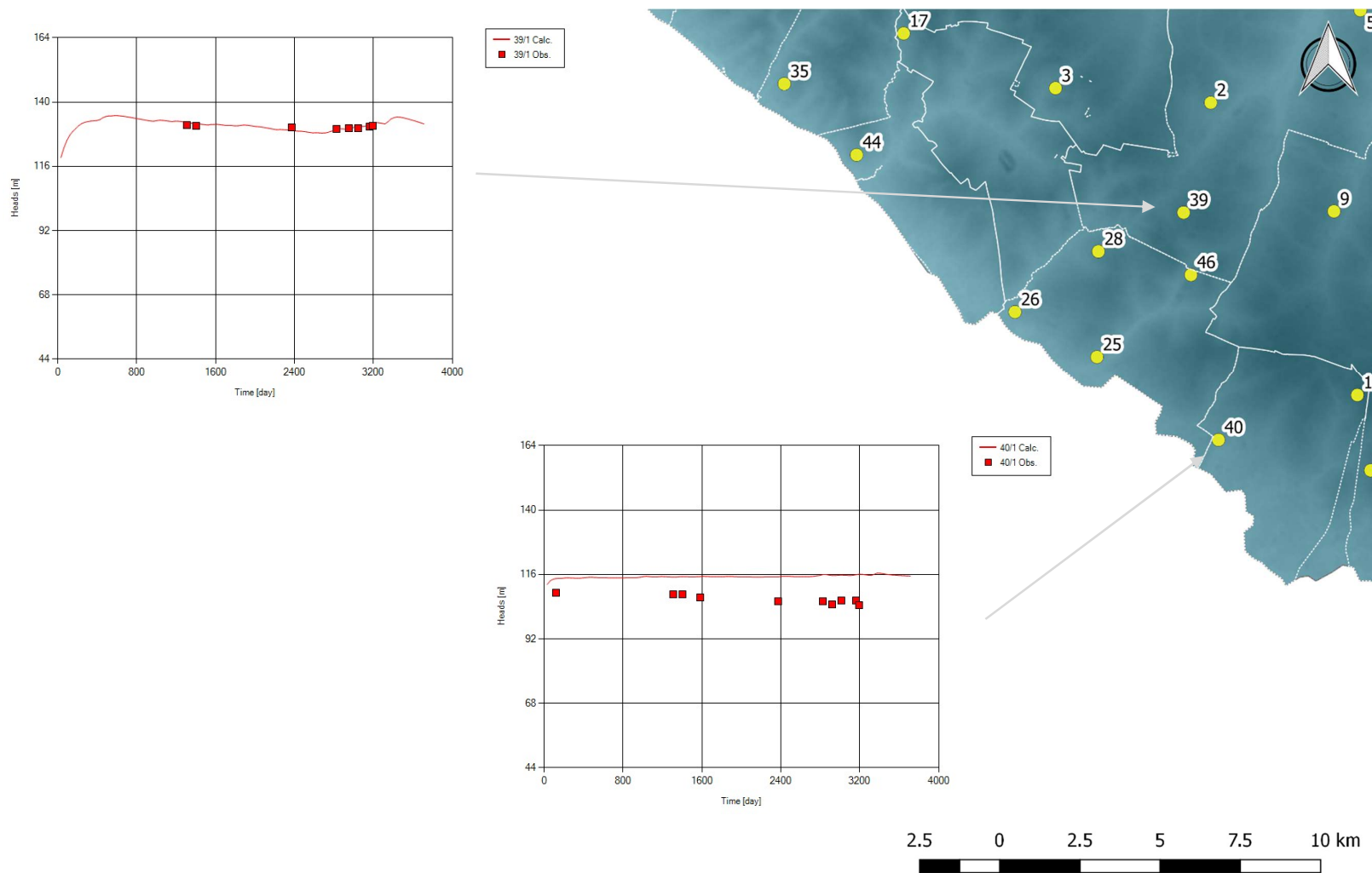


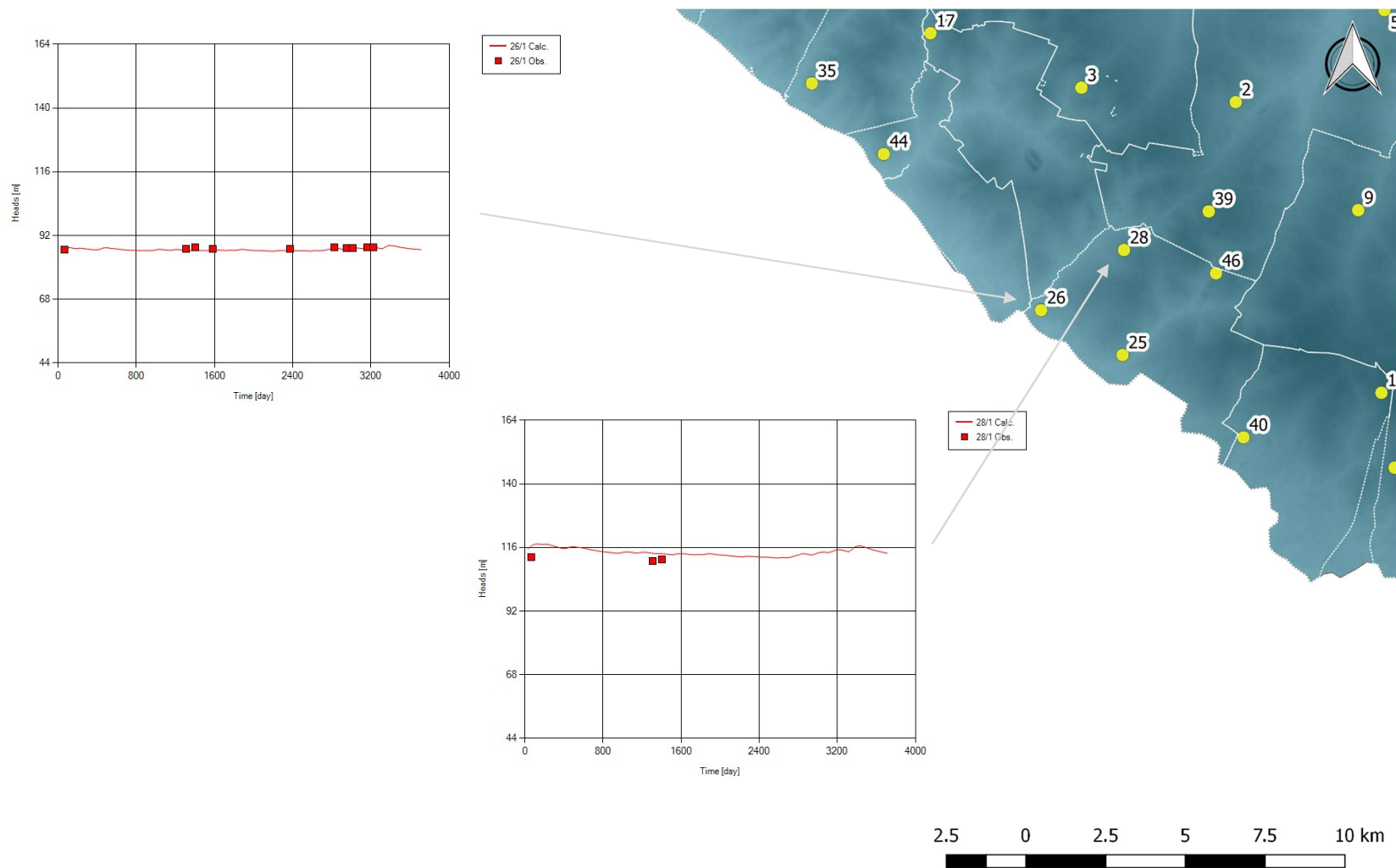


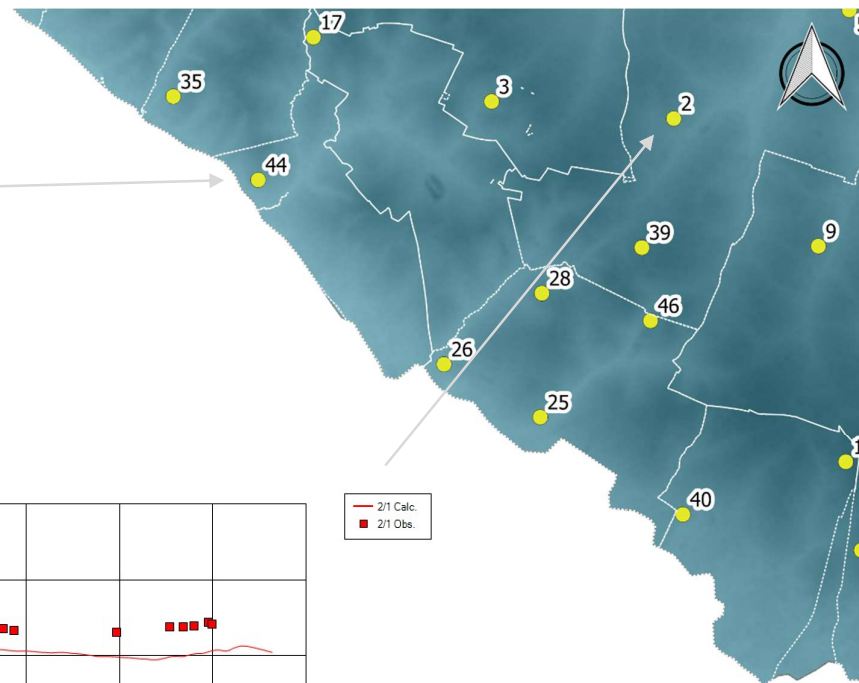
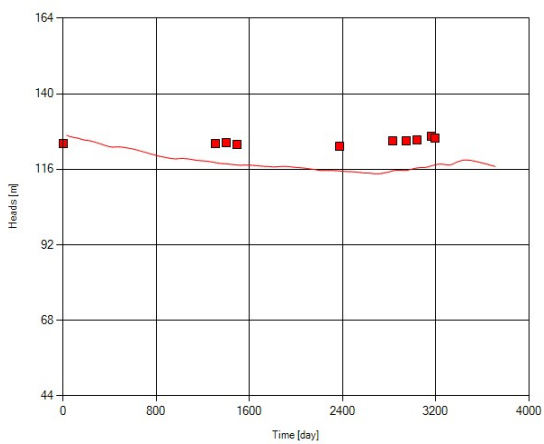
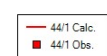
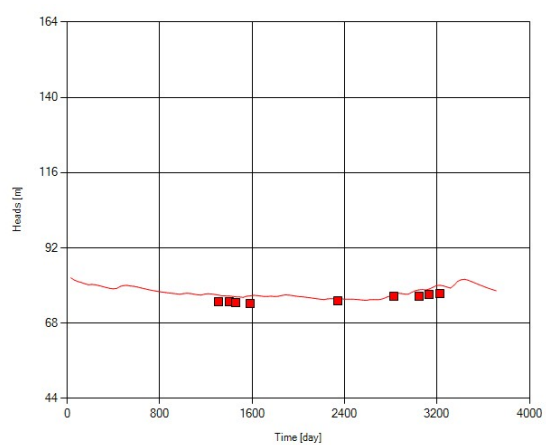


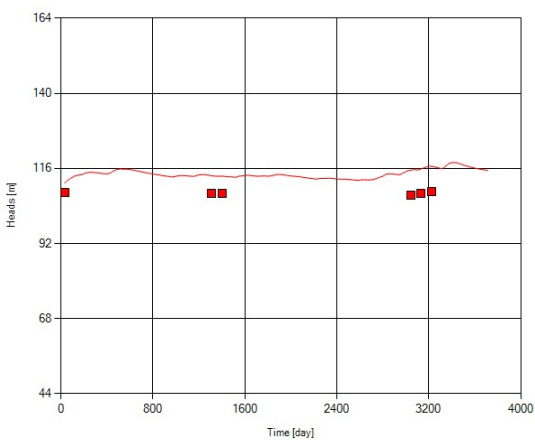
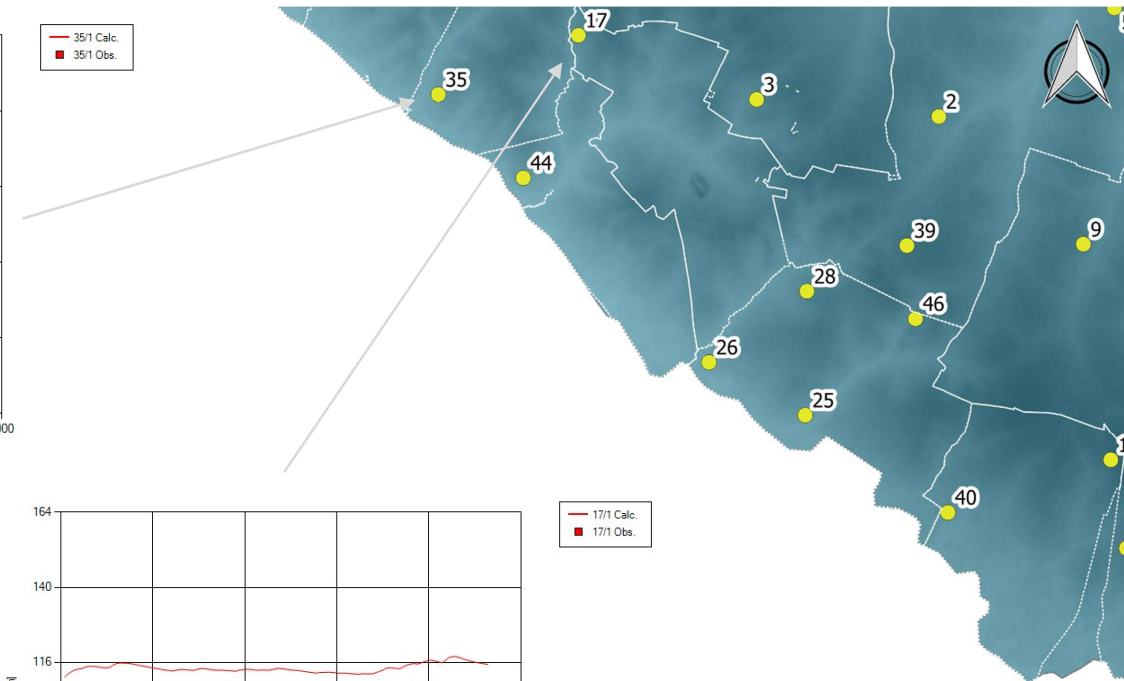
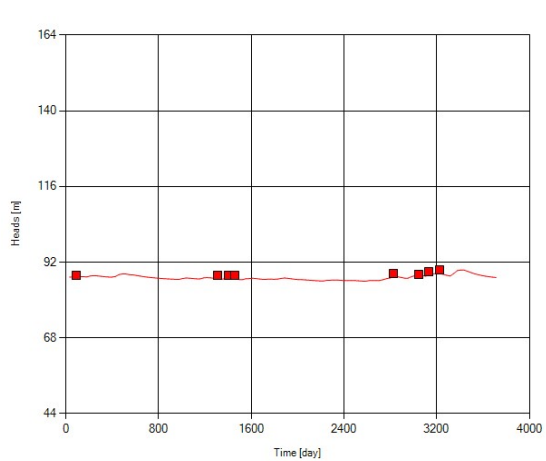


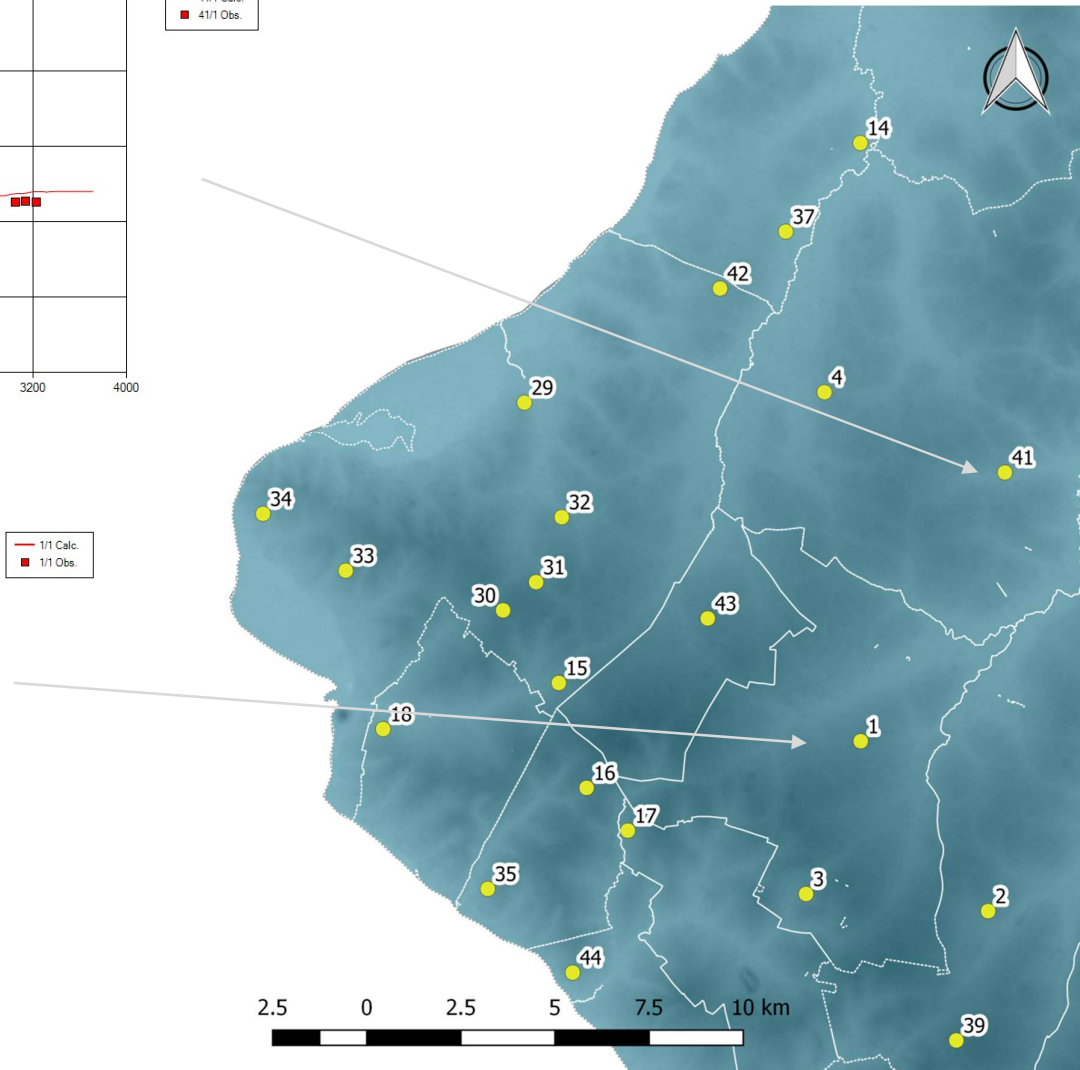
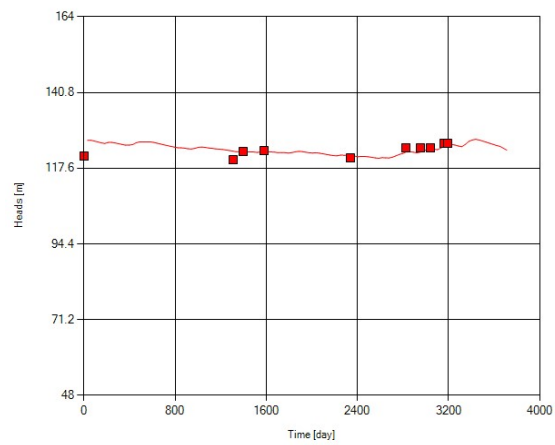
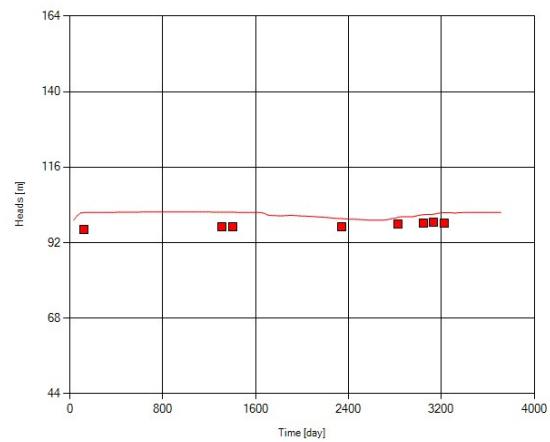


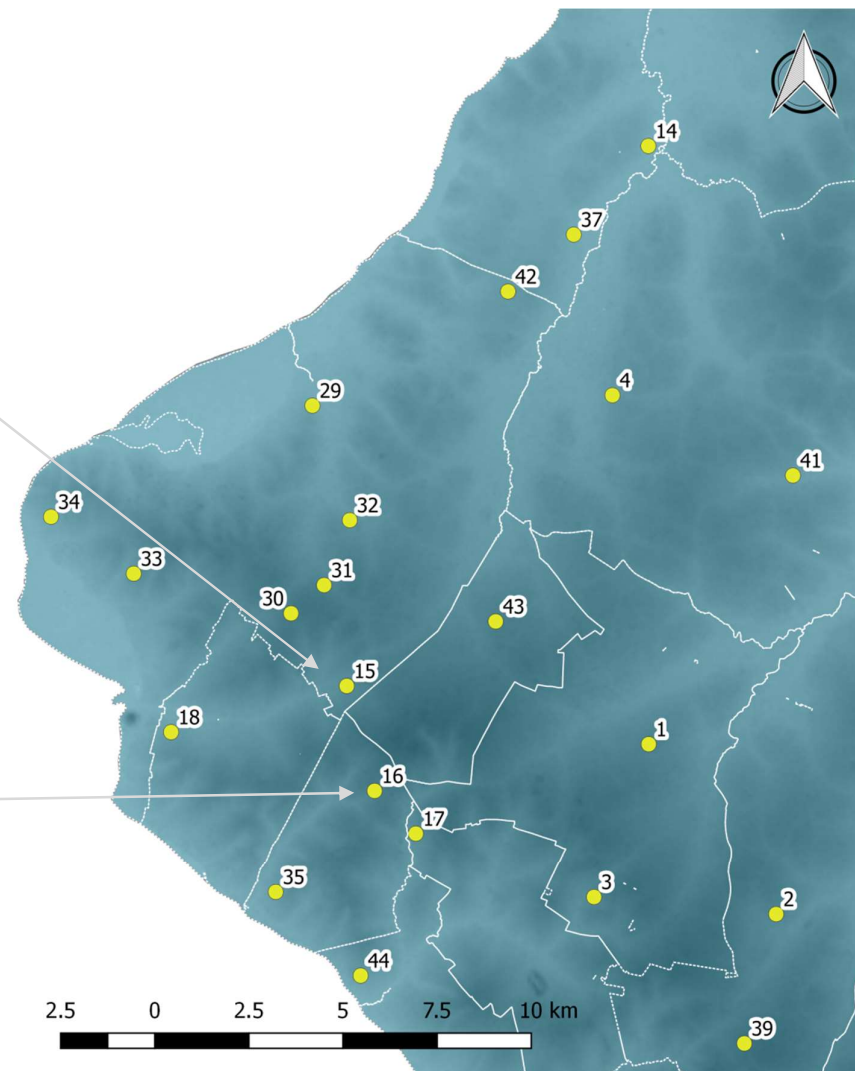
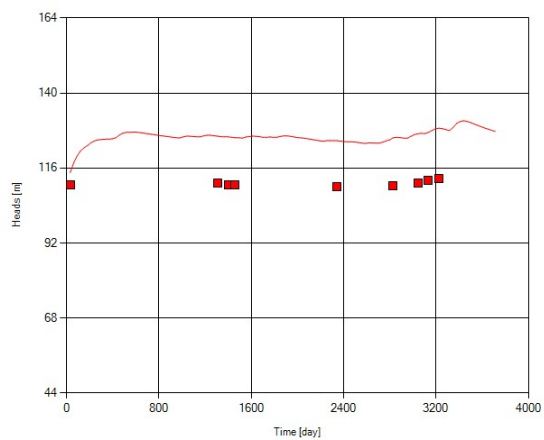
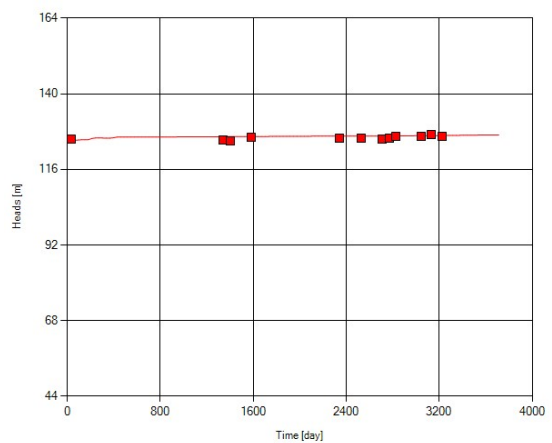


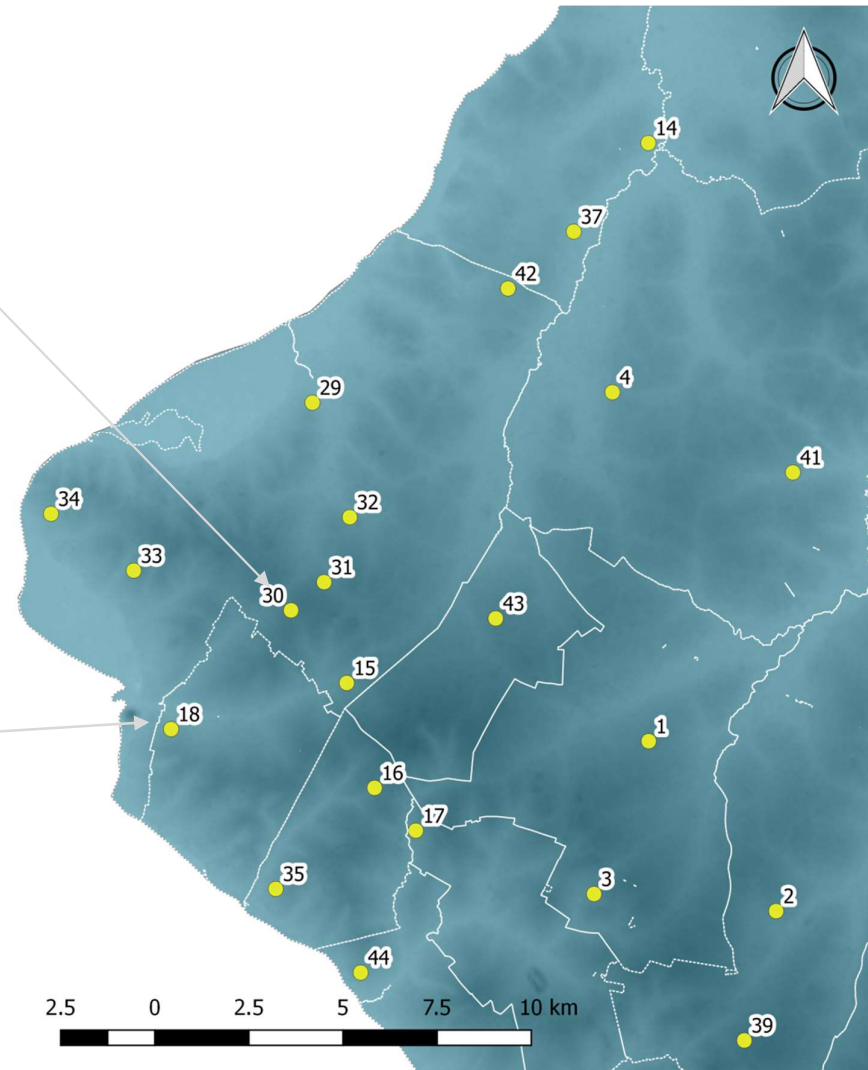
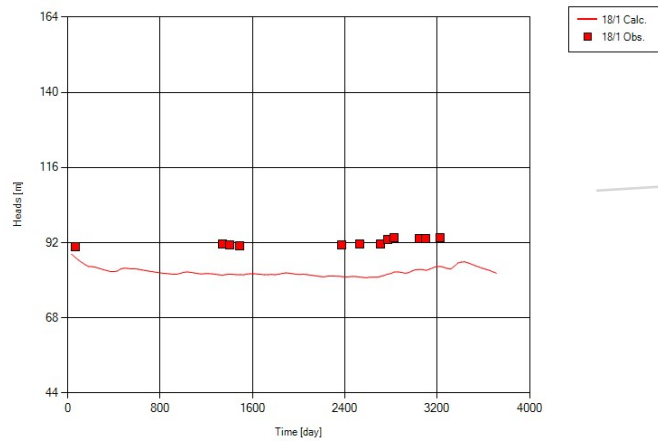
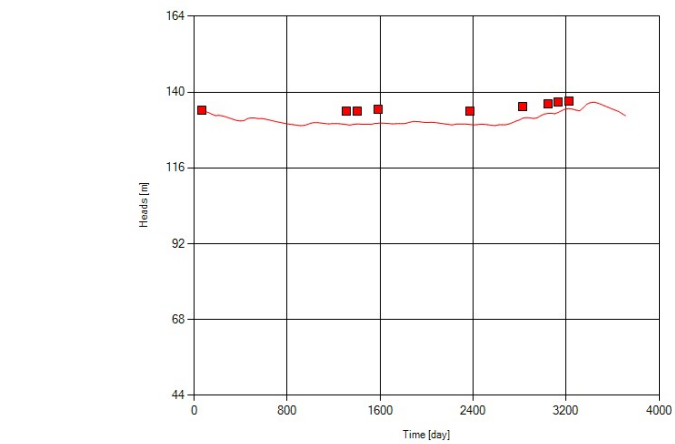


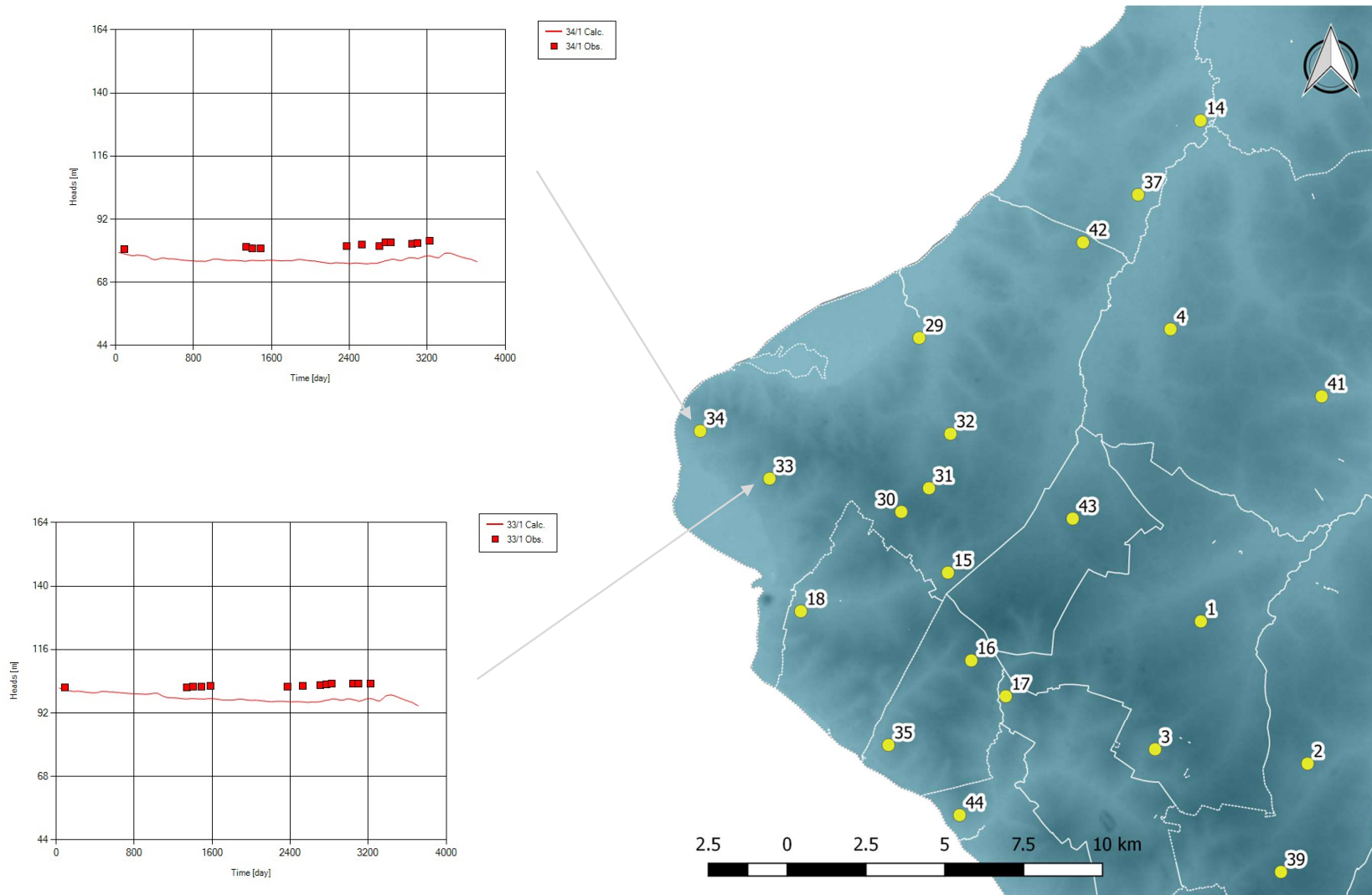


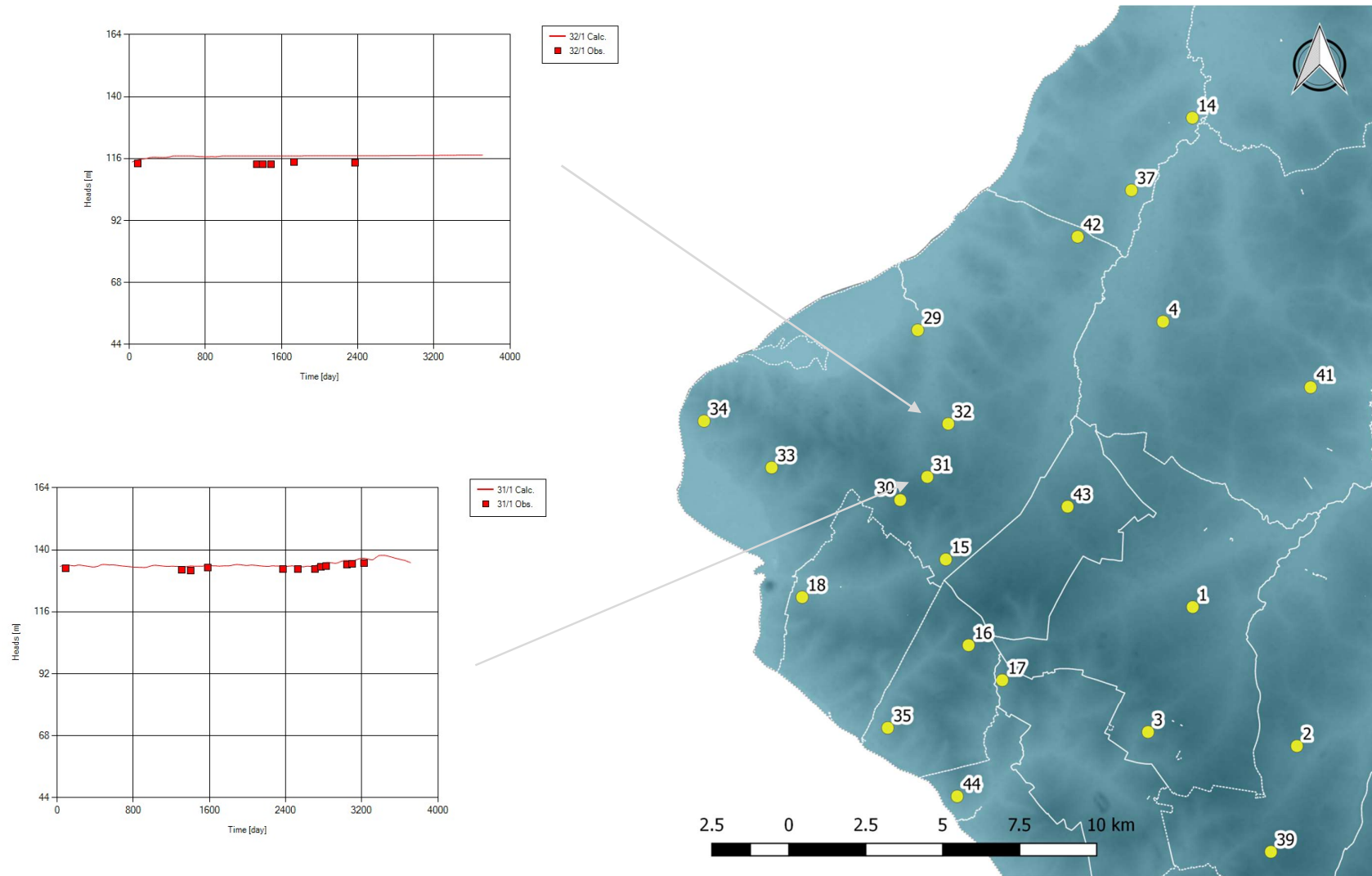


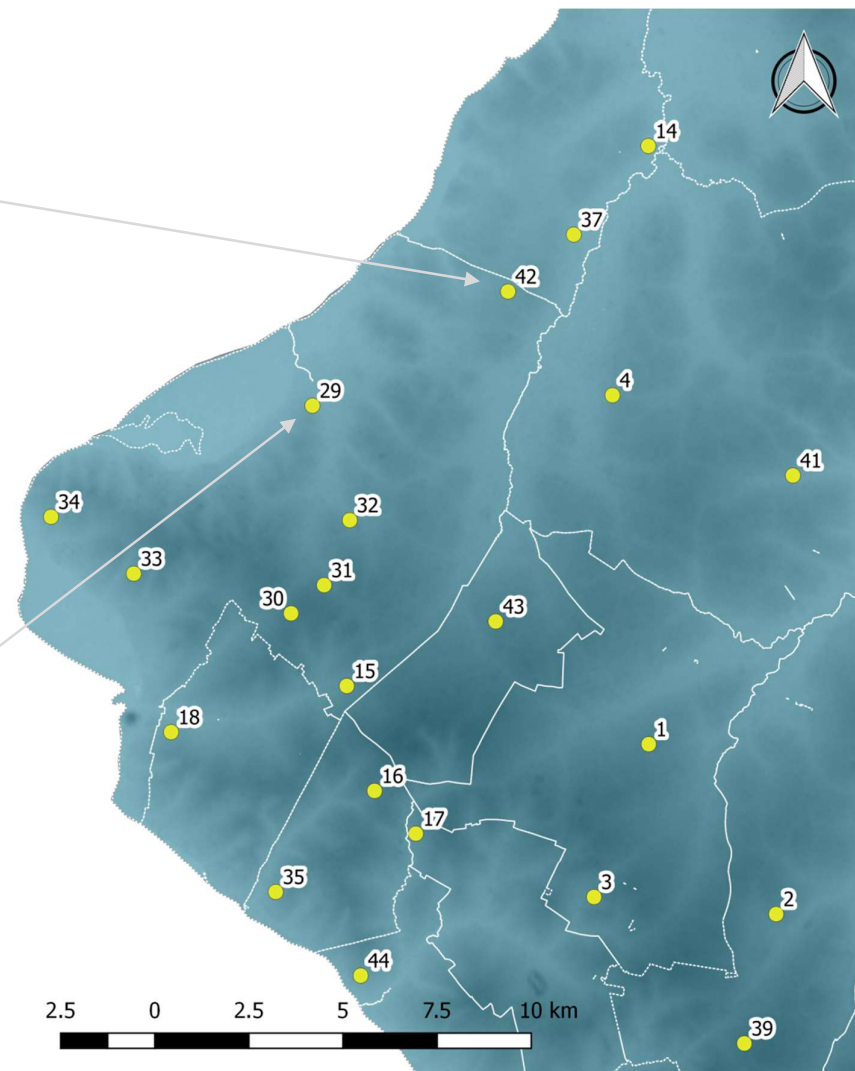
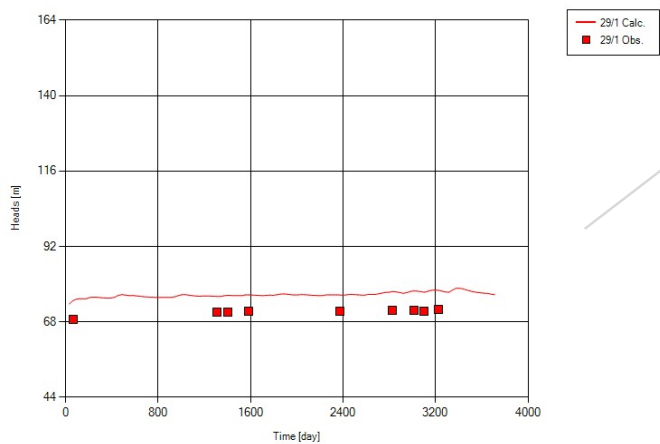
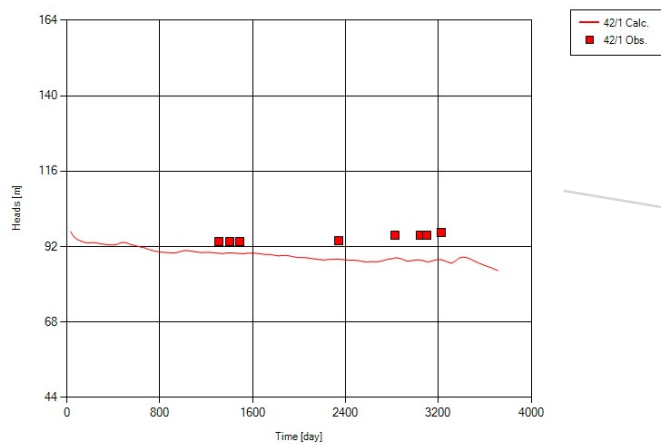


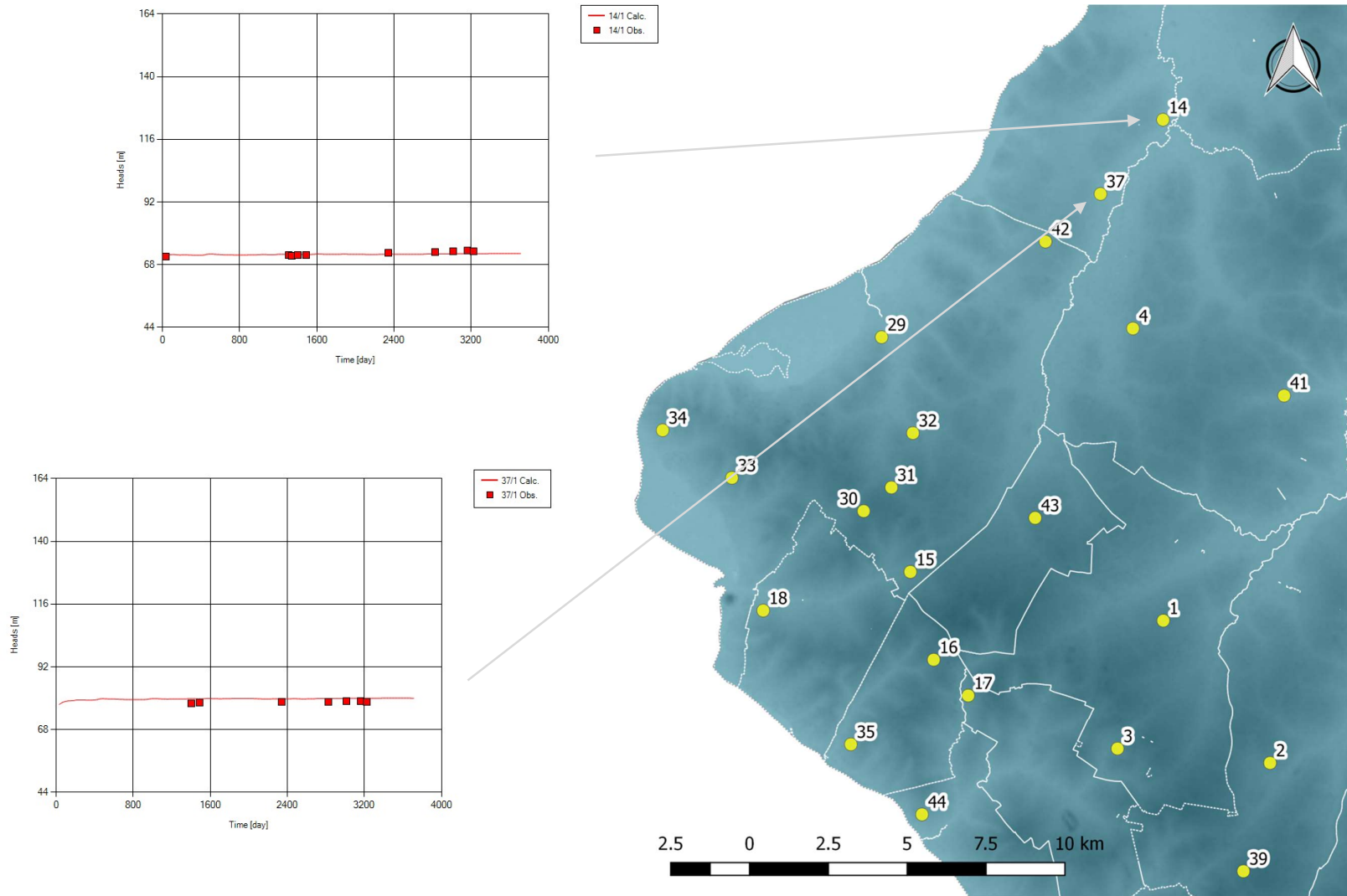


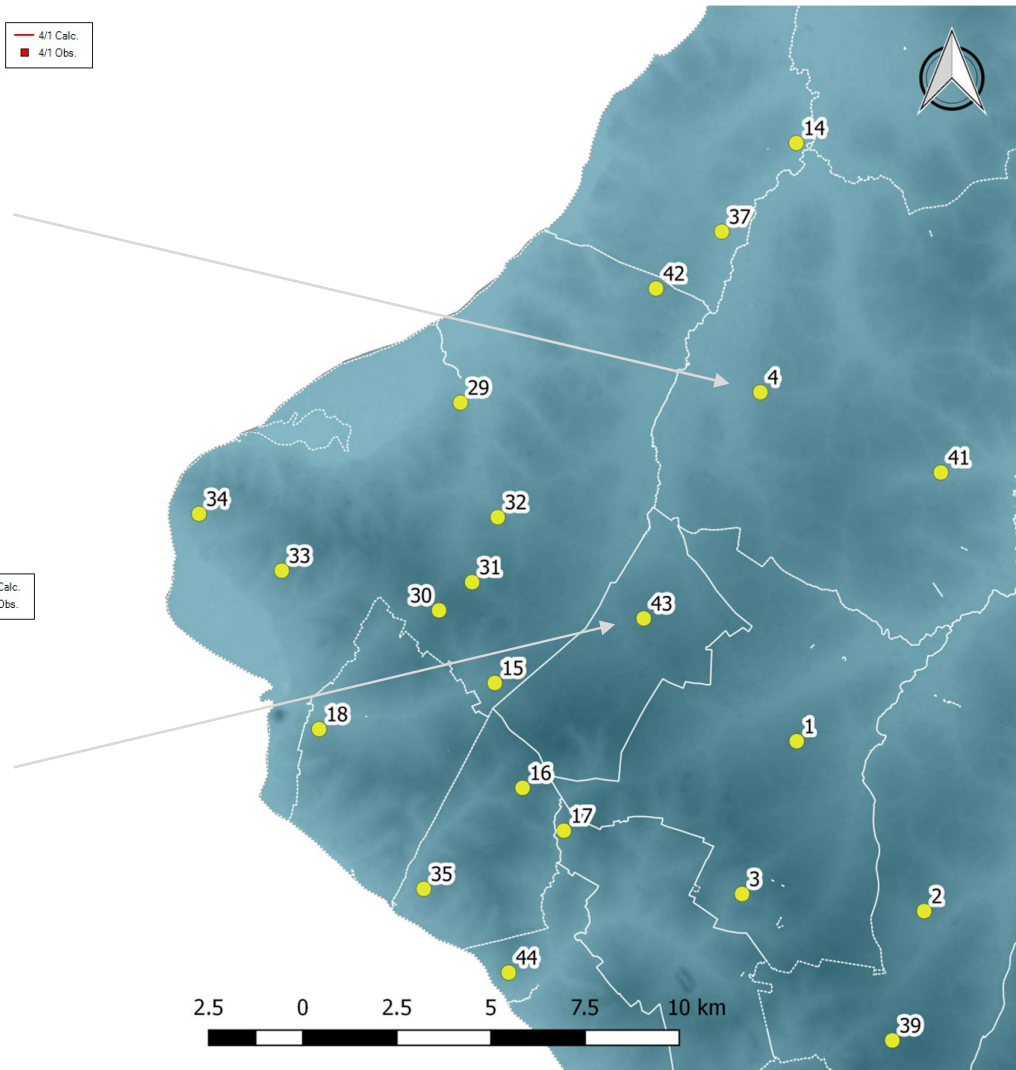
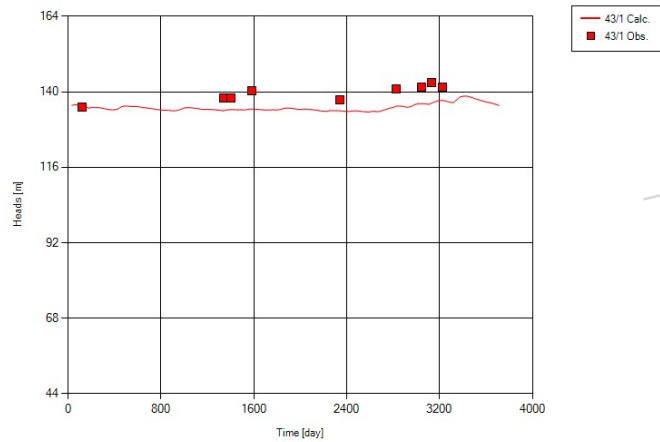
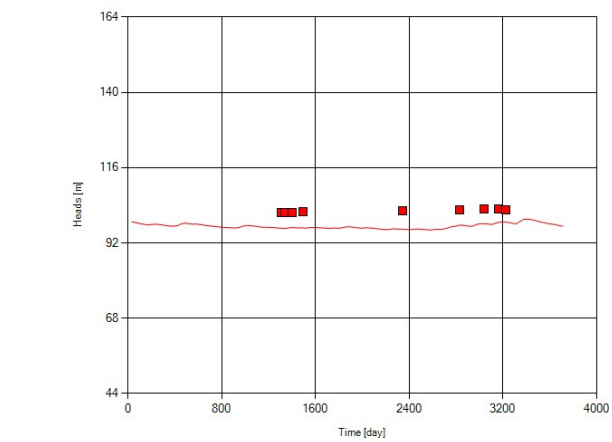


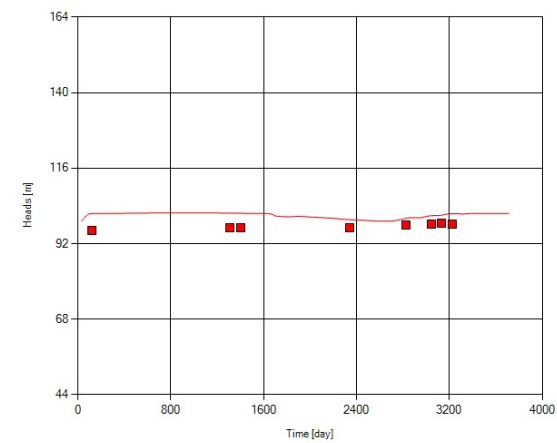
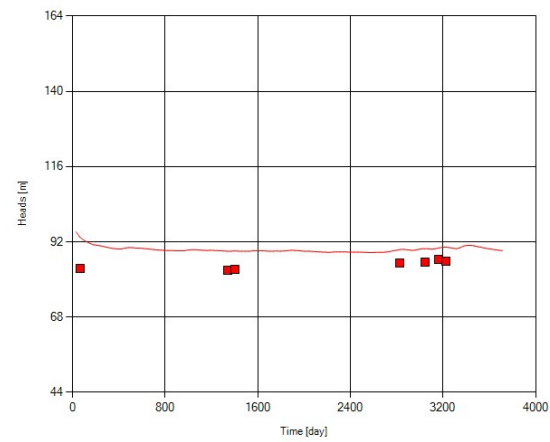
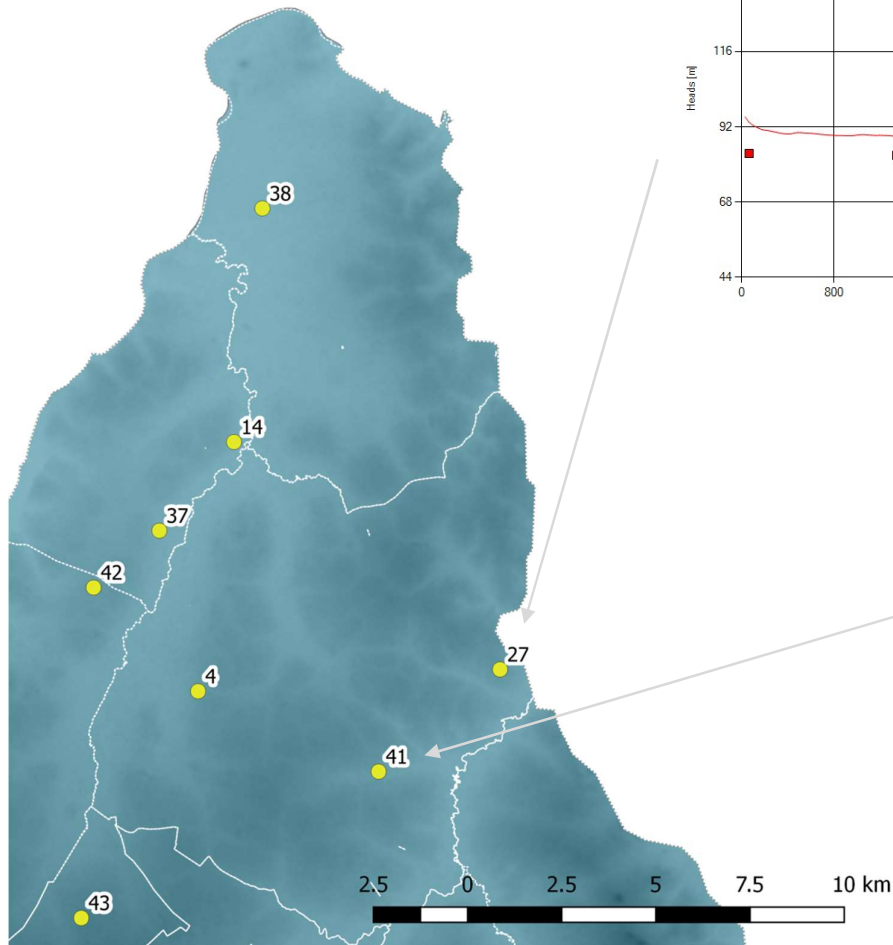


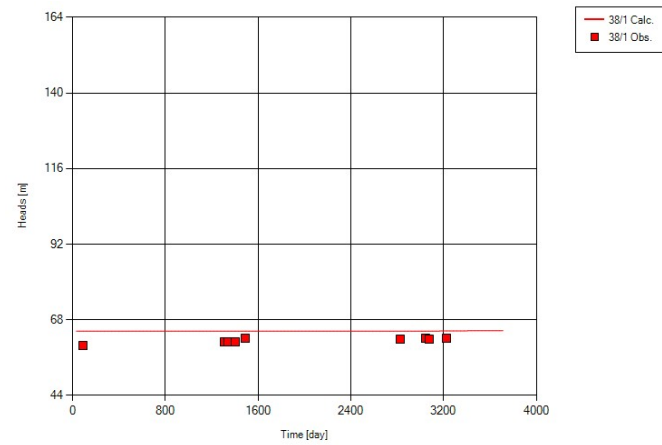
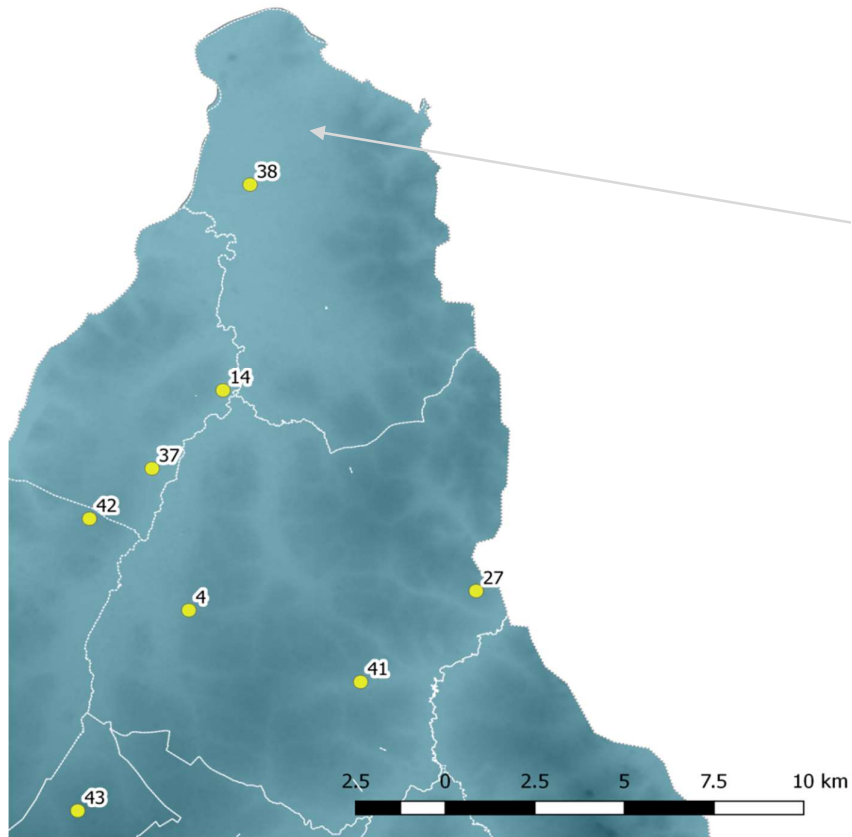












4.7.4 Verificación

Para obtener una coherencia entre los caudales obtenidos por el conjunto de drenes de la cuenca del Yukyry y los caudales base del modelo superficial se han tenido que aumentar las conductancias de los cursos principales en esta cuenca, pero no se ha tenido que modificar la recarga.

El valor promedio del drenaje del Yukyry en el modelo es de $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Presenta una oscilación menor que la prevista por el modelo de aguas superficiales. Cabe recordar que el modelo simula estrictamente el drenaje por conexión hidráulica y no flujos subsuperficiales y almacenamientos en ribera por lo que es esperable una mayor suavidad en las oscilaciones que tiene relación directa con el aumento de gradiente hidráulico que produce la recarga y es un fenómeno de menor velocidad.

Para que exista en el modelo una falta de equilibrio entre el caudal drenado y el acuífero. El modelo, en otros ámbitos se considera claramente equilibrado a partir de los 1000 días de cálculo. No existen datos reales medidos en el Yukyry más modernos que el 2007 por lo que no sabemos si esta tendencia al decrecimiento del caudal interrumpida por los episodios de lluvia es coherente con la realidad o un efecto numérico del modelo a revisar. No obstante, como se aprecia en la Figura nº46, el modelo superficial calcula valores de caudal mucho menores para el período 2008 – 2013.

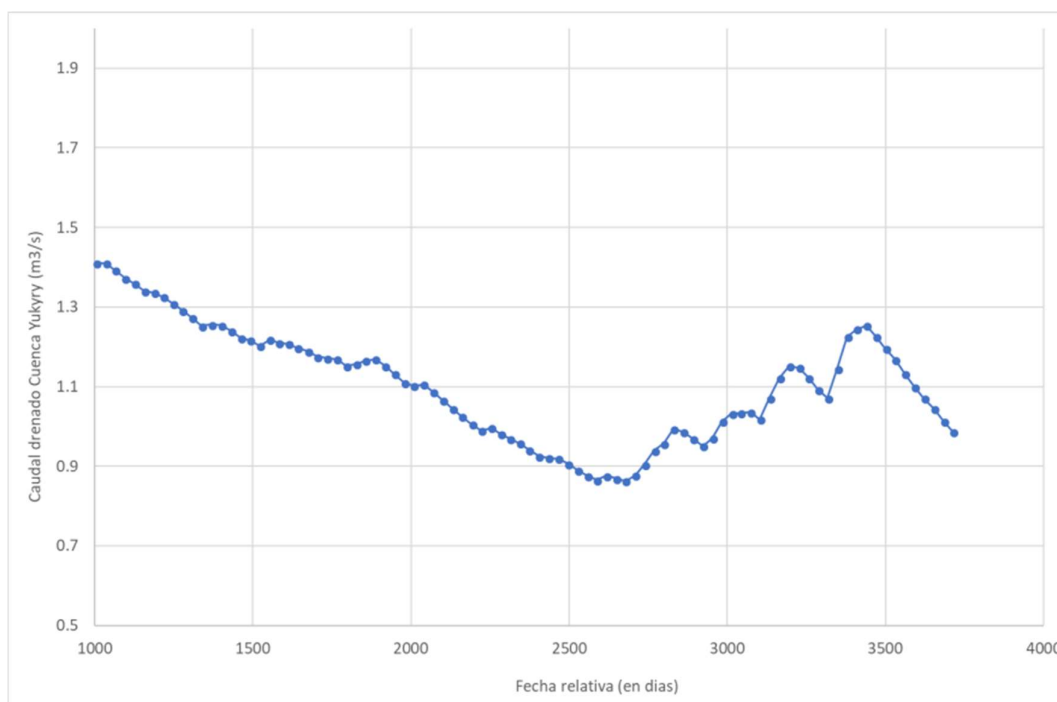


Figura nº46. Evolución del caudal en la cuenca del Yukyry. Modelo numérico.

El caudal drenado por el Yukyry corresponde aproximadamente a un tercio del total drenado por los ríos en todo el dominio, valor que se considera coherente por su extensión y las características hidrológicas de las diferentes cuencas.

5 RESULTADOS OBTENIDOS

El resultado del modelo muestra que en el período 2006 – 2016 ha habido un aumento neto en el almacenamiento del acuífero, como muestran, de hecho, las evoluciones piezométricas.

Se puede asumir que, de forma promedio, en los últimos seis años el balance del acuífero es el que se resume a continuación:

Los parámetros de entrada son:

- Recarga – 709.110 m³/día

Los parámetros de salida para el período han sido:

- Salidas hacia el río Paraguay – 37.500 m³/día
- Extracciones – 248.900 m³/día
- Drenajes por ríos y arroyos – 372.300 m³/día

La variación del almacenamiento se sitúa en torno a los 50.000 m³/día para todo el acuífero.

Expresado en hm³ los valores característicos del balance en el acuífero Patiño se pueden resumir en el esquema de la Figura nº47.

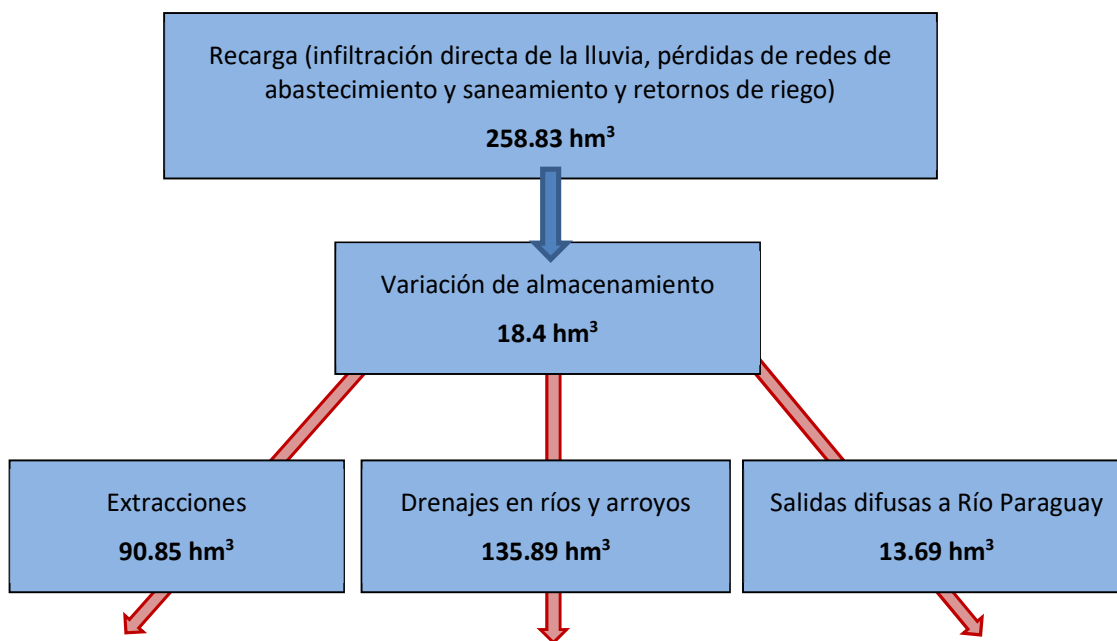


Figura nº47. Balance hídrico del Acuífero Patiño

En la Figura nº48 se muestra la evolución a lo largo de los últimos seis años de la simulación, no influenciados por posibles efectos espurios de equilibrio entre condiciones iniciales y contornos.

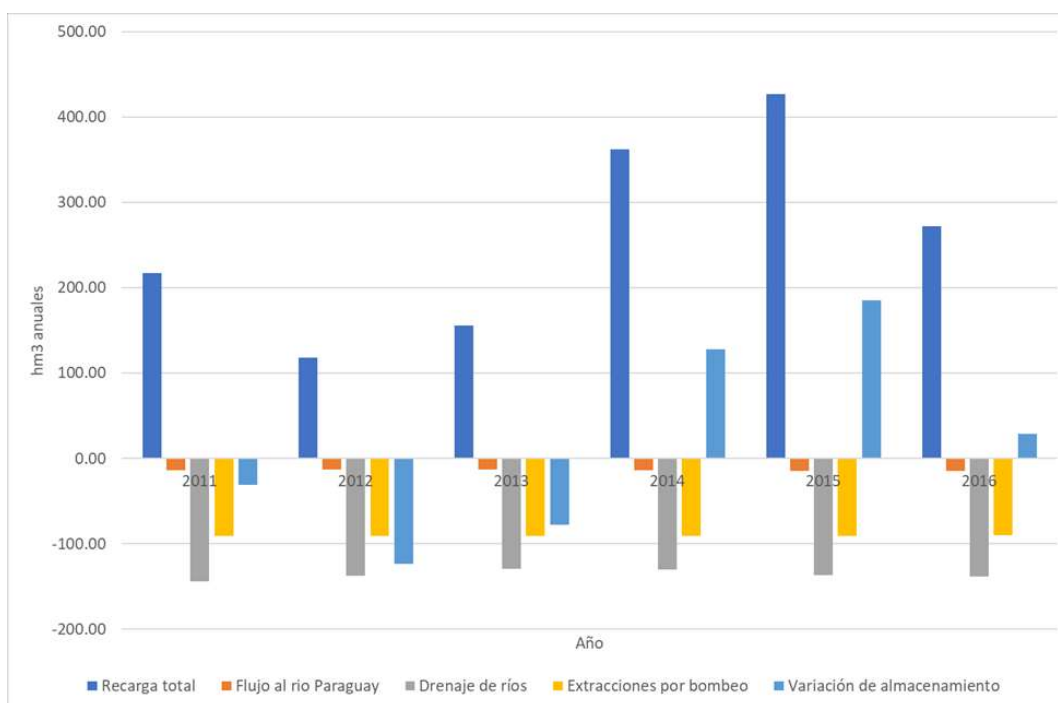


Figura nº48. Balance hídrico en los últimos seis años (2011 – 2016) según los resultados del modelo numérico de flujo.

6 MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS

Una vez desarrollado y calibrado el modelo de flujo se está en condiciones de abordar la modelación de transporte de solutos que permite el estudio de una gran diversidad de problemas como por ejemplo la intrusión de agua salada. Los modelos de transporte deben desarrollarse siempre a partir de un modelo de flujo, el cual ya aporta la información de la estructura del flujo y su evolución temporal.

6.1 Generalidades

Cuando un contaminante llega al agua subterránea, generalmente en disolución, se pueden producir diversos procesos. Por lo general, se distinguen 2 tipologías:

- **Transporte conservativo (o no reactivo):** no existe ninguna interacción con el medio geológico. El soluto se mueve arrastrado por el propio flujo subterráneo. La concentración máxima del soluto se va reduciendo debido a la dispersión a la que está sujeta y el tiempo total en que pasa la sustancia. En este caso, los factores que intervienen en el transporte y distribución de los contaminantes son la advección, difusión y dispersión.
- **Transporte reactivo:** se producen interacciones entre las sustancias en dilución y el medio geológico. En este caso se estudian procesos de adsorción, precipitación o reacciones químicas. Lógicamente, estos procesos son de mayor complejidad que los anteriores ya que pueden darse de manera individual o conjuntamente.

En este caso el modelo de transporte utilizado es el conservativo ya que resulta más adecuado para obtener un resultado confiable con los datos disponibles.

6.1.1 Advección

La advección es el arrastre de la sustancia por el agua. Si solo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada por éste sería constante. En un medio poroso saturado este es el factor predominante, es decir, en acuíferos de materiales muy porosos, los contaminantes se mueven de manera similar al flujo de agua subterránea.

El flujo de masa a través de una sección perpendicular al flujo es:

$$F = C * V_x$$

Donde,

F = flujo de masa por unidad de sección y por unidad de tiempo

C = concentración del soluto

V_x = velocidad del fluido

6.1.2 Difusión

La difusión se produce debido a movimientos aleatorios del agua y a movimientos de la sustancia desde un lugar donde su concentración es relativamente alta hacia otro donde esta concentración es menor por un movimiento aleatorio de las moléculas.

Las sustancias disueltas se mueven por un gradiente de concentraciones y el flujo de masa está regido por la primera ley de Fick:

$$F = -D_m * \frac{dC}{dx}$$

Donde,

F = flujo de masa por unidad de tiempo y por unidad de sección perpendicular al flujo

Dm = coeficiente de difusión

C = concentración

dC/dx = gradiente de concentraciones entre dos puntos situados a una distancia dx

6.1.3 Dispersión

La dispersión mecánica es la provocada por el movimiento de fluido a través del medio poroso. Este tipo de dispersión se produce en el sentido del flujo (longitudinal) y lateralmente (transversal). La dispersión longitudinal es debida a que moléculas que encuentran caminos más tortuosos se retrasan y las que encuentran caminos más anchos avanzan más rápido. La dispersión transversal se debe a la bifurcación de caminos que encuentra el fluido. En cualquier caso, la dispersión longitudinal es siempre mayor que la transversal, con lo cual la pluma contaminante siempre tenderá a adquirir una forma alargada en el sentido del flujo.

La capacidad del medio para dispersar mecánicamente un fluido es el denominado coeficiente de dispersividad mecánica (α).

La dispersión mecánica será el producto de este coeficiente por la velocidad del flujo.

$$\text{Dispersión} = \alpha * v$$

Donde,

α = coeficiente de dispersividad mecánica

v = velocidad del flujo

La dispersión hidrodinámica es la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica ya que ambos fenómenos no pueden considerarse aisladamente. Para tomarlos en consideración de un modo conjunto se establece un coeficiente de dispersión hidrodinámica D:

$$D = \text{dispersión mecánica} + \text{coeficiente de difusión efectiva}$$

Si no existieran difusión ni dispersión, el tiempo de llegada podría calcularse conociendo la velocidad lineal media y la longitud del recorrido. Pero en la realidad, y debido al efecto de la dispersión hidrodinámica, la llegada del soluto es gradual. En estas condiciones, la concentración a una distancia x, y en un tiempo transcurrido t puede calcularse mediante la ecuación de Ogata-Banks.

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} * \left(\operatorname{erfc} \left[\frac{(x-vt)}{2(Dt)^{1/2}} \right] + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{(x+vt)}{2(Dt)^{1/2}} \right] \right)$$

Donde,

D: coeficiente de dispersión hidrodinámica

erfc: función del error complementario

v: velocidad lineal del agua subterránea.

6.2 Hipótesis planteadas

Tal como se ha indicado en apartados anteriores, el objetivo del modelo numérico de transporte es el de aportar cierta luz, una vez calibrado el funcionamiento hidráulico del acuífero Patiño, respecto a las diferentes teorías del origen de la mayor concentración de cloruros que se observa en la zona norte del acuífero. Las teorías por cotejar son:

- **Hipótesis 1:** El origen se sitúa en el flujo de aguas salinas que podrían provenir desde el Chaco.
- **Hipótesis 2:** El origen tiene lugar en la salinidad congénita de las formaciones deposicionales de origen endorreico que durante el relleno del graven (Mate, 2002).

Se han considerado por lo tanto dos escenarios distintos que respondan a las 2 hipótesis.

- Para la entrada de aguas salinas desde el Chaco se ha considerado flujo con densidad variable y se ha realizado una batería de simulaciones con concentraciones constantes en el contorno a diferentes profundidades.
- Para la simulación de las salinidades congénitas se ha simulado considerando que en la base de la capa inferior del modelo existen concentraciones elevadas de cloruros.

6.3 Condiciones iniciales y fuentes de entrada de los elementos en el acuífero

Los datos disponibles de concentración de cloruros corresponden a las analíticas realizadas en 2010 en la red de control piezométrico de SEAM por considerarse las más confiables. Otra fuente de información que se planteó son los datos de analíticas realizadas durante los estudios FEHS (2000-2001), sin embargo se decidió no usarlas como condiciones iniciales porque se constató un error de balance iónico demasiado elevado (entre 19% y 53%).

Por lo tanto, con los 26 datos disponibles se ha interpolado una distribución de concentraciones para todo el dominio.

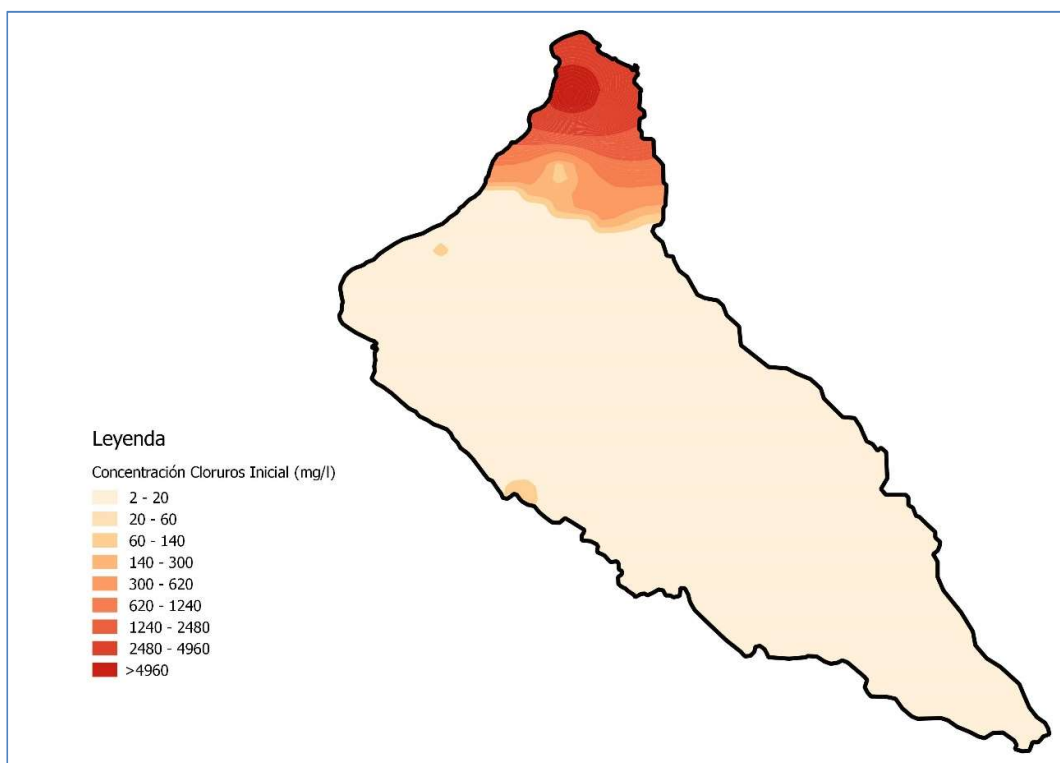


Figura nº49. Concentraciones iniciales de cloruros impuestas al modelo.

La concentración de cloruros aportados por la recarga se define a partir de su valor en el agua de lluvia. Al no disponer de otros datos se ha optado por utilizar las analíticas realizadas en el anexo 9.3 del estudio “Exploración de las lentes de agua dulce en el Distrito de Benjamín Aceval” (BGR, 2010). En este estudio se tomaron 7 muestras de lluvia en Asunción durante los años 2009 y 2010, considerando que la calidad de estas muestras es asimilable a toda la zona del Acuífero Patiño. A partir de estos datos químicos de lluvia se ha establecido un valor máximo de 5 mg/l de cloruros aportados por la recarga. El promedio de los datos disponibles indica una concentración de 0.4 mg/l pero se considera que debe existir una cierta mineralización durante el proceso de infiltración.

En la zona urbana no se dispone de datos sistemáticos de la calidad de las aguas residuales. Los datos utilizados son los resultados del análisis de calidad de agua de los prestadores de agua potable de algunas ciudades del Departamento Central como: Fernando de la Mora, Itá, Lambaré, Luque, Mariano R. Alonso, San Antonio, San Lorenzo y Villa Elisa; realizados por ERSSAN durante el año 2016. A partir de estos datos se ha determinado una concentración promedio 20,13 mg/l y máximas concentraciones de 153 y 212 mg/l. Entendiendo que la recarga urbana es una mezcla de aguas de suministro, de lluvia y residuales y que estas pueden suponer por término medio del orden de 50 mg/l se establece una concentración promedio de 25 mg/l.

En el contorno del modelo para la hipótesis de entradas por el contacto con el Chaco se han considerado dos concentraciones en sendas simulaciones: 1.500 mg/l correspondiente al valor máximo conocido en Benjamín Aceval y 15.000 mg/l para ver si se producían cuñas de intrusión asociadas a la diferencia de densidad.

En la simulación para la hipótesis de salinidad congénita se ha establecido una concentración en la base del acuífero equivalente a la máxima concentración medida, correspondiente al piezómetro de control 38 (Limpio, 5998 mg/l en el año 2010).

Se ha considerado un coeficiente de distribución de $1E-10$ 1/m, una dispersión longitudinal homogénea de 10 m y que no se produce retardo por adsorción.

Se han descartado todas las simulaciones de entrada lateral a través de la formación del Chaco ya que no se dan las condiciones de flujo adecuadas para permitir una entrada importante de cloruros hacia Patiño. La presencia del río Paraguay como divisoria de aguas y la elevada piezometría en la zona de Gran Asunción respecto al Chaco limitan la afectación a una estrecha franja junto al contorno a las profundidades definidas.

Solo se comentan los resultados de la calibración de la hipótesis de salinidad congénita.

6.4 Calibración del modelo de transporte

Los resultados de la calibración no son satisfactorios como se puede apreciar en la Figura nº50 ya que se producen errores importantes en el rango de salinidades de interés. Esto se debe en parte a la definición poco precisa del problema, en especial de las condiciones iniciales que en este caso son determinantes para la correcta calibración. No existe entre los datos de 2010 y los de 2017 una gran variabilidad. El modelo responde bien a ese esquema conceptual, pero lo hace partiendo de concentraciones erróneas y con una tendencia a aumentar las concentraciones pequeñas y a disminuir las grandes como efecto de las concentraciones impuestas en los contornos, que deben tener una distribución menos homogénea en la realidad.

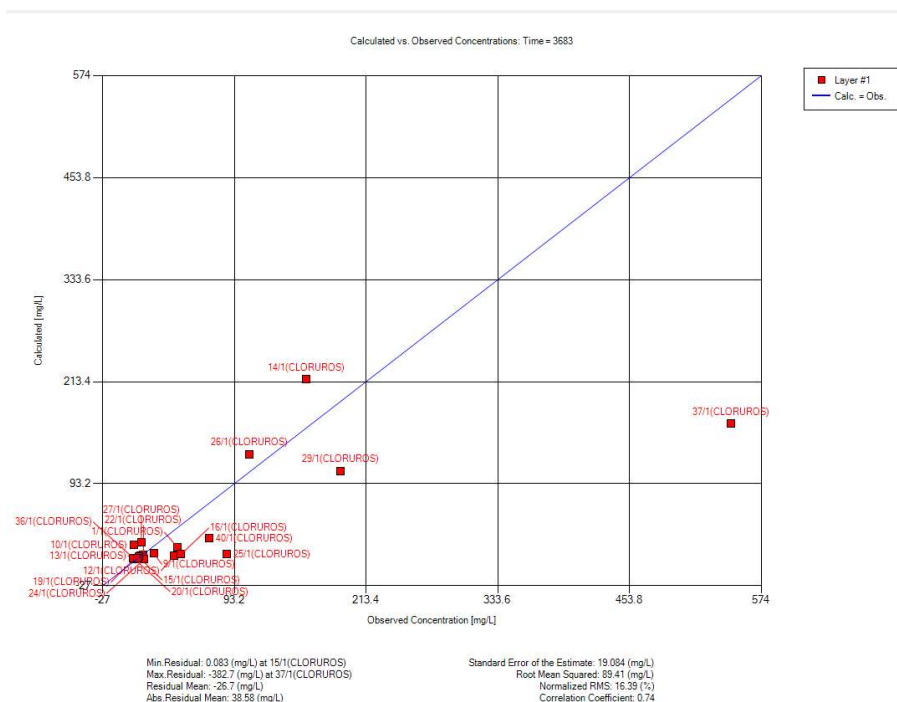


Figura nº50. Resultados de la calibración del modelo de transporte

6.5 Interpretación de los resultados

Se ha realizado una batería de simulaciones de transporte para acotar las teorías que pudieran explicar la presencia de aguas clorurado-sódicas en el entorno de Gran Asunción y todo el contorno norte del acuífero.

La primera hipótesis no ha podido ser validada, ya que las simulaciones realizadas considerando flujo con densidades variables, concentraciones constantes en el contorno y diferentes profundidades no han mostrado las condiciones de flujo adecuadas para permitir una entrada importante de cloruros hacia Patiño. Esto indicaría que no se comporta como un sistema mar/tierra y que el hecho de explotar una cantidad más o menos importante de agua no afectaría a la concentración de cloruros.

La hipótesis que cobra más peso después del desarrollo del modelo de transporte es que el origen más factible de la salinidad provenga de aguas congénitas del acuífero (no del Chaco) con salinidad producida por las condiciones de sedimentación durante el relleno del gravén en este sector, aunque sería necesario tener un mayor conocimiento sobre la morfología de la base del acuífero.

En el documento diagnóstico (INCLAM-HQA, 2017) se hizo un análisis de las familias de agua presentes en el ámbito de estudio, tal y como se muestra en la siguiente figura, llegando a la conclusión que en la zona colindante al Chaco el agua era clorurada-sódica mientras que en el resto del acuífero predominaba la familia cloruradas cálcicas. Es decir, se pone en evidencia que existen 2 orígenes diferentes y que la naturaleza de las aguas cloruradas sódicas indican que su procedencia podría ser debida a la presencia de un depósito de agua salina.

Si analizamos la ubicación y características de algunos de los piezómetros cuya familia de agua corresponde a la clorurada sódica podemos observar que el nivel de agua se sitúa en una cota similar. Atendiendo a los niveles piezométricos medidos durante las campañas realizadas entre los años 2010-2017 por SEAM, la cota de agua de los puntos de control 34, 38, 29 y 14 se sitúa entre las cotas 65 y 75 msnm, en el caso de los puntos 42 y 33 entre las cotas 95 y 105 msnm aproximadamente. Es decir, a estas cotas, el origen del agua es claramente diferente al resto. La concentración de cloruros sin embargo no resulta tan elevada como para detectar salinidad apreciable en su consumo y, por lo tanto, sólo cabría aventurar que se trata de una interfase entre el agua propia del acuífero y un depósito de aguas congénitas saladas. El esquema de funcionamiento respondería así a lo planteado por Foster (Mate, 2002), aunque la forma del depósito de agua congénita salina no estaría bien definida y serían necesarios estudios adicionales.

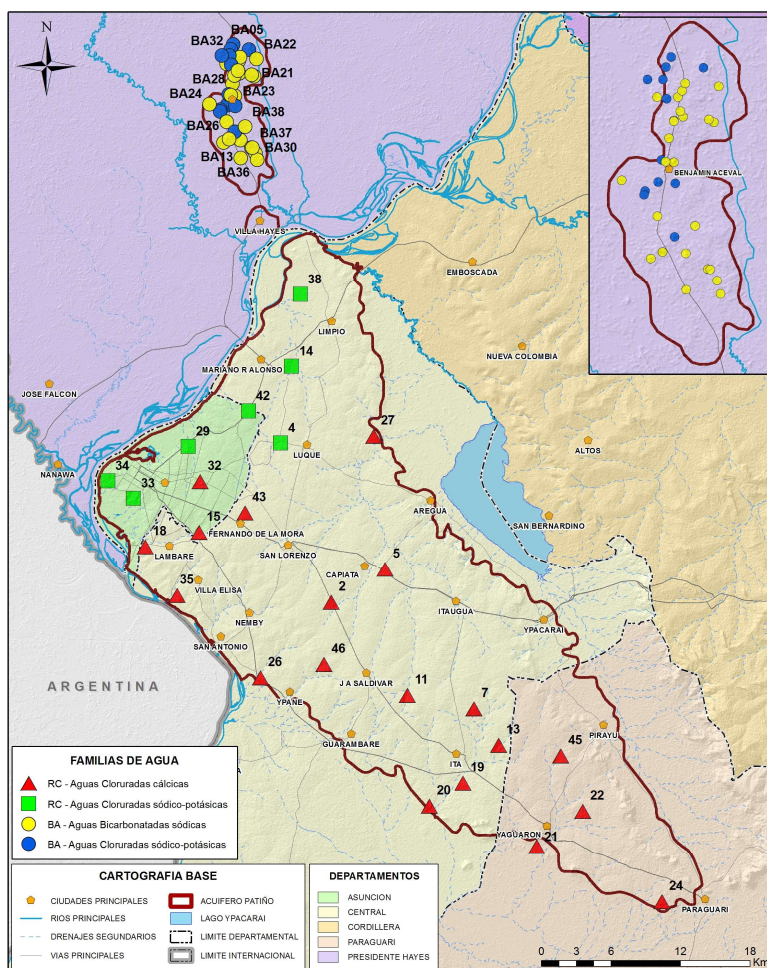


Figura nº51. Distribución de los puntos de control según familia de aguas. Fuente: elaboración propia

6.6 Consideraciones

En resumen, después del análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante el desarrollo del modelo se muestran las siguientes consideraciones:

- La simulación realizada ha mostrado que más explotación no implica una mayor intrusión salina, con lo cual no se puede validar la primera hipótesis realizada de la procedencia de un flujo de agua salada procedente del Chaco.
- La hipótesis más probable es que la salinidad provenga de aguas congénitas del acuífero.
- Las diferentes familias de agua detectadas indican la existencia de aguas con 2 orígenes diferentes, muy probablemente la clorurada sódica corresponda a un depósito de agua salina, aunque su baja concentración de cloruros indique que los puntos de control solo detectan la zona de interfase.
- No se conoce la forma de estas aguas congénitas, lo que hace necesario una mejora del conocimiento mediante:
 - Aplicación exhaustiva del plan de control y seguimiento

- Perforaciones a gran profundidad (300m-400m) que corrobore la hipótesis que los puntos de agua clorurada sódica indiquen que nos encontramos en la zona de contacto.
- Perfilajes de conductividad para localizar la cuña salina
- Análisis de isótopos para conocer el origen y la edad del agua
- La zona crítica se ubica en el límite con el Chaco, donde actualmente la explotación de agua subterránea está siendo muy poco intensa y la previsión es que siga esta tendencia. Por lo tanto, no se prevé que la salinidad aumente. De hecho, la recarga estaría desplazando el agua salina hacia abajo, con un efecto “limpiador”.
- La salinidad de las zonas congénitas del acuífero no representa ningún problema ni actual ni a futuro.

7 DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS

La construcción de escenarios futuros de situación del acuífero lleva consigo una labor de proyección y estimación de los principales parámetros que gobiernan o controlan el funcionamiento general del acuífero Patiño.

Tienen como objetivo poder responder al gestor y al planificador en que situación general podrá estar el acuífero en el caso de que se den unas condiciones concretas de los principales parámetros que lo gobiernan, y a partir de los resultados obtenidos, avanzar un conjunto de decisiones que cambien la tendencia observada y eviten la situación anticipada por el modelo.

A su vez, son una herramienta de interpretación de sistemas complejos, que permiten al observador comprender mejor el funcionamiento de este sistema y por tanto tomar decisiones de forma informada.

Por tanto, la definición de escenarios debe alcanzar dos objetivos principales, ser una herramienta de ayuda al **seguimiento y control** del estado cuantitativo del acuífero, ayudando a la comprensión de lo que está sucediendo en cada momento, y a su vez deben tener **un carácter predictivo y prospectivo** que sirva como herramienta de ayuda a la decisión durante el proceso planificador, en el que mediante **las tendencias y previsiones** socioeconómicas futuras muestre la evolución del acuífero y el posible estado futuro si no se revierten o modifican las tendencias o previsiones detectadas.

8 ESCENARIOS PARA EL SEGUIMIENTO Y CONTROL

Para el análisis de estos escenarios se aplica al modelo una batería de hipótesis en que de forma combinada muestran diferentes hipótesis de evolución de los dos principales parámetros que rigen la evolución del acuífero, como son la recarga y las extracciones.

Los diferentes escenarios analizados se muestran en la tabla nº14 en donde de forma combinada se realiza una disminución del 5 % y un aumento de las extracciones del 5% y el 15%, y para la recarga un aumento del 5 % y una reducción del 5 y el 15 %.

Este conjunto de nueve escenarios tiene como objetivo poder realizar el seguimiento ordinarios del acuífero y poder interpretar lo que está sucediendo, de esta forma cualquier variación de los niveles del acuífero que pueda suceder en el futuro inmediatamente podrá ser interpretada en clave de variación de recarga o extracciones.

Esto permite sin necesidad de realizar nuevas simulaciones reinterpretar en cada momento lo que está sucediendo en el acuífero y poder tomar decisiones relacionadas con la explotación ordinaria del acuífero de forma informada.

Escenario	Variación de las extracciones	Variación de la recarga	Variación de las extracciones (hm ³)	Variación de la recarga (hm ³)
H1	-5%	5%	-4.54	12.94
H2	5%	5%	4.54	12.94
H3	15%	5%	-13.63	12.94
H4	-5%	-5%	-4.54	-12.94
H5	5%	-5%	4.54	-12.94
H6	15%	-5%	-13.63	-12.94
H7	-5%	-15%	-4.54	-38.82
H8	5%	-15%	4.54	-38.82
H9	15%	-15%	-13.63	-38.82

Tabla nº14. Escenarios previstos para realizar el seguimiento de estado del acuífero Patiño. Fuente elaboración propia

8.1 Análisis de los resultados

Las modelaciones ejecutadas simulan los niveles previstos por el modelo numérico sosteniendo a lo largo de 20 años las condiciones de recarga y extracciones impuestas. Las modificaciones de nivel se analizan respecto a una situación inalterada en las que estas condiciones son equivalentes a las actuales. Los cálculos toman como piezometría inicial la correspondiente a la calculada por el modelo de calibración para diciembre de 2016.

Se toma una simulación de referencia (H0) en la que se simulan las mismas condiciones de bombeo que las conocidas para el año 2016 y se replica la serie de recargas calculada para el período 2000-2016.

De la Figura nº52 a la Figura nº60 se muestra la distribución de las diferencias piezométricas respecto a la simulación H0 esperables en el acuífero para los diferentes escenarios.

Para representar la variación temporal de dichas diferencias se toman los puntos de calibración 1, 6, 7, 14, 23, 26, 31 y 44 como referentes de los diferentes sectores del acuífero Patiño al ser representativos de las zonas de mejor calibración (ver Figura nº61).

De la Figura nº62 a la Figura nº69 se muestra la evolución de las diferencias a lo largo de los 20 años de simulación para los ocho puntos escogidos para el escenario H0, dos escenarios límite (H1 y H9) y uno intermedio (H5).

De la Figura nº70 a la Figura nº77 se muestra la evolución simulada de los niveles piezométricos en los ocho puntos de referencia para los escenarios H0, H1, H5 y H9, además de aquellos puntos que están (o serán) automatizados (puntos 2, 17, 24, 35 y 42).

En la Tabla nº15 se resumen los resultados generales.

Escenario	Variación de las extracciones	Variación de la recarga	Diferencia promedio (m)	Diferencia negativa máxima (m)	Diferencia positiva máxima (m)
H1	-5%	5%	0.53	-0.93	6.01
H2	5%	5%	0.01	-3.24	1.74
H3	15%	5%	-0.54	-12.82	1.74
H4	-5%	-5%	-0.17	-2.18	3.09
H5	5%	-5%	-0.73	-6.27	0.00
H6	15%	-5%	-1.31	-16.04	0.00
H7	-5%	-15%	-0.86	-5.13	0.33
H8	5%	-15%	-1.44	-9.07	0.00
H9	15%	-15%	-2.04	-19.31	0.00

Tabla nº15. Resultados estadísticos para los diferentes escenarios. Los valores corresponden al tiempo equivalente a 20 años de simulación.

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

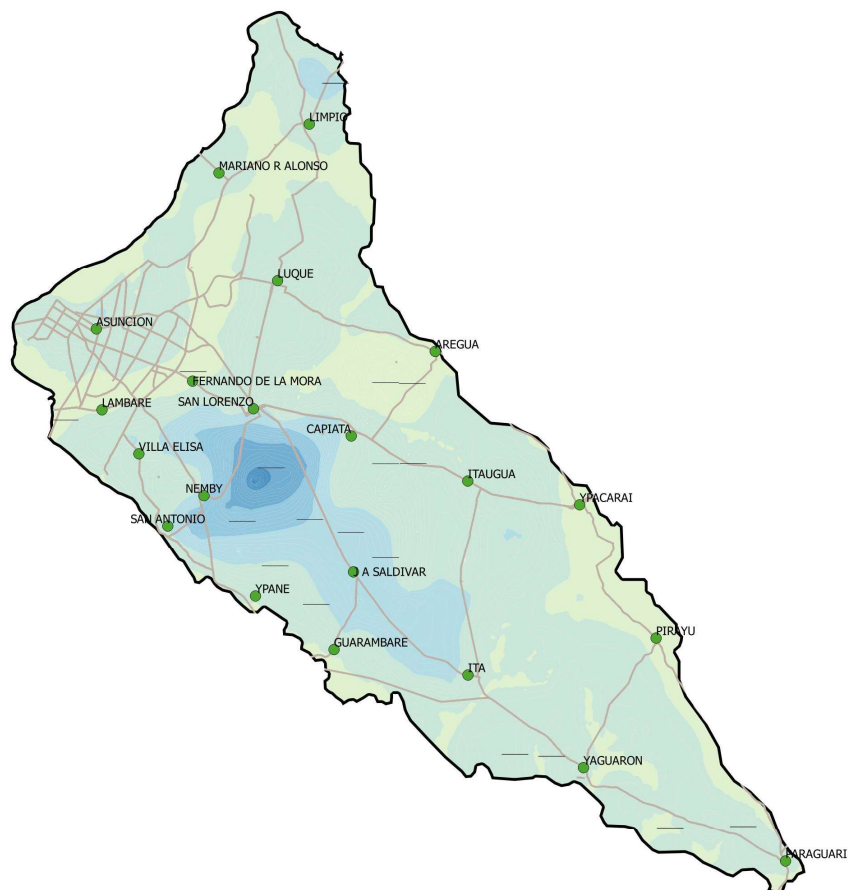
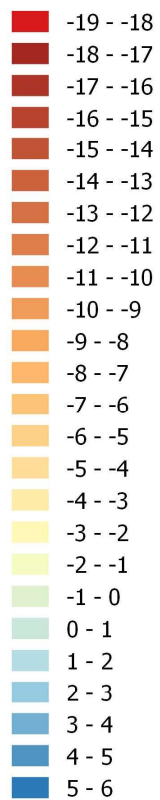


Figura nº52. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H1 (Recarga +5%, Bombeos -5%)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

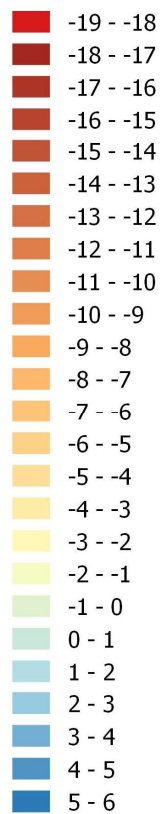


Figura nº53. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H2 (Recarga +5%, Bombeos +5%)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

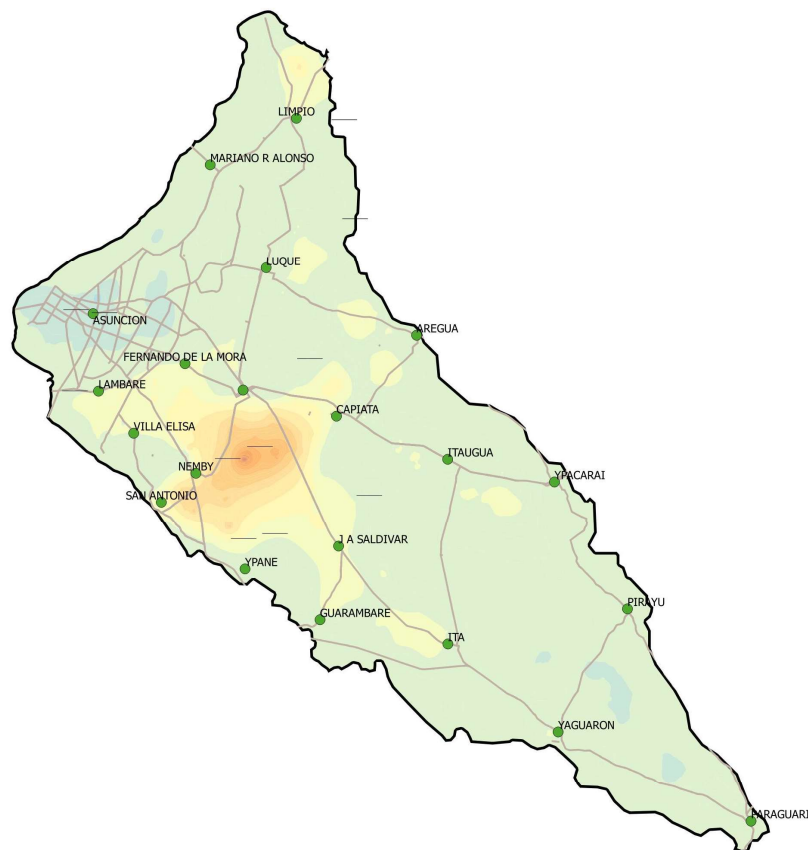
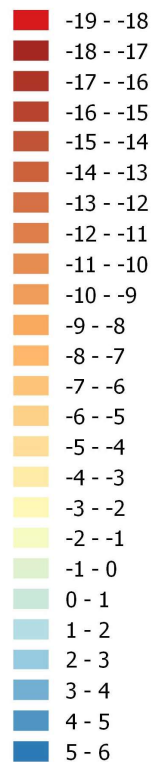


Figura nº54. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H3 (Recarga +5%, Bombeos +15%)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

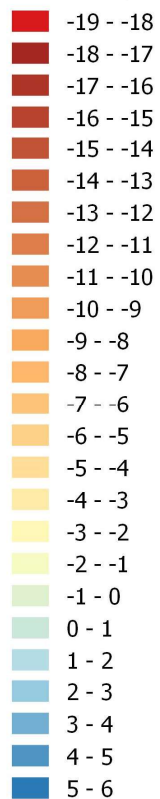


Figura nº55. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H4 (Recarga -5%, Bombeos -5 %)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

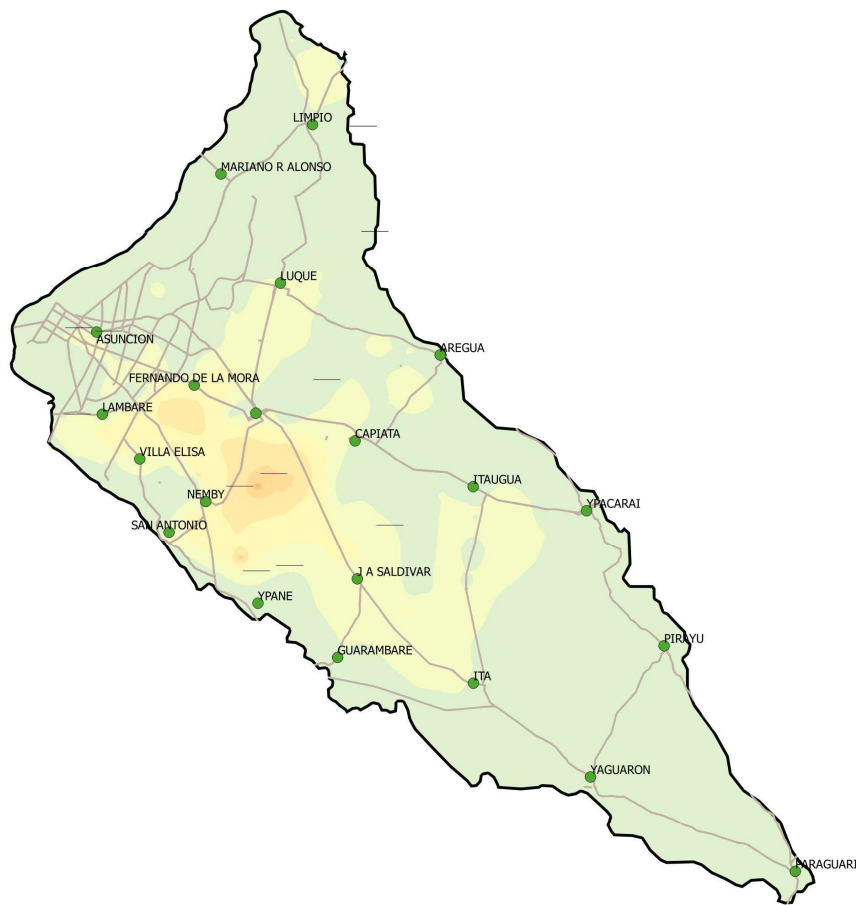
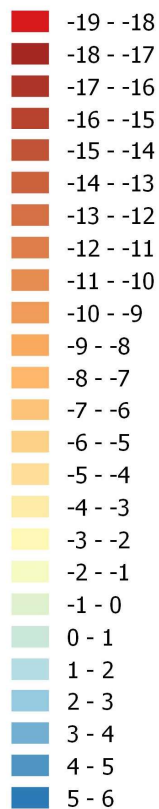


Figura nº56. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H5 (Recarga -5%, Bombeos +5 %)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

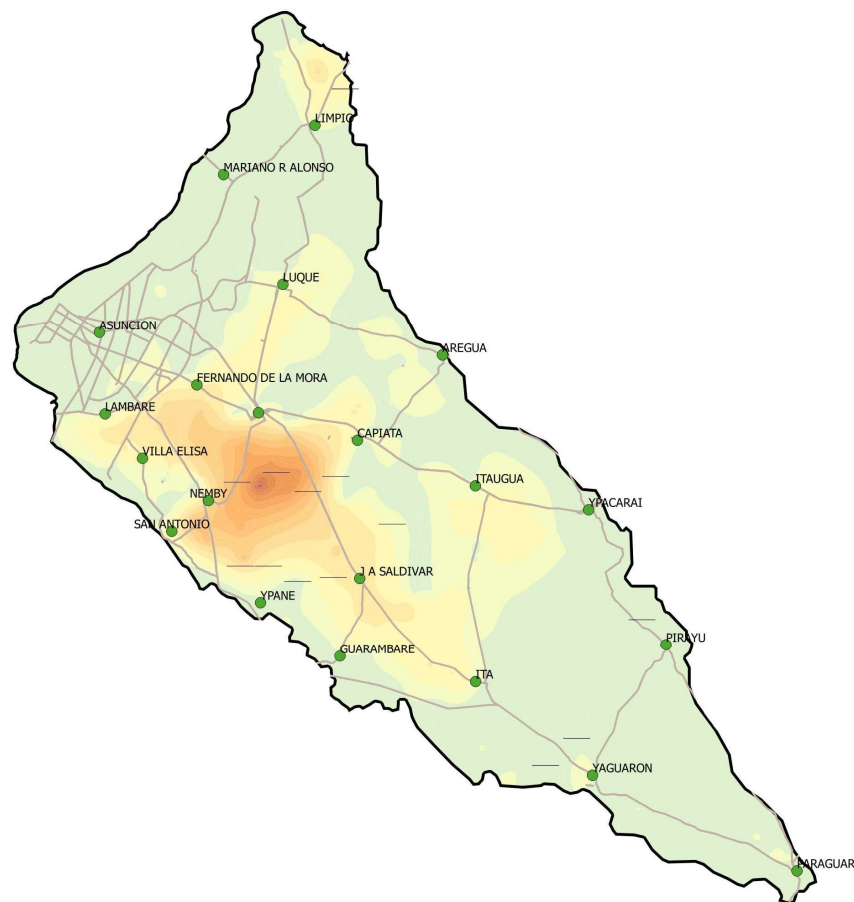
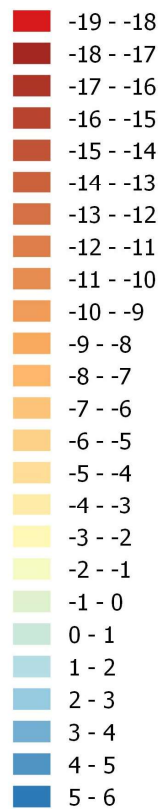


Figura nº57. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H6 (Recarga -5%, Bombeos +15 %)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

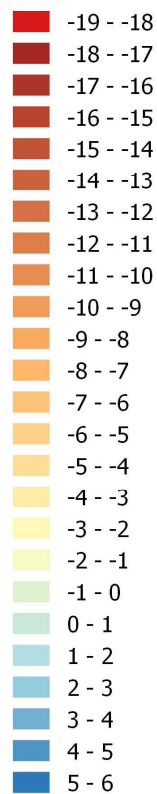


Figura nº58. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H7 (Recarga -15%, Bombeos -5 %)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

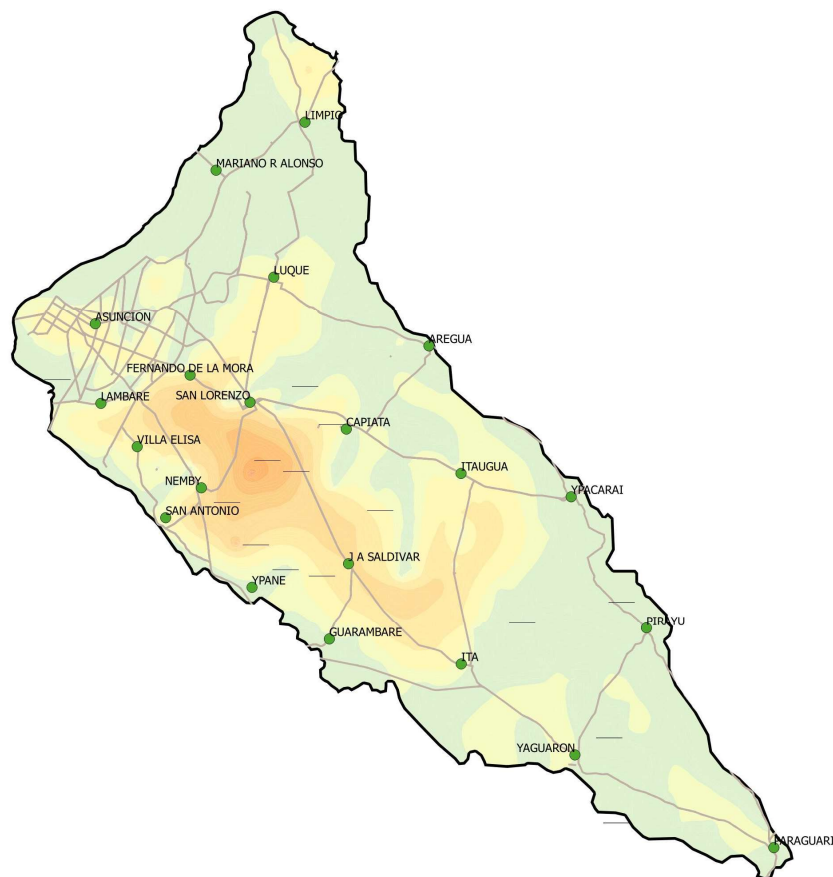
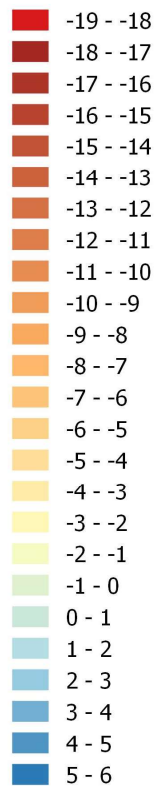


Figura nº59. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H8 (Recarga -15%, Bombeos 5 %)

Leyenda

Diferencias piezométricas (m) 20 años

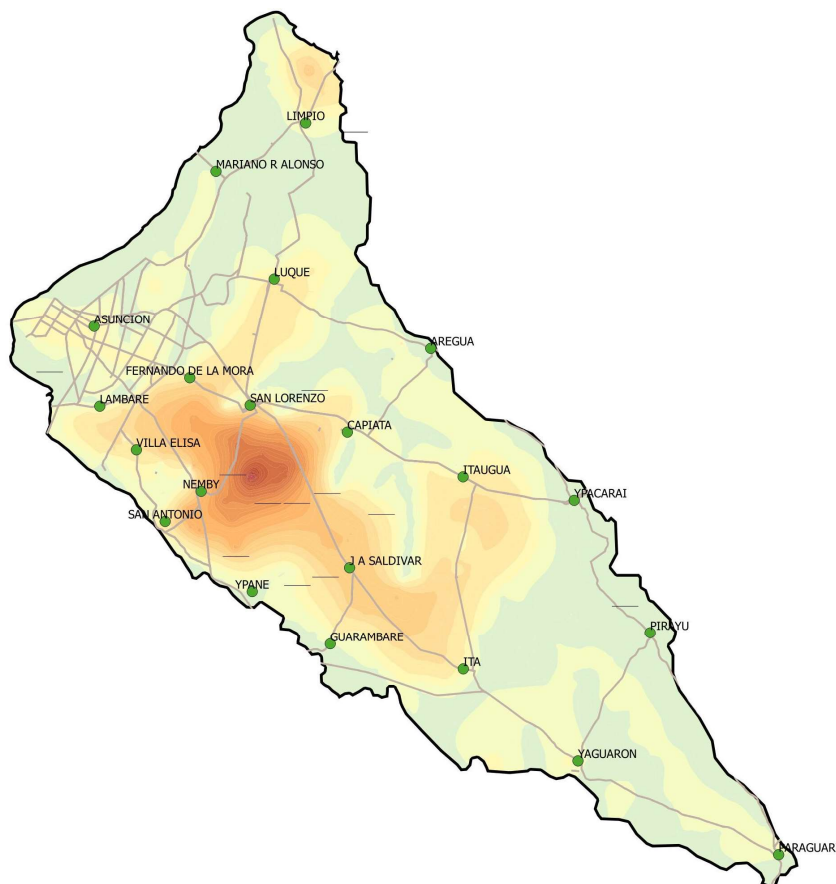
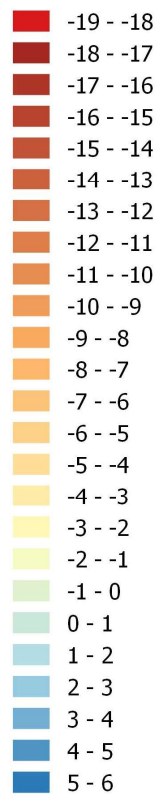


Figura n°60. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Simulación H9 (Recarga -15%, Bombeos +15 %)

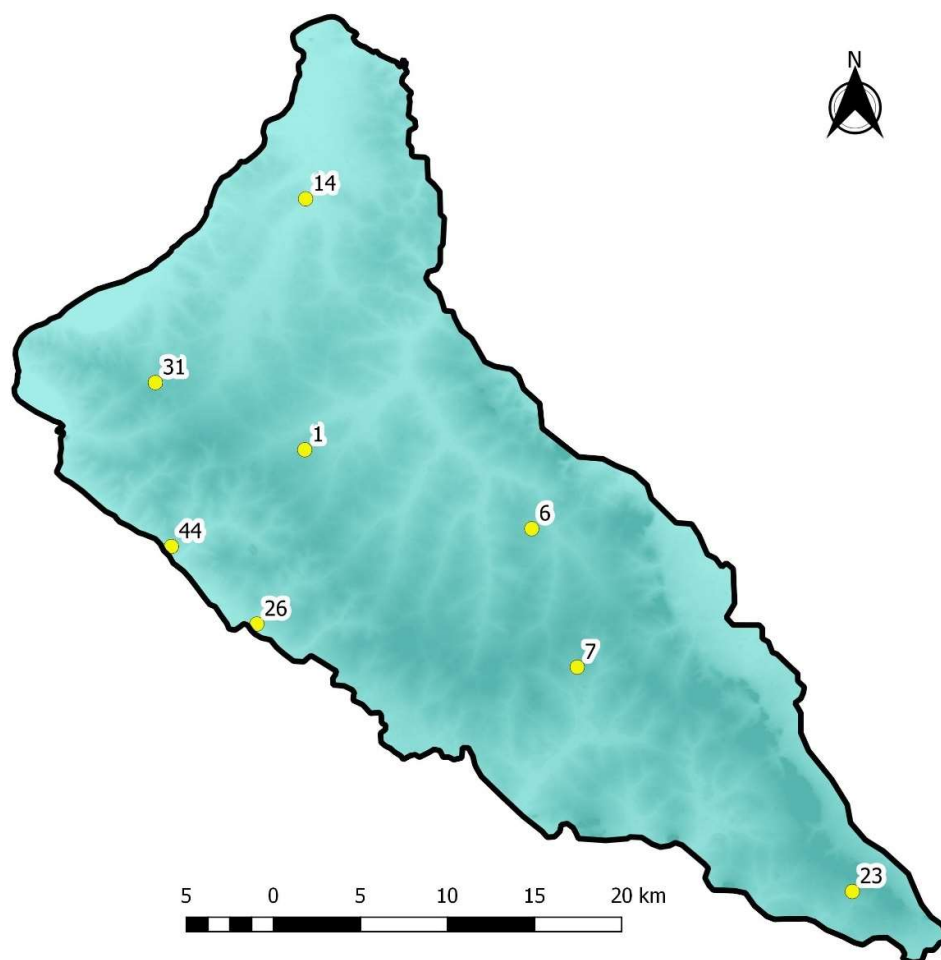


Figura nº61. Ubicación de los puntos de los que se muestran en el presente informe los resultados de las simulaciones para el seguimiento y control.

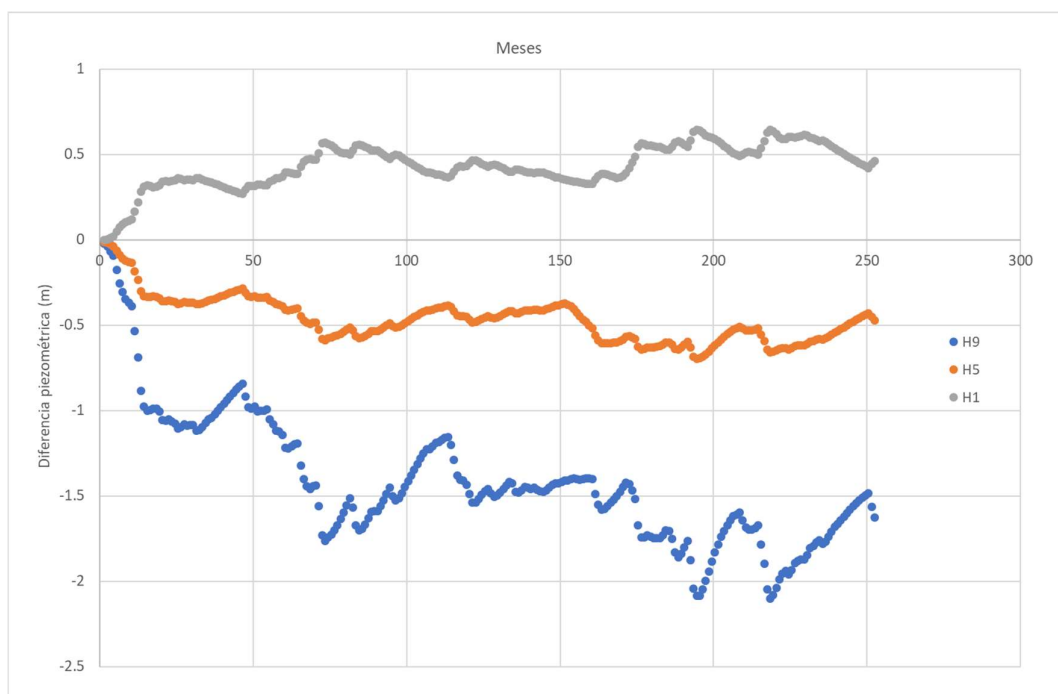


Figura nº62. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 23. Escenarios H1, H5 y H9

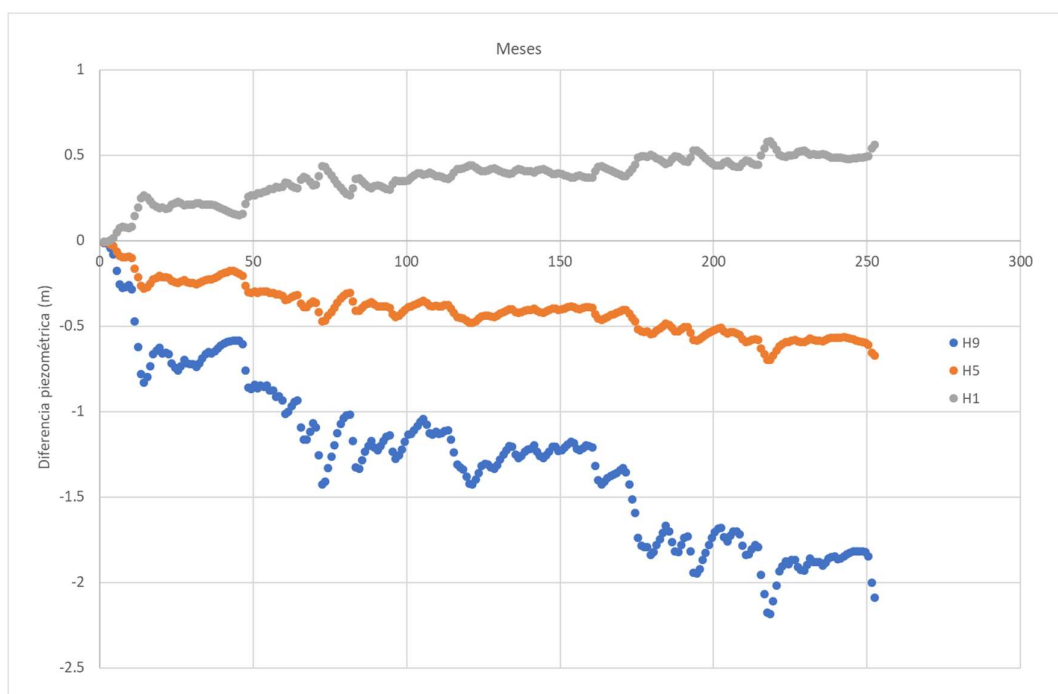


Figura nº63. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 7. Escenarios H1, H5 y H9

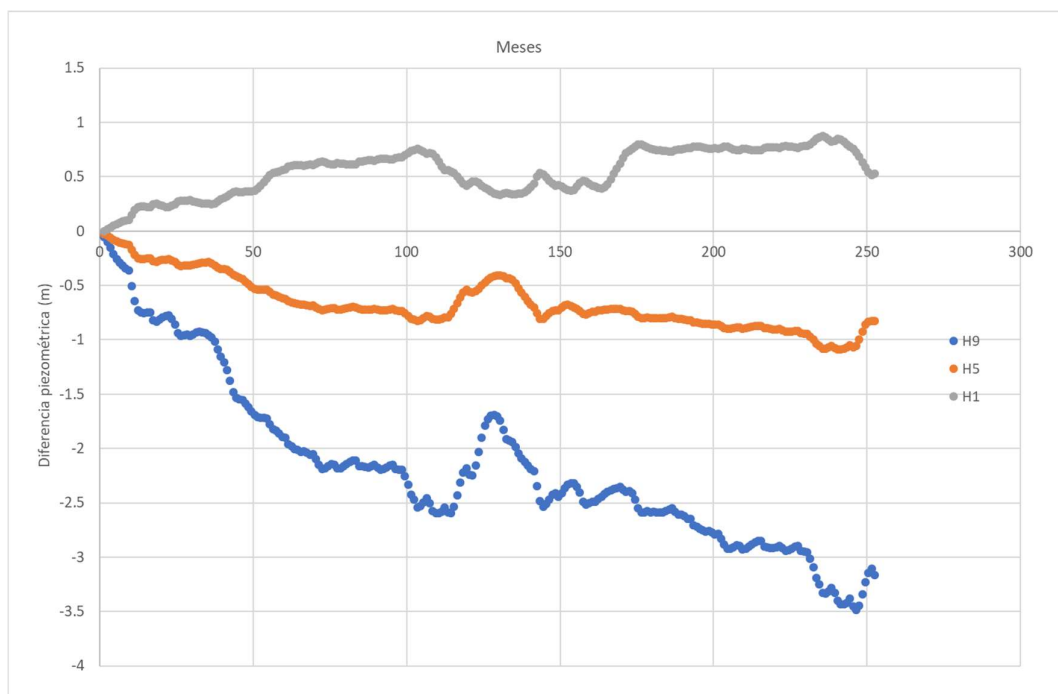


Figura nº64. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 6. Escenarios H1, H5 y H9

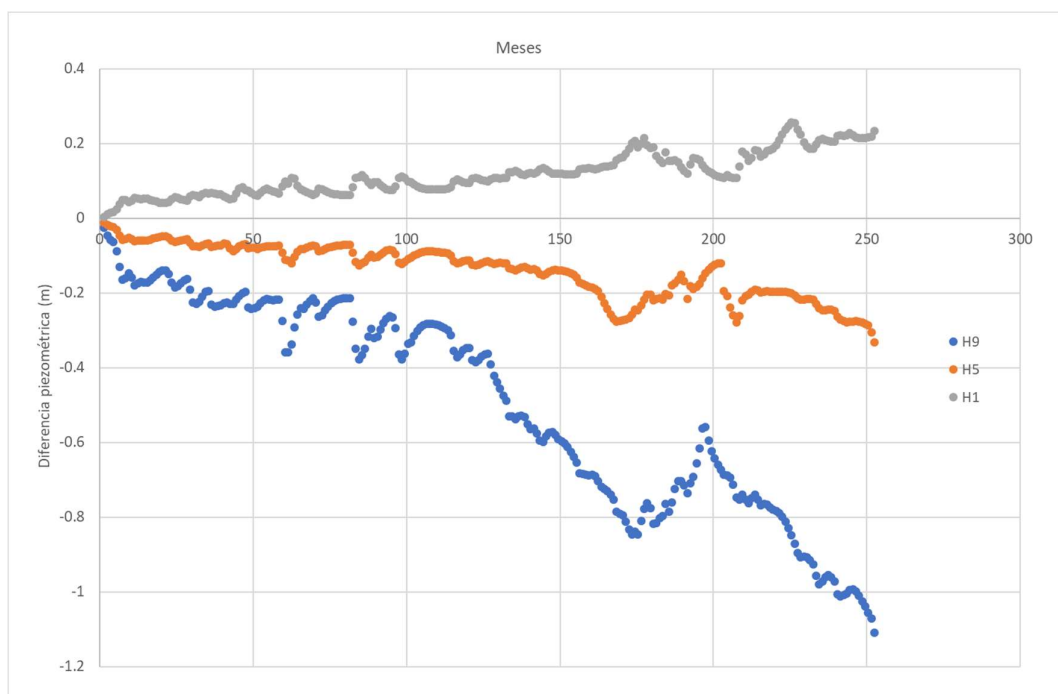


Figura nº65. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 26. Escenarios H1, H5 y H9

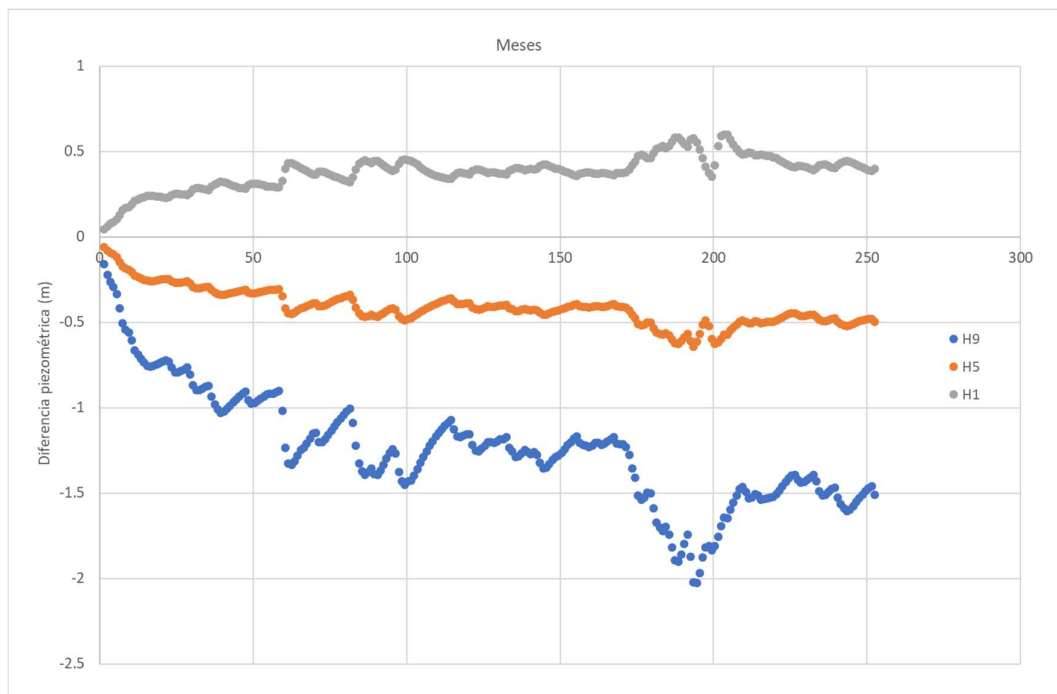


Figura nº66. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 44. Escenarios H1, H5 y H9

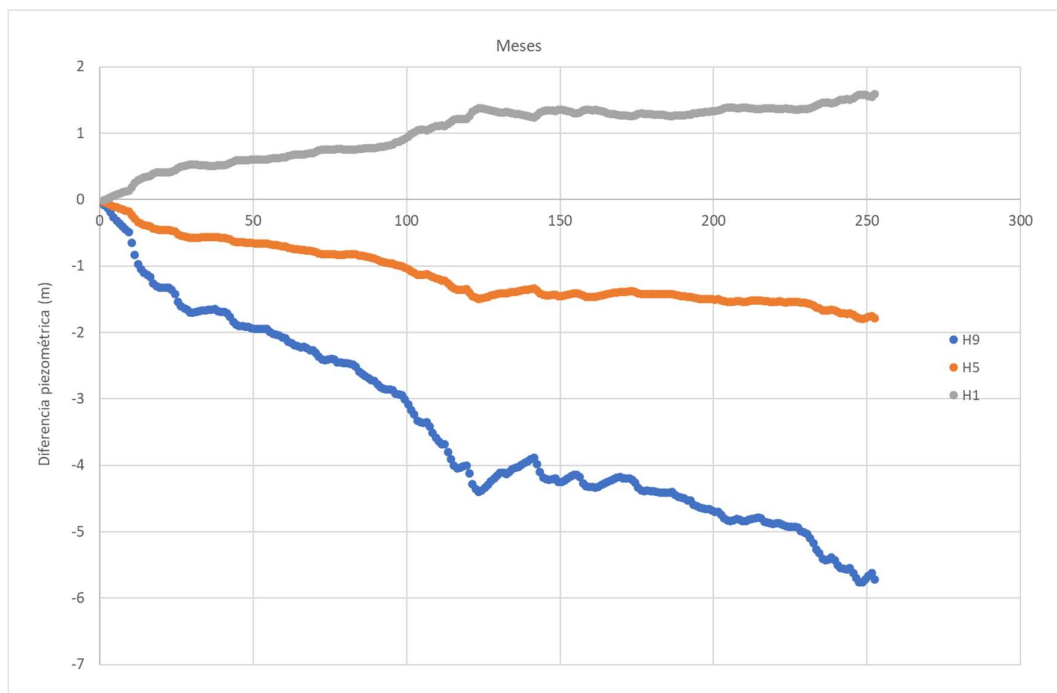


Figura nº67. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 1. Escenarios H1, H5 y H9

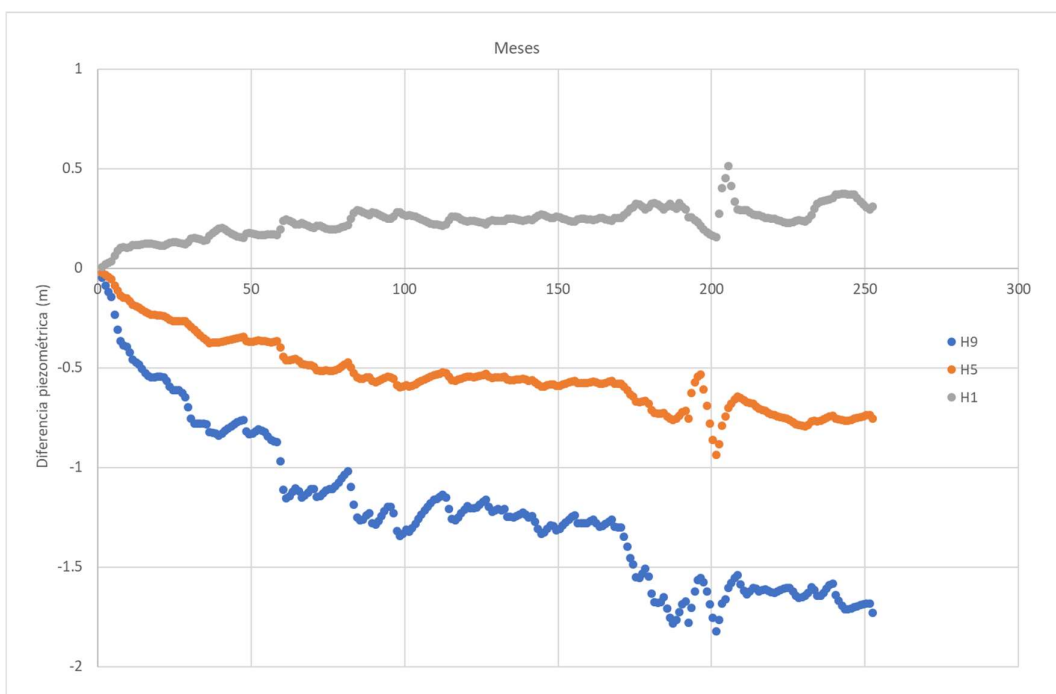


Figura nº68. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 31. Escenarios H1, H5 y H9

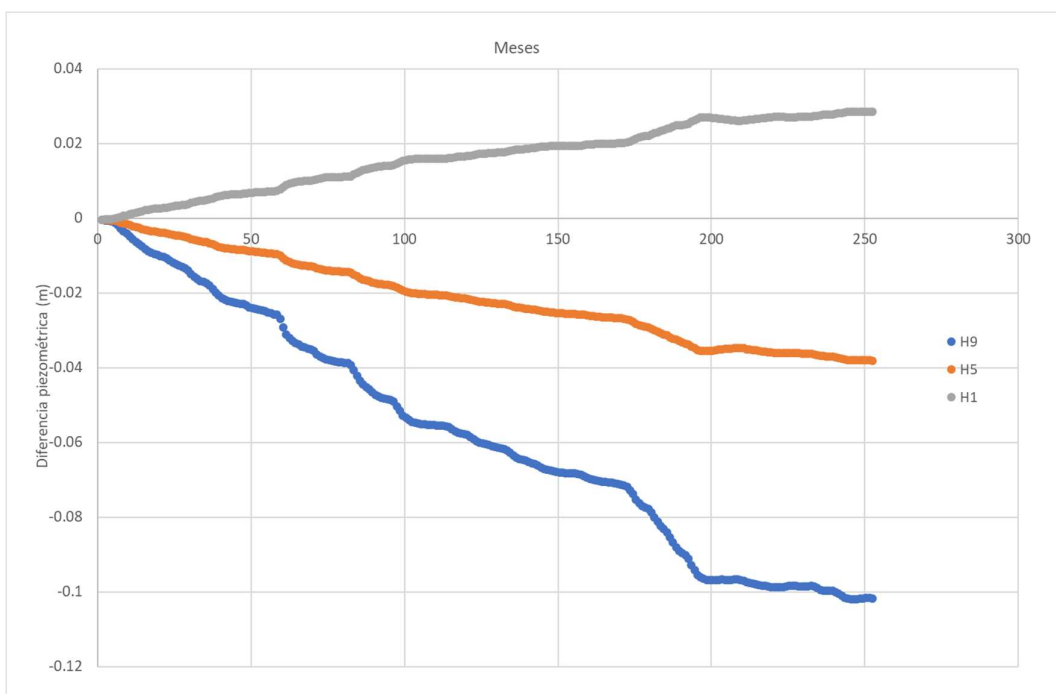


Figura nº69. Evolución de las diferencias piezométricas para el punto 14. Escenarios H1, H5 y H9

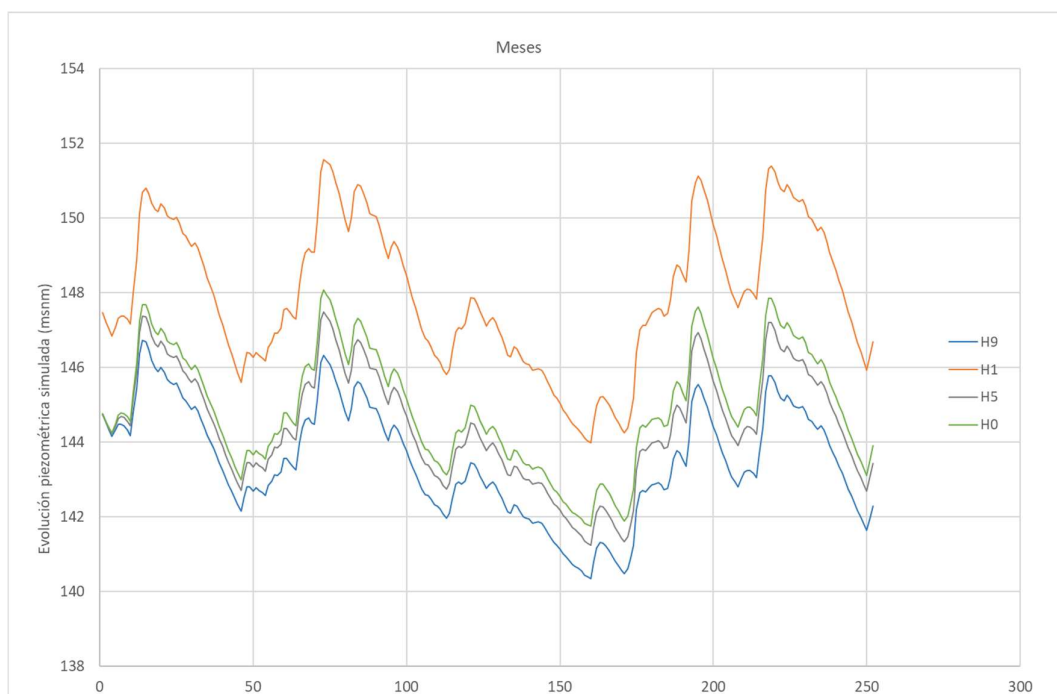


Figura nº70. Evolución de los niveles simulados en el punto 23. Escenarios H0, H1, H5 y H9

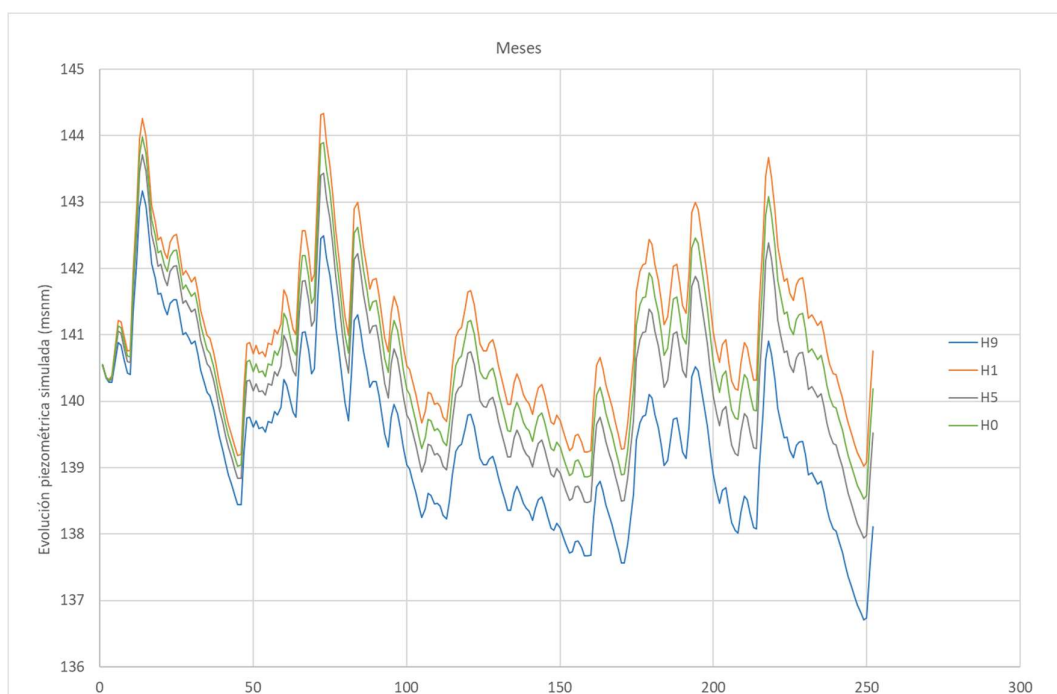


Figura nº71. Evolución de los niveles simulados en el punto 6. Escenarios H0, H1, H5 y H9

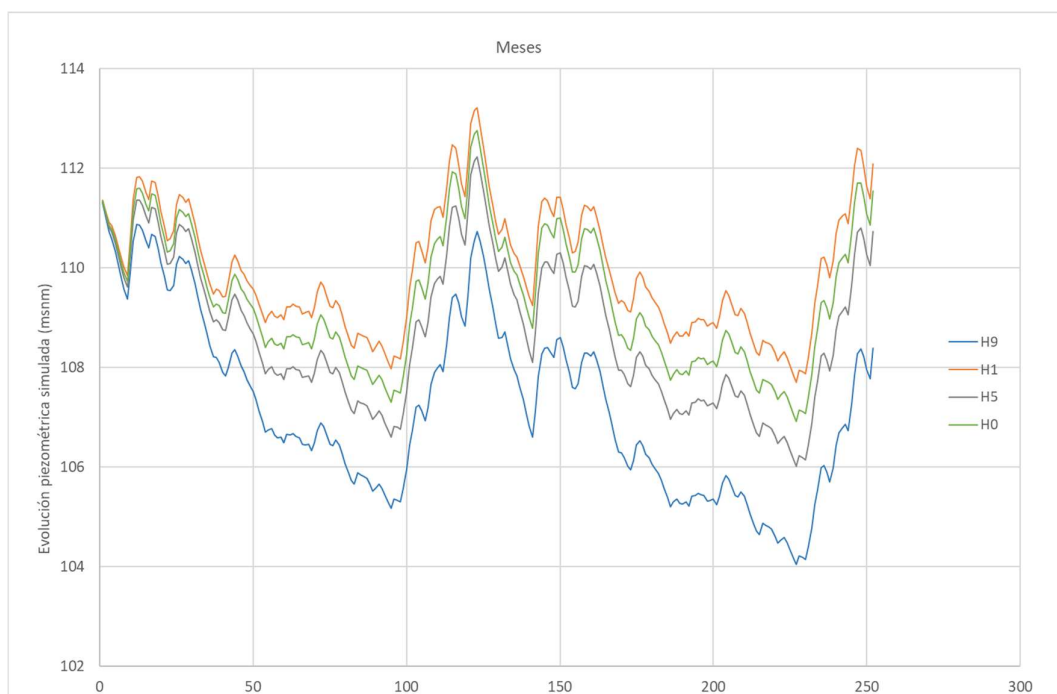


Figura nº72. Evolución de los niveles simulados en el punto 7. Escenarios H0, H1, H5 y H9

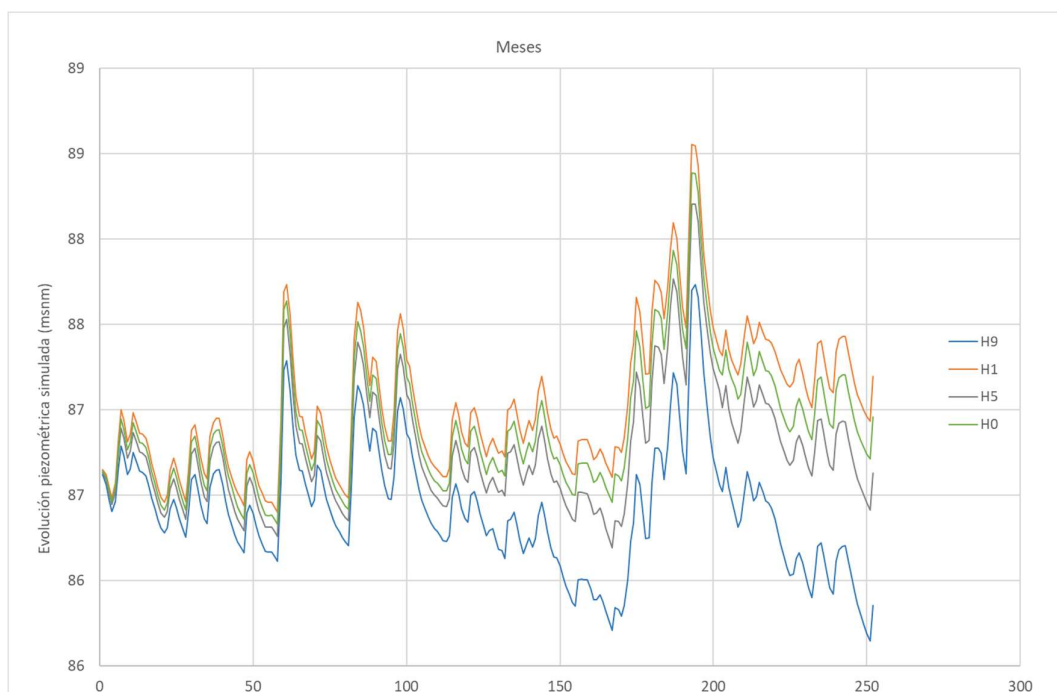


Figura nº73. Evolución de los niveles simulados en el punto 26. Escenarios H0, H1, H5 y H9



Figura nº74. Evolución de los niveles simulados en el punto 44. Escenarios H0, H1, H5 y H9

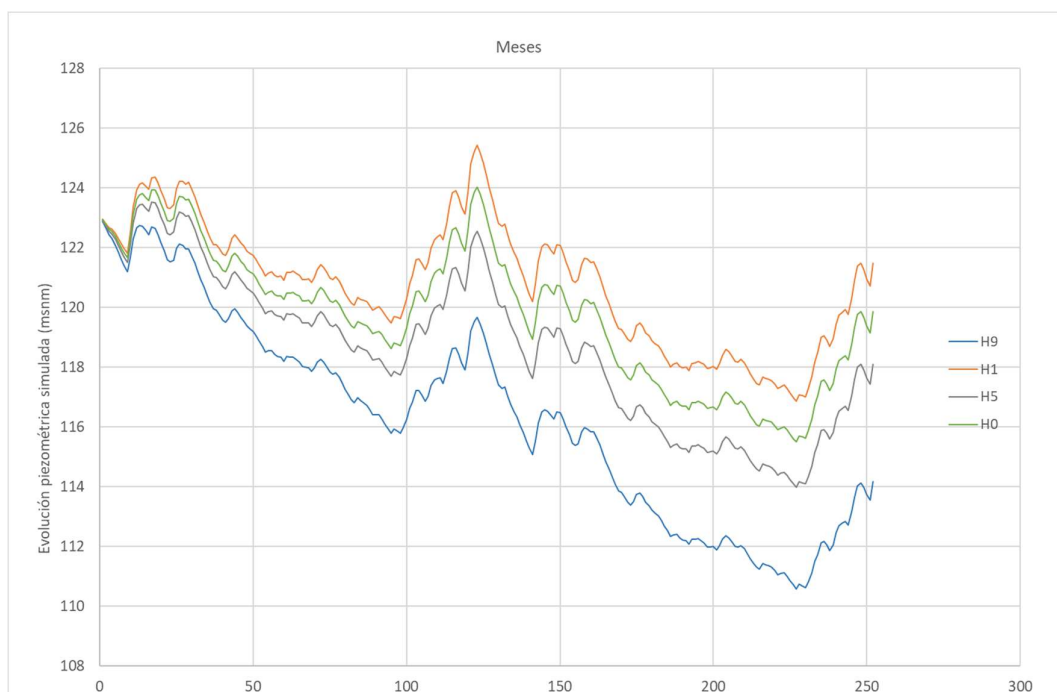


Figura nº75. Evolución de los niveles simulados en el punto 1. Escenarios H0, H1, H5 y H9

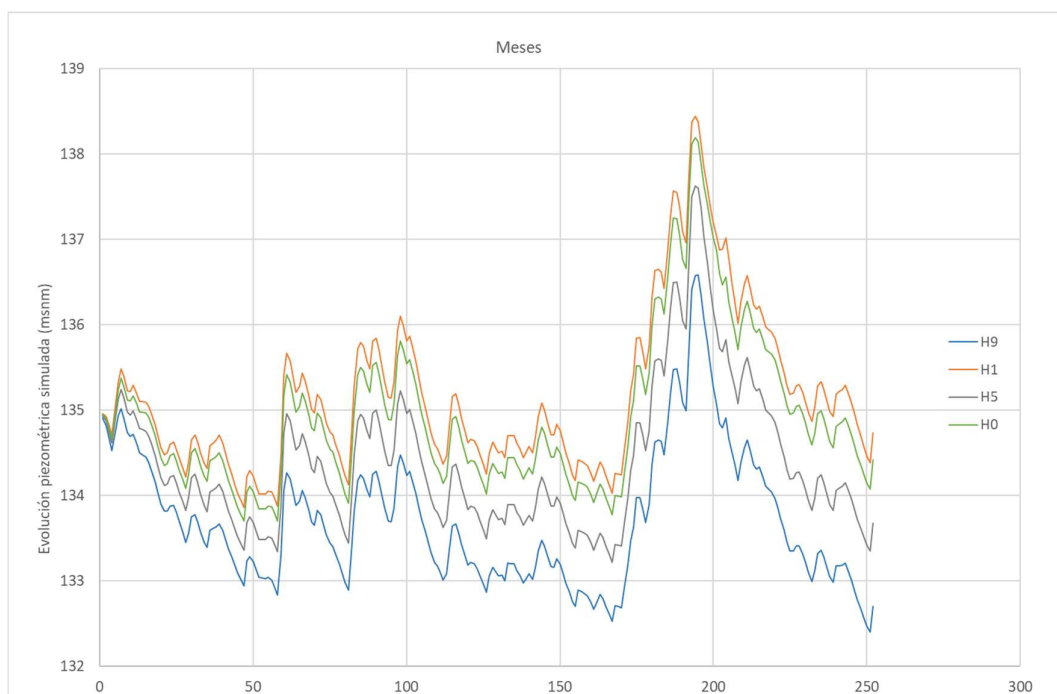


Figura nº76. Evolución de los niveles simulados en el punto 31. Escenarios H0, H1, H5 y H9

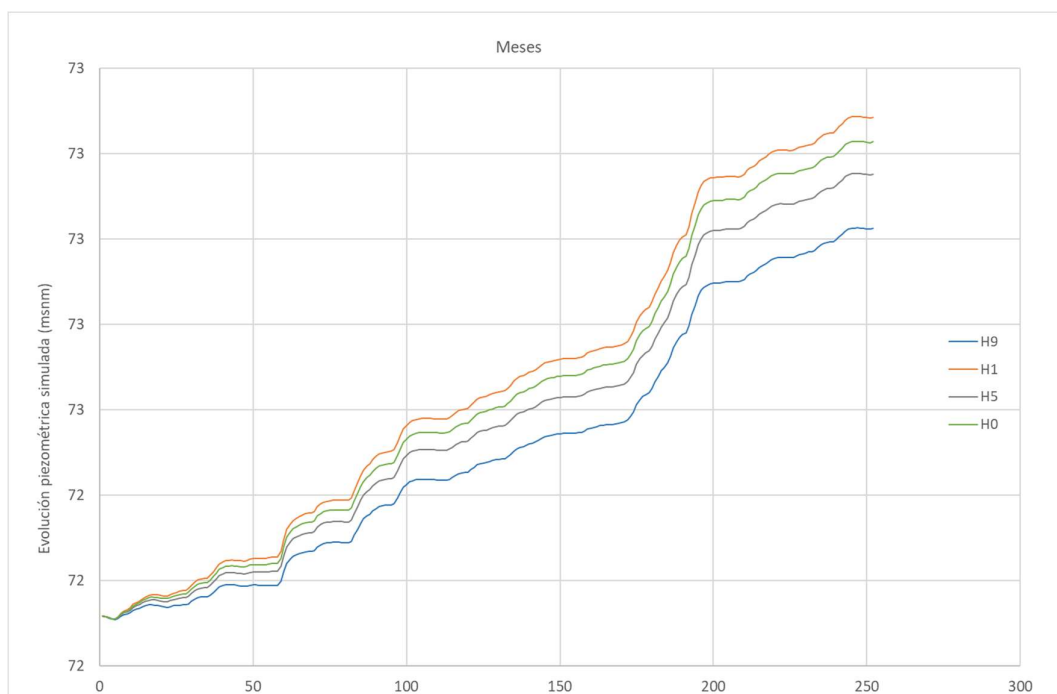


Figura nº77. Evolución de los niveles simulados en el punto 14. Escenarios H0, H1, H5 y H9

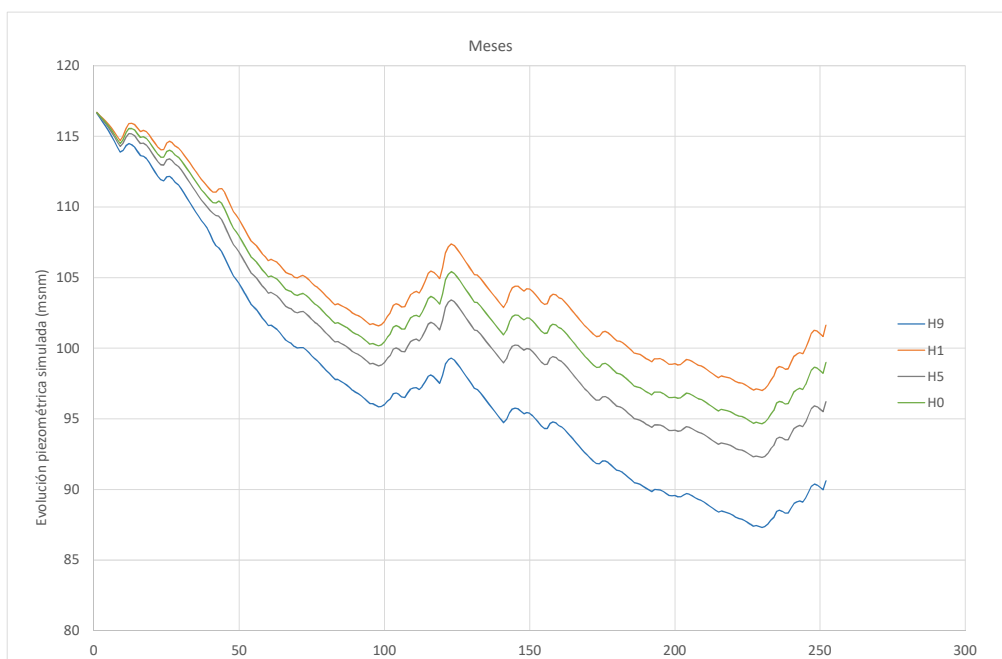


Figura nº78. Evolución de los niveles simulados en el punto 2. Escenarios H0, H1, H5 y H9



Figura nº79. Evolución de los niveles simulados en el punto 17. Escenarios H0, H1, H5 y H9

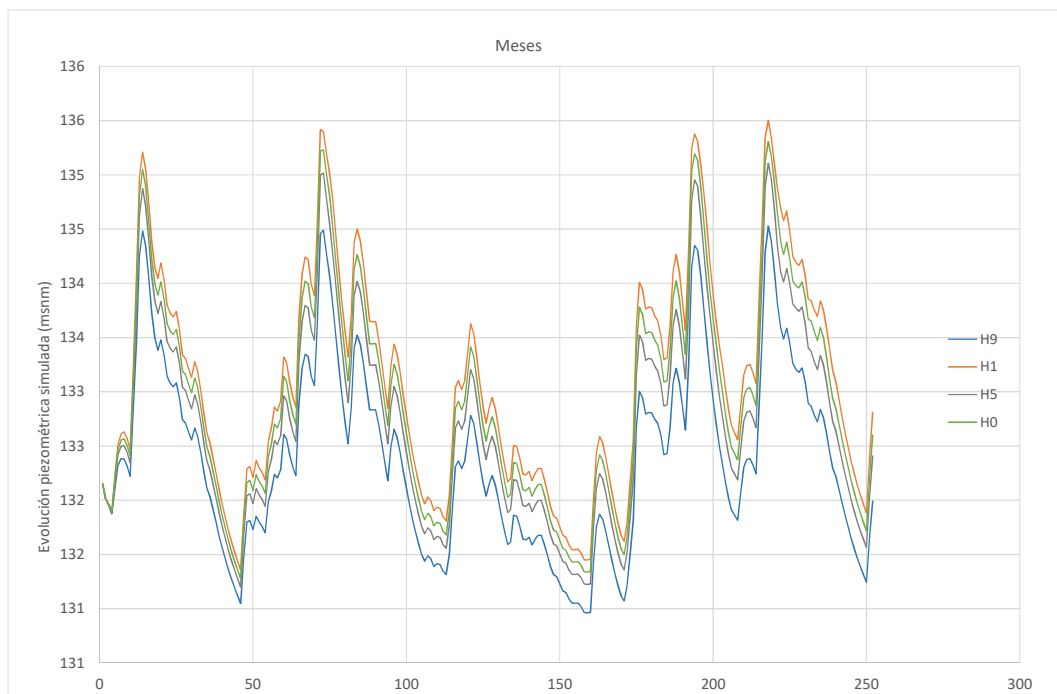


Figura nº80. Evolución de los niveles simulados en el punto 24. Escenarios H0, H1, H5 y H9

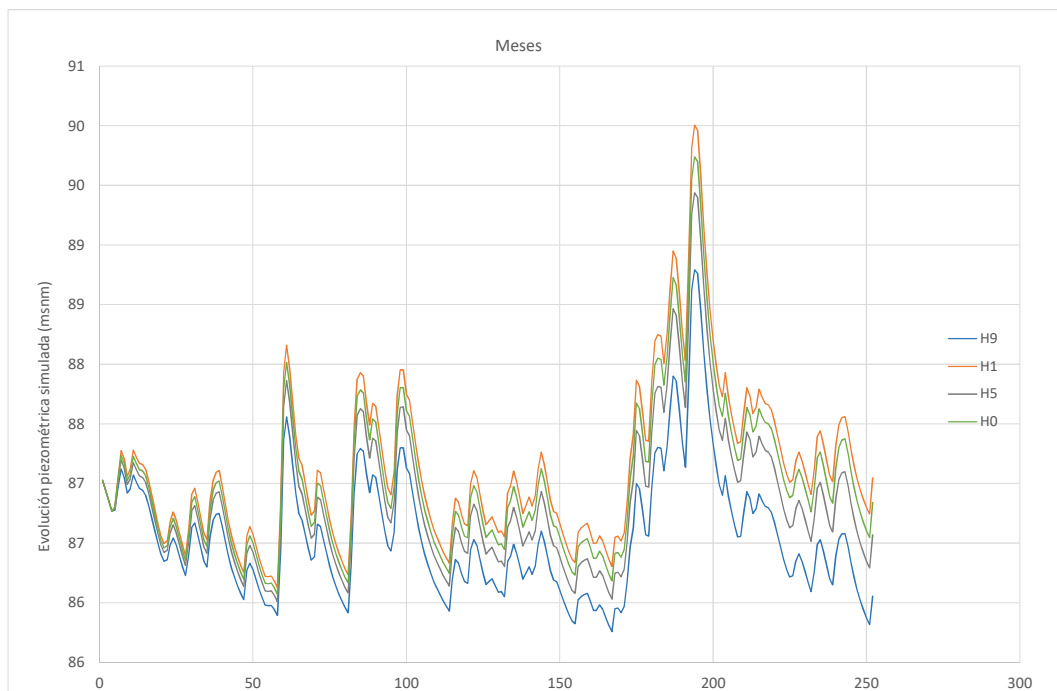


Figura nº81. Evolución de los niveles simulados en el punto 35. Escenarios H0, H1, H5 y H9

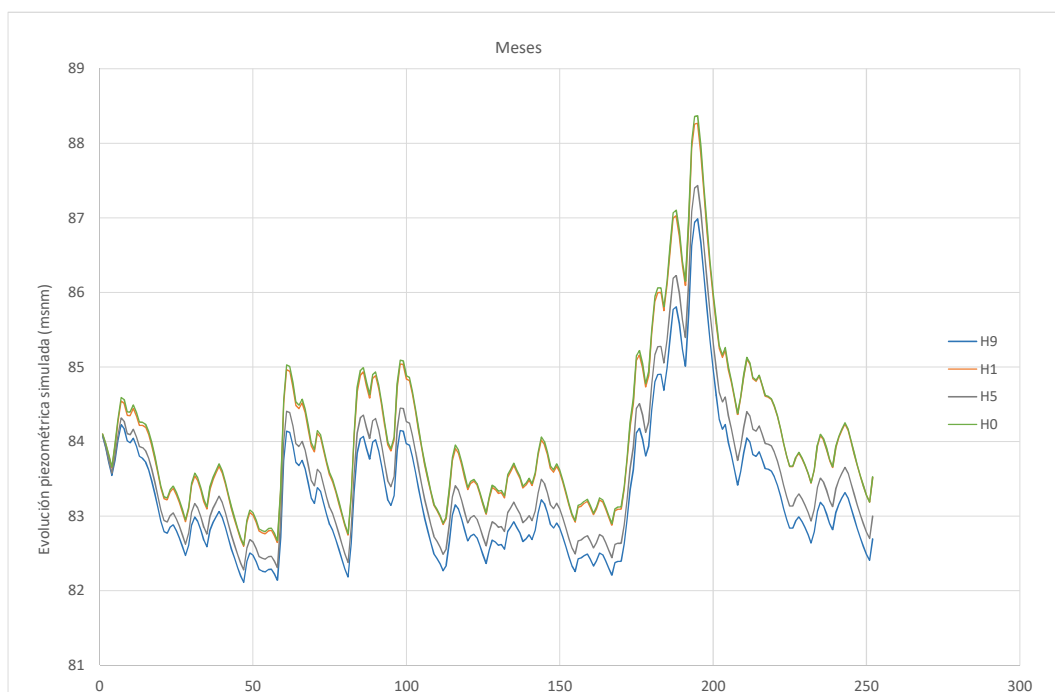


Figura nº82. Evolución de los niveles simulados en el punto 42. Escenarios H0, H1, H5 y H9

9 ESCENARIOS PROSPECTIVOS ORIENTADOS A LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL ACUÍFERO

Los escenarios prospectivos parten de un conjunto de variables que son proyectables a futuro desde una base de realidad actual y que determinan de forma fundamental el comportamiento del acuífero.

En este tipo de escenarios se consideran por un lado la variabilidad climática que puede repercutir en la recarga futura del acuífero y por otro lado se analizan las principales tendencias socioeconómicas previstas en el acuífero que repercuten de forma directa en las demanda y en consecuencia en las extracciones futuras.

Este tipo de escenarios pretende responder a determinadas preguntas sobre el estado del acuífero en el futuro:

- ¿Cómo afectará el cambio climático a la evolución de los niveles del acuífero?
- ¿Podrá soportar el acuífero las necesidades futuras de agua manteniendo los criterios de sostenibilidad?

Para poder responder a estas preguntas se debe realizar un análisis de cambio climático en el área del acuífero que muestre la evolución de la recarga, a lo largo del tiempo para ello se recogen los datos de precipitación y temperatura dentro de modelos climáticos regionales, bajo el supuesto del escenario de emisión RCP 4.5.

Además se debe conocer la demanda futura de agua, en la que se considera la proyección de población para el año horizonte (2050), considerando un escenario de planificación a 30 años.

Este es el principal parámetros a considerar ya que el resto de demandas se consideran poco importantes, tanto en la actualidad como en el futuro. Para realizar esta hipótesis se considera que la demanda poblacional es constante a lo largo del tiempo. Esta hipótesis se considera conservadora ya que es previsible que las eficiencia tanto de las redes de suministro provoque una disminución de la demanda en alta de agua.

Ligando estos dos factores se obtienen dos escenarios futuros combinados, el primero de ellos es el denominado escenario probable en el que se considera que la demanda futura estará servida siguiendo la misma relación actual entre agua superficial y subterránea (75% superficial y 25% subterránea) y la segunda denominado escenario extremo se considera que la demanda futura está servida en su totalidad desde el agua almacenada en el acuífero.

En base a los resultados obtenidos se definen los lineamientos principales para orientar el ejercicio de planificación que se plasma en el plan de gestión del acuífero.

9.1 Efecto del cambio climático en la recarga del acuífero Patiño

El análisis de los efectos de cambio climático sobre el acuífero Patiño presenta en su definición una elevada complejidad y lleva asociada una considerable incertidumbre en la adopción de los escenarios futuros de Cambio Climático, los cuales vienen definidos por diferentes hipótesis de emisión futura de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Tal y como se comentó en el documento de diagnóstico (INCLAM-HQA, 2017), Paraguay se encuentra en la posición 8 de 33, situándose en la categoría de “riesgo extremo”, situación atribuida a diversos factores al poseer zonas fluviales de riberas bajas, zonas áridas y semiáridas, áreas susceptibles a la deforestación y erosión, áreas altamente contaminadas y ecosistemas frágiles. Para ello, el país ha expresado el compromiso de intervenir frente al Cambio Climático de manera transversal e integrada, cumpliendo con los compromisos internacionales asumidos ante la Comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) mediante la firma del Acuerdo de París en la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) en diciembre del 2015.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) es el responsable de la preparación de informes completos de evaluación sobre el estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos del cambio climático, sus causas, impactos potenciales y las estrategias de respuesta. El último informe realizado es el **Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5)** publicado en 2014.

9.1.1 Escenarios de cambio climático

Para analizar el efecto el cambio climático en la región del acuífero Patiño se han recogido las simulaciones realizadas con el modelo climático regional RCA4, que originalmente está basado en el modelo de predicción climática HIRLAM (Strandberg et al., 2014), tomando como base de referencia el escenario RCP 4.5 (moderado), para el período 1960-2100, siguiendo el mismo criterio que el adoptado en el estudio hidroclimatológico de la cuenca del Plata (Comité & CIC, 2016).

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Figura nº83. Escenarios contemplados en el AR5. Fuente: Guía resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC Grupo de Trabajo I. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España 2014

El modelo RCA4 está integrado en la plataforma CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), donde se pueden descargar los datos de las simulaciones realizadas.

En base a estos datos se ha realizado una traslación de los datos del modelo a las estaciones climáticas de Paraguarí y del Aeropuerto en Asunción mediante un procedimiento de escalado lineal.

Para comprobar si el modelo RCA4 reproduce bien la distribución temporal y espacial del clima de la zona del Patiño se comparan los datos Precipitación del modelo con los registrados en la estaciones de Paraguarí y Aeropuerto, tal y como se puede observar en las figura nº84 y figura nº85, donde los valores relacionados con la media están bien ajustados los relacionados con la desviación estándar muestran una mayor diferencia, indicando que los volúmenes aportados están bien recogidos aunque la variabilidad intermensual no quede del todo bien representado. Dado que la primera cuestión la que tiene una mayor incidencia en la evolución de los niveles del acuífero, se considera que las simulaciones de recarga realizadas en base a los datos de este modelo son aceptables y adecuadas a nivel comparativo.

Para obtener los datos de recarga es necesario analizar los datos de temperatura y precipitación que a posteriori serán incorporados en el modelo SWAT y de esta forma obtener un función de recarga que recoja el escenario de cambio climático simulado.

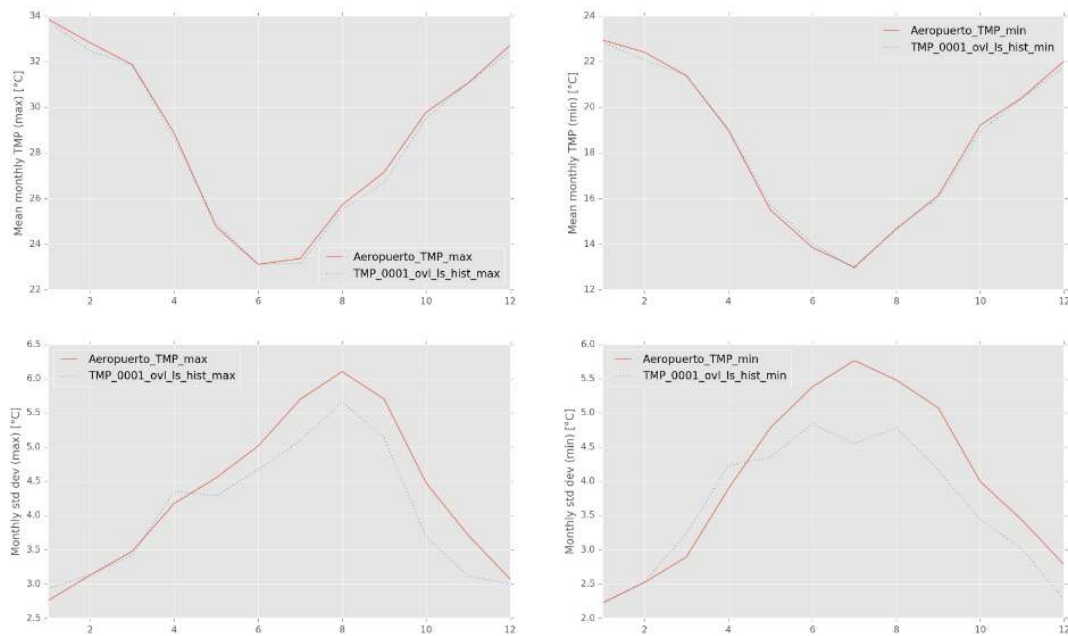


Figura n°84. Comparación entre los datos de temperatura máxima y mínima del modelo RCA4 y las estación del Aeropuerto

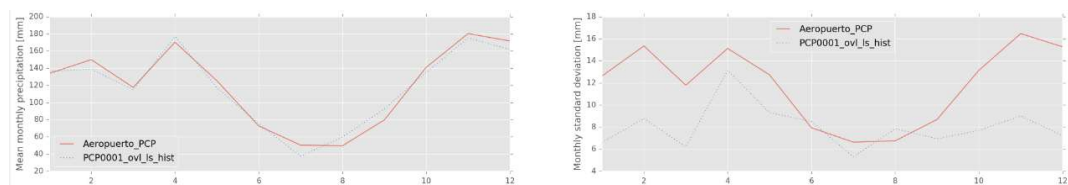


Figura n°85. Comparación entre los datos de precipitación del modelo RCA4 y las estación del Aeropuerto

Se analizan los períodos comprendidos entre los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2099 en relación al período de referencia 1961-1990, de esta forma se analizan las anomalías existentes tanto de precipitación como de temperatura.

El resultado comparativo entre las medias de precipitación mensual del período histórico y los períodos futuros figura n°86 muestra como existe un comportamiento diferente a lo largo del año, en el que en los meses de enero a julio la precipitación se reduce respecto al período histórico y en cambio los meses de final de año esta misma aumenta. Las anomalías presentadas en cada uno de los periodos se muestran en la tabla n°16, en la que se aprecia como existe un incremento de la precipitación durante el periodo comprendido entre los años 2041-2070, no presentando prácticamente variación para el resto de los años.

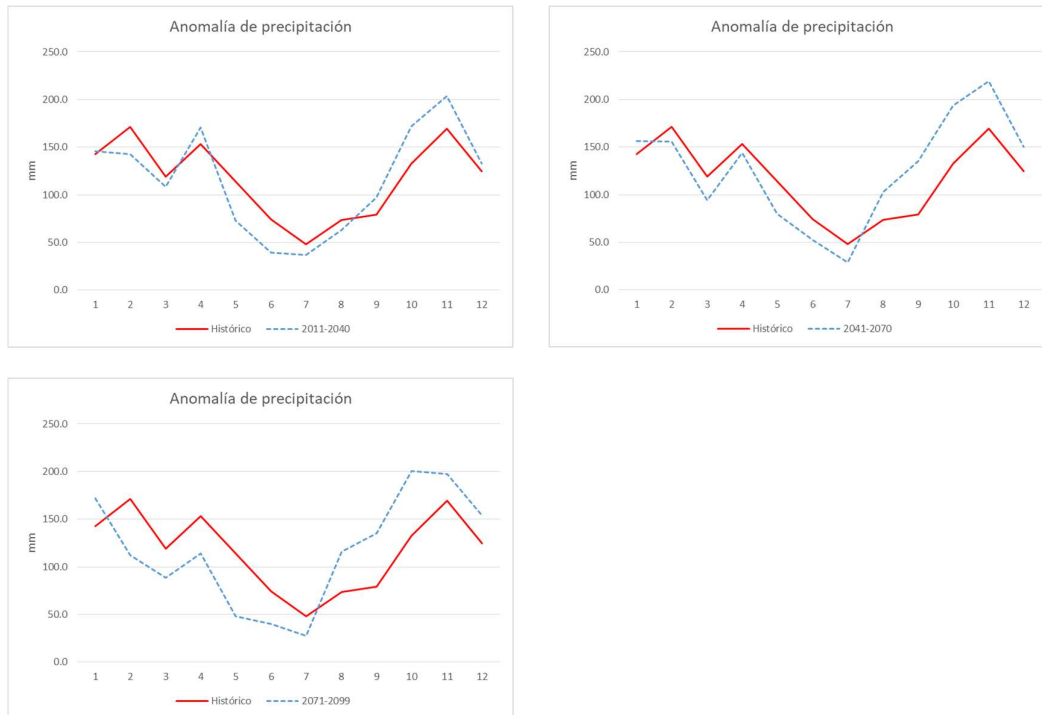
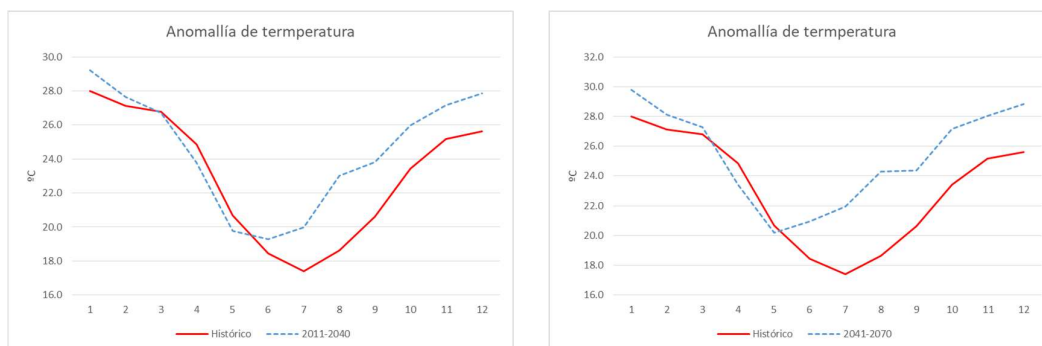


Figura nº86. Comparación entre los datos proyectados a futuro y el periodo histórico obtenidos para la precipitación.

2011-2040	2041-2070	2071-2099
-1%	8%	0%

Tabla nº16. Anomalías de precipitación presentadas en cada periodo respecto al período histórico



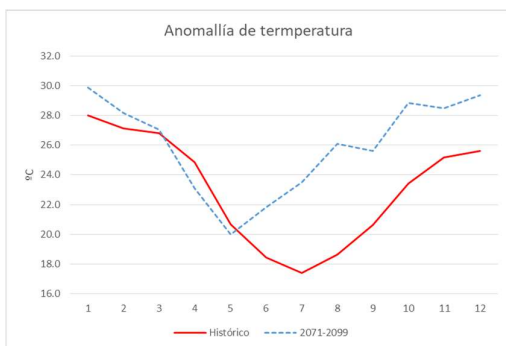


Figura nº87. Comparación entre los datos proyectados a futuro y el periodo histórico obtenidos para la precipitación.

En el caso de la temperatura se aprecia como existe un claro aumento de la temperatura durante en la segunda mitad del año (ver figura nº87) la cual se va incrementando a medida que se aproxima año 2100, en este caso la anomalía de temperatura respecto al período histórico se puede observar en la tabla nº17

2011-2040	2041-2070	2071-2099
1°C	2°C	3°C

Tabla nº17. Anomalías de temperatura presentadas en cada periodo respecto al período histórico

Estos datos muestran que las variaciones climáticas esperadas para el escenario RCP 4.5, presenta una mayor anomalía respecto a la precipitación en el período comprendido entre los años 2041-2070 alcanza un 8% de aumento. En el caso de la temperatura el incremento de temperatura previsto es moderado alcanzando su máximo de 3°C, en el período 2071-2099. En ambos casos las anomalías se presenta de forma estacional en la segunda mitad del año.

9.1.2 Estimación de la recarga en base al cambio climático

Una vez analizados los datos de la serie que ofrece el modelo de “downscaling” considerando el escenario RCP 4.5, se realiza la estimación de la recarga de la misma forma que se determinó en la determinación en la fase relacionada con la construcción del modelo.

Se retoma el modelo SWAT de transformación lluvia escorrentía ya calibrado durante la fase anterior.

Se introducen los datos de Precipitación, Temperatura máxima y Temperatura Mínima, tanto correspondientes al periodo histórico como la predicción hasta el año 2100. La ejecución del modelo, retorna un valor de recarga en mm para cada una de las subcuencas del modelo obteniendo el resultado que se muestra en la figura nº88, las anomalías que se presentan en la función de recarga se pueden consultar en la tabla nº18

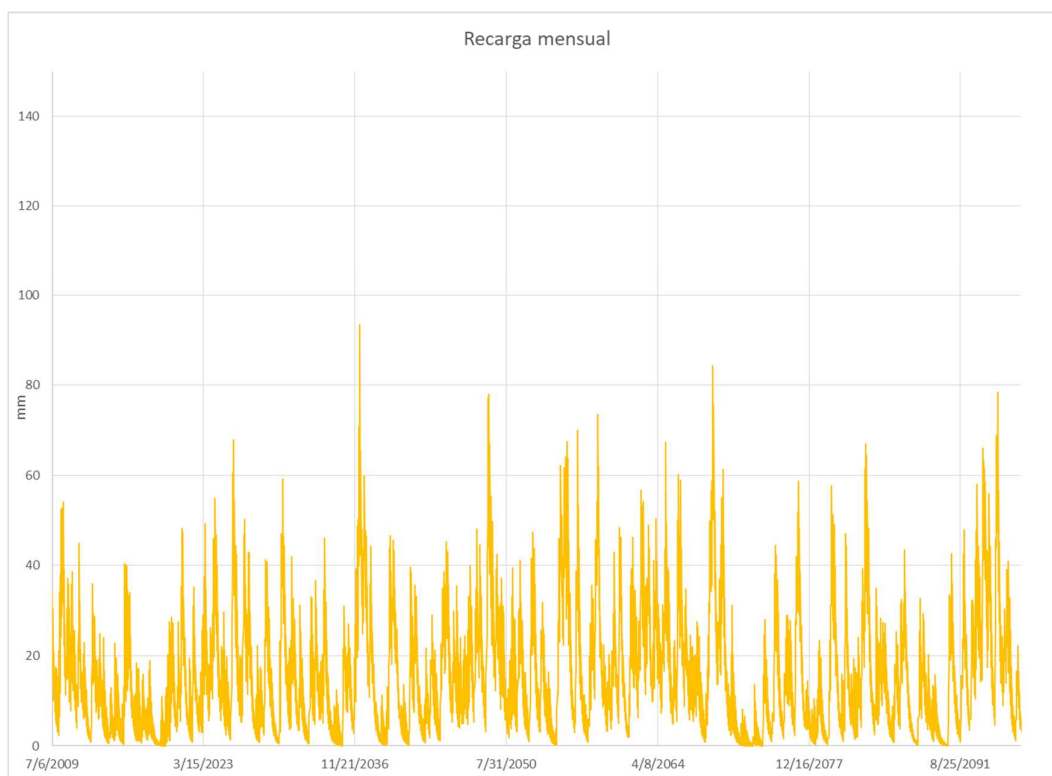


Figura nº88. Serie de recarga obtenida a partir del modelo regional RCA4 y el escenario de cambio climático RCP 4.5.

2011-2040	2041-2070	2071-2099
-12%	21%	-7%

Tabla nº18. Anomalías de recarga presentadas en cada periodo respecto al período histórico

9.1.3 Efecto del cambio climático en la evolución de los niveles del acuífero Patiño

La función de descarga obtenida en el capítulo anterior y mostrada en la figura nº88, se incorpora en el modelo ModFlow para de esta forma conocer la incidencia del cambio climático en la evolución de los niveles del acuífero.

De forma análoga al análisis realizado para el resto de variables como la temperatura, precipitación o la propia recarga, se realiza un examen comparativo entre el estado de los niveles piezométricos del acuífero entre el período histórico y los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2099.

El resto de variables como extracciones o recarga inducida debido a la pérdida de las redes de abastecimiento y saneamiento se mantienen constantes e igual a la época actual, con el objetivo de mostrar de forma unívoca el comportamiento del acuífero debido al cambio climático reflejado en la función de recarga.

El resultado que se muestra son un conjunto de mapas que representan las diferencias piezométricas entre dos momentos temporales determinados.

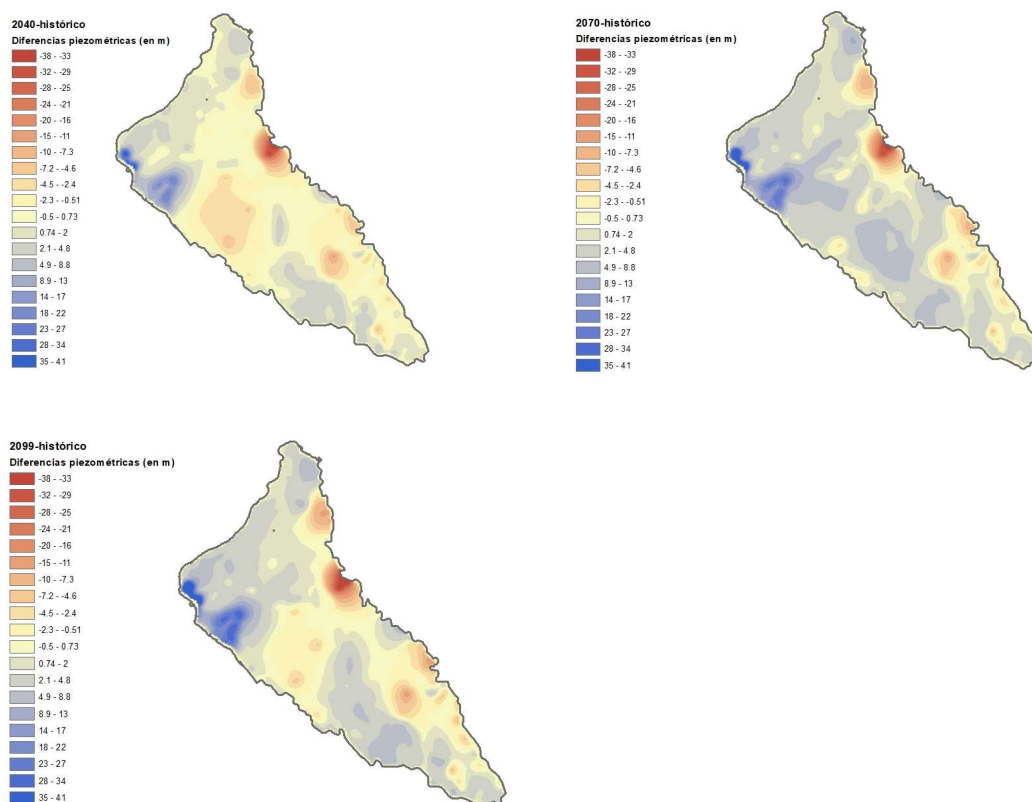


Figura nº89. Diferencia de niveles piezométricos considerando el efecto del cambio climático, a partir del modelo regional RCA4 y el escenario de cambio climático RCP 4.5.

En la figura nº89 se muestra la diferencia de niveles comparando los niveles obtenidos distintos intervalos comprendidos entre los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2099, en relación al intervalo histórico comprendido entre los años 1960-1990. Se aprecia como existe en términos generales una evolución de niveles semejante a lo que se refleja en la recarga, un primer intervalo (2011-2040) donde los niveles se mantienen constantes, descendiendo en determinados lugares de forma importante, sobre estos descensos se considera importante aclarar que no se debe considerar determinadas inestabilidades observadas en las modelaciones de más de 100 años que muestran descensos no posibles en los bordes como es el caso de la zona de Areguá. Por su parte en lugares como es el caso de Asunción o Lambaré los niveles presentan una clara tendencia ascendente o anomalía positiva.

En el siguiente intervalo (2041-2070) se aprecia una clara anomalía positiva donde los niveles aumentan en referencia al intervalo histórico de forma general, estos ascensos son más importantes en las zonas del Noroeste, por su parte en las zonas de Sur como en el caso de Yaguarón, el acuífero muestra determinados descensos de importancia, aunque muy localizados se aprecian estas anomalías negativas en la figura nº89.

En el último intervalo considerado (2071-2099), nuevamente la recarga presenta una anomalía negativa, que se refleja de forma clara en el mapa de diferencias presentado, aún y así las anomalías presentada en buena parte del acuífero son positivas, mostrando así la elevada

inercia que presenta el sistema de almacenamiento del acuífero, que es capaz de compensar épocas de menor recarga con otras anteriores donde la recarga ha sido abundante.

Si se examina la evolución en el tiempo de las anomalías presentadas por los piezómetros de control 6, 1 y 23 entre el año 2010 y 2099 (ver figura nº90) se puede observar de forma clara como la evolución climática prevista por los modelos de cambio climático reflejada en la evolución de la recarga, se muestra de la misma forma en la evolución de los niveles, estos descienden en las intervalos de anomalías negativas, pero el acuífero recupera sus niveles actuales en los periodos de anomalías positivas, mostrando que a nivel general no es de esperar una fuerte incidencia en el nivel cuantitativo del acuífero debido al cambio climático.

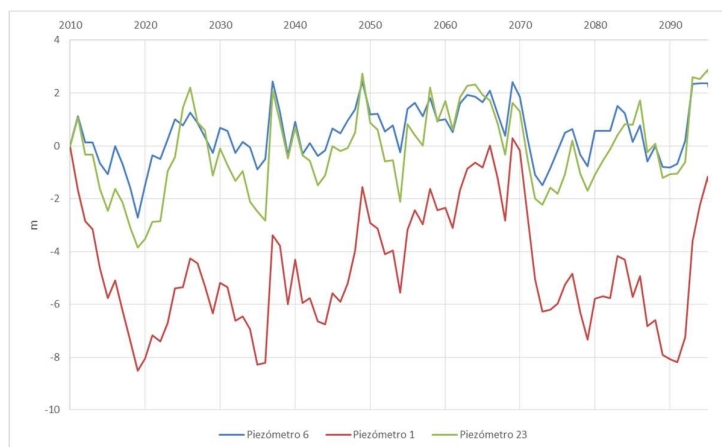


Figura nº90. Diferencia de niveles piezométricos considerando el efecto del cambio climático, a partir del modelo regional RCA4 y el escenario de cambio climático RCP 4.5, en los piezómetros de control 6,1 y 23

9.2 Escenarios de gestión del acuífero

Para analizar la importancia de la gestión del acuífero se van a considerar una serie de escenarios donde se pretende visualizar como impactarían sobre el acuífero las diferentes presiones antrópicas que podrían darse.

En el siguiente capítulo se analizan 2 grupos de escenarios:

- **Expansión urbanística:** Evolución de la expansión urbanística y social siguiendo los mismos patrones que en la actualidad. Esta hipótesis se basa en aplicar la misma tasa de crecimiento que la actual hasta el año 2050. Se utilizarán los datos extraídos del documento de Proyección de la población por sexo y Edad según distrito 2000-2025. Revisión 2015 (Dirección General de Estadística, 2015) y se trabajará a nivel de distrito.
- **Expansión sostenible:** Evolución sostenible de las ciudades, siguiendo un límite de “sostenibilidad” que define un número máximo de habitantes. En este caso se utilizarán los datos elaborados por la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo (IADB, 2014), que también sirvieron para la elaboración del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (geAM - GESTIÓN AMBIENTAL & MOPC, 2014).

En ambos casos se estudiarán 2 posibles escenarios:

- **Escenario extremo:** donde se considera que toda la nueva población proyectada se abastece de agua subterránea a través de pozos de bombeo nuevos o existentes. Esta hipótesis, aunque poco probable, se basaría en el hecho que la capacidad actual de la planta de potabilización ya habría superado su límite máximo y que no hubiera ninguna ampliación ni nueva planta. Sería el escenario donde el acuífero soportaría la máxima presión antrópica.
- **Escenario más probable:** se supone que la nueva población proyectada se abastece de recurso subterráneo (25%) y superficial (75%), considerando que se hayan construido nuevas plantas y redes de distribución y se aproveche el recurso del río Paraguay.

9.3 Evolución de la expansión urbanística y social

A continuación se analiza los efectos de un crecimiento de población siguiendo el mismo patrón que los últimos 10 años.

9.3.1 Proyección de población futura

El área metropolitana de Asunción se caracteriza por un aumento sostenido de la población en todos aquellos municipios que conforman el cinturón metropolitano. Sin embargo, este crecimiento se da de una manera un tanto desordenada. Además, los servicios básicos tienden a concentrarse en la propia Asunción y municipios cercanos, lo que provoca que el crecimiento en otros municipios se desarrolle de una forma dispersa, generalmente en espacios que antes eran destinados a la producción agrícola y ganadera.

Para valorar la demanda de agua futura se utilizará la población proyectada a 2050 para cada uno de los distritos del ámbito de estudio.

Para ello, se calcula la tasa de crecimiento anual cuya fórmula es la siguiente:

$$Tasa = \left(\left(\frac{P_f}{P_i} \right)^{1/n} - 1 \right) * 100$$

Donde,

Pf=Población final

Pi=Población inicial

N=número de años considerados

En este caso se utilizan los datos recogidos en el documento de Proyección de la población por sexo y Edad según distrito 2000-2025. Revisión 2015 (Dirección General de Estadística, 2015) para los datos entre los años 2007 y 2017. A partir de la tasa de anual obtenida se proyecta la población al año 2050 para cada distrito.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

DISTRITO	2007	2017	Tasa crecimiento anual	Población proyectada a 2050
Asunción	531.831	524.190	-0,14	499.745
Areguá	54.838	72.278	2,80	179.786
Capiatá	184.269	228.431	2,17	464.146
Fernando de la Mora	136.193	170.361	2,26	356.600
Guarambaré	22.251	34.618	4,52	148.849
Itá	60.870	77.229	2,41	169.404
Itauguá	75.805	103.350	3,15	287.430
Lambaré	142.137	173.884	2,04	338.207
Limpio	94.220	136.323	3,76	461.291
Luque	219.560	268.247	2,02	519.487
Mariano Roque Alonso	78.709	99.658	2,39	217.131
Ñemby	91.929	131.048	3,61	422.238
San Antonio	47.276	64.471	3,15	179.454
San Lorenzo	230.748	254.358	0,98	350.800
Villa Elisa	63.118	77.287	2,05	150.783
Ypacaraí	21.994	26.917	2,04	52.422
Ypané	33.469	50.708	4,24	199.760
J. Augusto Saldívar	43.938	52.709	1,84	96.102
Pirayú	16.567	17.727	0,68	22.163
Yaguarón	28.914	31.433	0,84	41.410
TOTAL		2.565.811		5.115.797

Tabla nº19. Población proyectada a 2050. Fuente: cálculos realizados a partir de datos de DGEEC

En el caso particular de Asunción se observa una tasa de crecimiento negativo que viene dado por un ligero descenso del número de habitantes de los últimos años debido a la migración hacia distritos vecinos. A efectos de cálculo de las demandas futuras se considera que la población se mantiene idéntica que el año 2017.

9.3.2 Escenarios modelados

9.3.2.1 Escenario extremo (EE)

En este escenario se considera que toda la población que ha aumentado desde el año 2017 se abastece únicamente por agua procedente de pozos nuevos o ya existentes.

Esta hipótesis, aunque poco probable, se basaría en el hecho que la capacidad actual de la planta de potabilización ya habría superado su límite máximo y que no hubiera ninguna ampliación ni se llevara a cabo la construcción de ninguna planta o bien que las nuevas plantas no tuvieran la capacidad o no dispusieran de una red de distribución adecuada.

Si bien es un escenario poco probable y poco realista, es interesante estudiar como respondería el sistema ante una situación de máxima presión antrópica.

9.3.2.2 Escenario más probable (EP)

Se parte de una distribución de origen del recurso consistente en 25% procedente del acuífero y el 75% restante abastecido por el río Paraguay. Este escenario se basa en la construcción de nuevas plantas potabilizadoras y/o ampliación de la actual, así como la disposición de redes de distribución que dieran servicio a la población cubriendo las necesidades del 75% de la población adicional. El 25% restante se abastece de pozos nuevos o ya existentes. Esta distribución 75%/25% se considera en todo el ámbito.

9.3.3 Extracciones

Para calcular el volumen de incremento en las extracciones se parte del aumento de población proyectado calculado según lo detallado en el apartado 9.3.1, considerando los siguientes supuestos:

- **Escenario Extremo:** Toda la nueva población proyectada se abastece de agua subterránea a través de pozos de bombeo nuevos o existentes.
- **Escenario más probable:** se supone que la nueva población proyectada se abastece de recurso subterráneo (25%) y superficial (75%), considerando que se hayan construido nuevas plantas y se aproveche el recurso del río Paraguay.

Para ambos escenarios se procede a calcular la demanda asociada únicamente al aumento de población y considerando el origen del recurso según lo mencionado. La demanda se calcula a nivel de distrito para obtener la distribución espacial de las extracciones adicionales.

Las previsiones se han considerado para los distritos en su totalidad. En el siguiente cuadro se considera la población del distrito en un porcentaje equivalente al porcentaje de área que pertenece al acuífero y se calcula el volumen de demanda que requerirá este aumento de población.

Considerando una dotación promedio de 250 l/hab.día, la demanda de esta población adicional sería de:

$$\text{Num hab} * 250 \text{ l/hab.día} * 365 / 1.000.000.000 = \text{Hm}^3/\text{año}$$

DISTRITO	2017	Población proyectada 2050	Aumento población 2017-2050	% de área perteneciente al Acuífero Patiño	Aumento de población (sólo considerando área del Acuífero Patiño)	Volumen de extracción (hm ³ /año)
Asunción	524.190	499.745	-	100	-	-
Areguá	72.278	179.786	107.508	53	56.657	5,17
Capiatá	228.431	464.146	235.715	100	235.715	21,51
Fernando de la Mora	170.361	356.600	186.239	100	186.239	16,99
Guarambaré	34.618	148.849	114.231	84	95.954	8,76
Itá	77.229	169.404	92.175	64	58.716	5,36
Itauguá	103.350	287.430	184.080	93	171.194	15,62
Lambaré	173.884	338.207	164.323	79	129.158	11,79
Limpio	136.323	461.291	324.968	71	232.027	21,17
Luque	268.247	519.487	251.240	72	179.636	16,39
Mariano Roque Alonso	99.658	217.131	117.473	100	117.473	10,72
Ñemby	131.048	422.238	291.190	100	291.190	26,57
San Antonio	64.471	179.454	114.983	100	114.983	10,49
San Lorenzo	254.358	350.800	96.442	100	96.442	8,80
Villa Elisa	77.287	150.783	73.496	100	73.496	6,71
Ypacaraí	26.917	52.422	25.505	31	7.983	0,73
Ypané	50.708	199.760	149.052	60	88.835	8,11
J. Augusto Saldívar	52.709	96.102	43.393	100	43.393	3,96
Pirayú	17.727	22.163	4.436	39	1.708	0,16
Yaguarón	31.433	41.410	9.977	47	4.719	0,43
TOTAL	2.565.811	5.115.797		-	2.161.072	199,43

Tabla nº20. Aumento de población hasta 2050 por distrito dentro del ámbito de estudio

La demanda adicional que requerirá el aumento de población proyectada sería de un total de: 199,43 hm³/año, siempre y cuando consideremos las tasas de crecimiento actuales de población.

A continuación se analiza cómo se abastece en los 2 escenarios que se estudian:

DISTRITO	Aumento de población dependiente del Acuífero Patiño	Escenario Extremo (hm ³ /año)	Escenario Probable (hm ³ /año)
Asunción	-	-	-
Areguá	56.657	5,17	1,29
Capiatá	235.715	21,51	5,38
Fernando de la Mora	186.239	16,99	4,25
Guarambaré	95.954	8,76	2,19
Itá	58.716	5,36	1,34
Itauguá	171.194	15,62	3,91
Lambaré	129.158	11,79	2,95
Limpio	232.027	21,17	5,29
Luque	179.636	16,39	4,10
Mariano Roque Alonso	117.473	10,72	2,68
Ñemby	291.190	26,57	6,64
San Antonio	114.983	10,49	2,62
San Lorenzo	96.442	8,80	2,20
Villa Elisa	73.496	6,71	1,68
Ypacaraí	7.983	0,73	0,18
Ypané	88.835	8,11	2,03
J. Augusto Saldívar	43.393	3,96	0,99
Pirayú	1.708	0,16	0,04
Yaguarón	4.719	0,43	0,11
TOTAL	2.161.072	199,43	49,86

Tabla nº21. Demanda servida con agua subterránea

9.3.4 Resultados

Las simulaciones realizadas parten del modelo de flujo desarrollado donde se han incluido:

- Las series futuras calculadas con los efectos del cambio climático según lo considerado en el apartado 9.1
- Las extracciones de agua de la demanda adicional generada por el crecimiento poblacional estimado.

El resultado que se analiza es el correspondiente al año 2050 para ambos escenarios planteados.

El análisis de la situación se refleja en las siguientes figuras, donde se ha plasmado la diferencia piezométrica que se produciría entre los años 2017 y 2050. Es decir, nos indican cómo responde el acuífero ante el crecimiento experimentado entre estos años.

Legenda

Diferencias piezométricas (m)

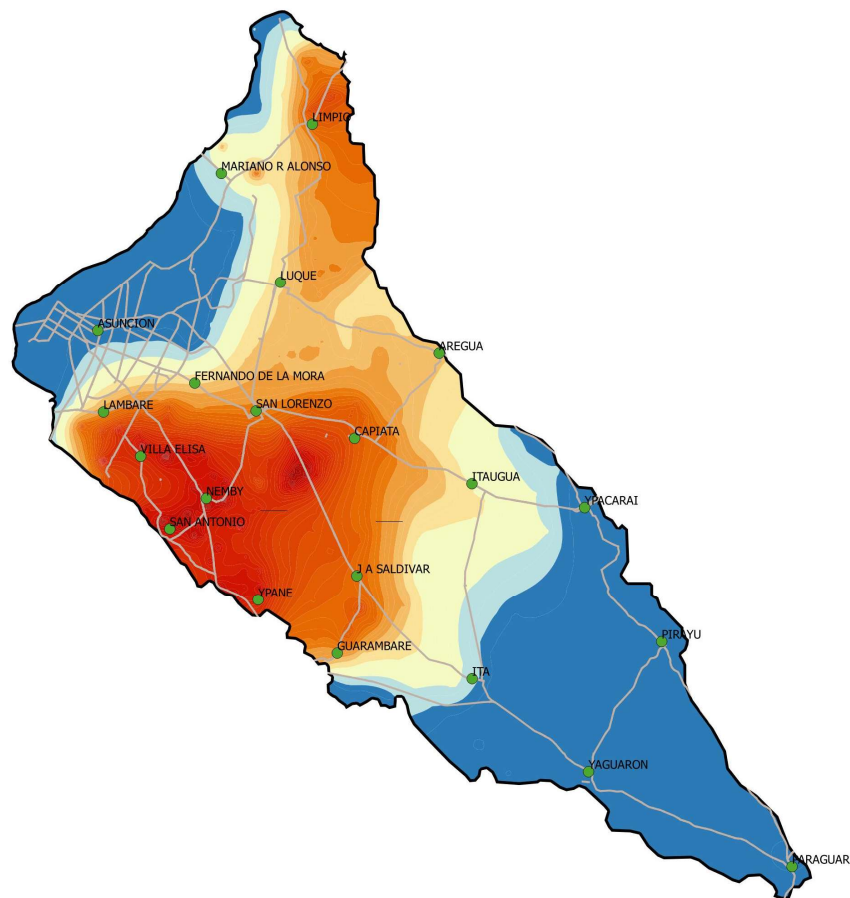
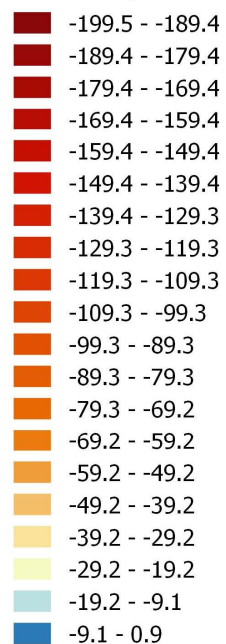


Figura nº91. Distribución de las diferencias piezométricas en la simulación aplicando una expansión urbanística tendencial y en un escenario extremo.

Leyenda

Diferencias piezométricas

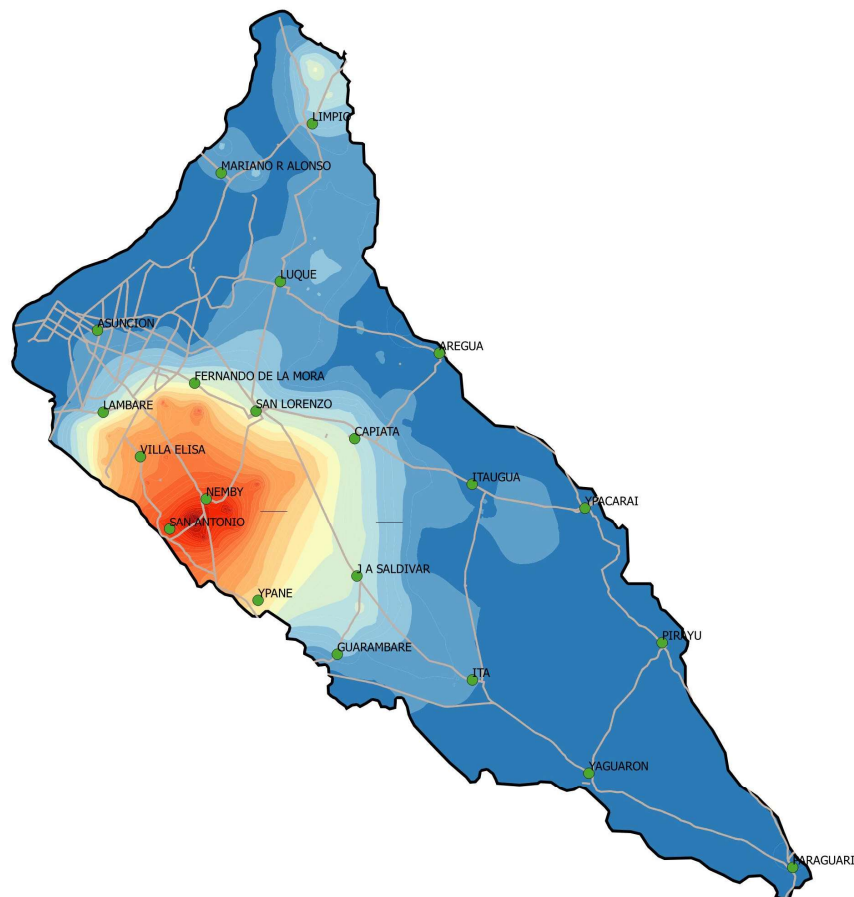
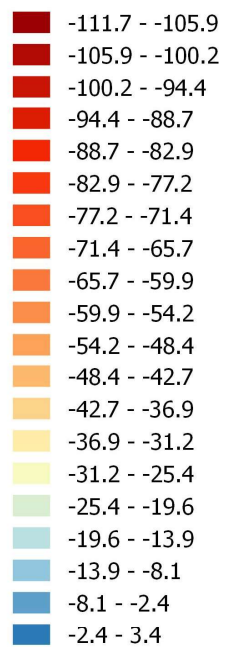


Figura nº92. Distribución de las diferencias piezométricas en la simulación aplicando una expansión urbanística tendencial y en un escenario probable.

9.3.5 Interpretación de resultados

Analizando la diferencia piezométrica obtenida en este supuesto se puede observar unos descensos de nivel muy bruscos, sobretudo en la zona de San Antonio, Ñemby y Villa Elisa, con valores, en algunos casos, demasiado elevados llegando a alcanzar hasta los 70m de descenso del nivel en el escenario probable y los 160m en el escenario extremo.

Estos valores, lejos de ser realistas, no deben tomarse a pie de letra ya que resultan de una hipótesis donde estamos forzando el sistema, sino que deben interpretarse como un indicador que el acuífero no sería capaz de soportar la presión antrópica que generaría una tasa de crecimiento idéntica y concentrada en la misma zona donde se produce en la actualidad. En otras palabras, el resultado de la simulación nos indica un descenso incompatible con la explotación en esas condiciones.

En estas condiciones se debería tener en cuenta ciertas apreciaciones. La tasa de crecimiento utilizada hasta 2050 es la misma que los últimos 10 años, y centrada en las mismas zonas que se produce en la actualidad, lo que a larga no es sostenible ya que las zonas de migración no tienen porque mantenerse a lo largo de tantos años. Además, esta hipótesis se basa únicamente en los patrones de crecimiento actual, sin considerar como evolucionarán los diferentes núcleos urbanos en cuanto a servicios, lo que sin duda puede condicionar hacia donde se orienta la expansión urbana y social.

Por ello, se ha planteado modelar otro tipo de situación que pudiera considerar una planificación urbana tal y como se planteó en el informe ICES del BID y en el PEMA de Gran Asunción. En esta nueva hipótesis se partiría de la base que el crecimiento poblacional debería considerar un umbral máximo sobre el cual ya no es sostenible mantener más población.

9.4 Evolución sostenible de la población

A continuación se analiza los efectos de un crecimiento de población siguiendo el mismo patrón que los últimos 10 años.

9.4.1 Proyección de población futura

Los datos utilizados para la proyección de las demandas futuras se basan en los datos elaborados por la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo (IADB, 2014), que también sirvieron para la elaboración del Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (geAM - GESTIÓN AMBIENTAL & MOPC, 2014).

En este informe se realizó un análisis histórico y actual del crecimiento de la huella urbana partiendo de considerar la relación de la ciudad con el entorno y las dinámicas globales y regionales que inciden en dicho crecimiento. Se proyectaron además 3 escenarios de crecimiento urbano a largo plazo (2050): tendencial, óptimo e intermedio.

- Tendencial: patrones de crecimiento actuales, de uso y ocupación del suelo, sin ningún tipo de intervención desde el punto de vista de la planificación
- Óptimo: modelo de crecimiento que aplica criterios “inteligentes” de uso y ocupación de suelos. Es la situación ideal donde se han aplicado todos los elementos de planificación deseados
- Intermedio: situación entre los dos anteriores, considerando las actuaciones más viables que parten del consenso de la mayoría de voluntades políticas y ciudadanas.

El escenario óptimo es el más improbable y difícil de lograr ya que demandaría un monto de inversión demasiado elevado.

El escenario intermedio plantea la solución más viable y razonable en cuanto a crecimiento urbano considerando los siguientes criterios tal y como se describe en el documento del ICES (IADB, 2014): Crecimiento ordenado en Asunción, Fernando la Mora, Lambaré, Mariano Roque Alonso y Luque, Crecimiento ordenado y más denso en el segundo anillo, Crecimiento planificado en el tercer anillo y los asentamientos precarios desaparecen y no se considera nuevas edificaciones en el espacio rural.

El escenario tendencial plantea un crecimiento urbano siguiendo el patrón actual sin cambios significativos, es decir, un crecimiento que se produce en torno a las principales vías de comunicación, con un crecimiento de los asentamientos precarios y en el caso del entorno rural un aumento de las viviendas dispersas.

En este caso, y a efectos del cálculo de extracciones, se va a considerar en todo momento los datos correspondientes al escenario tendencial, ya que representa la evolución urbanística y social siguiendo los patrones actuales pero dando un límite poblacional por encima del cual no se considera sostenible el crecimiento. Es decir, que alcanzado el límite de sostenibilidad ya no se considera un aumento de población derivando el crecimiento hacia otras zonas.

9.4.2 Escenarios modelados

Al igual que en el apartado anterior se plantean 2 escenarios.

9.4.2.1 Escenario extremo (EE)

En este escenario se considera que toda la población que ha aumentado desde el año 2017 se abastece únicamente por agua procedente de pozos nuevos o ya existentes.

Esta hipótesis, aunque poco probable, se basaría en el hecho que la capacidad actual de la planta de potabilización ya habría superado su límite máximo y que no hubiera ninguna ampliación ni se llevara a cabo la construcción de ninguna planta o bien que las nuevas plantas no tuvieran la capacidad o no dispusieran de una red de distribución adecuada.

Si bien es un escenario poco probable y poco realista, es interesante estudiar como respondería el sistema ante una situación de máxima presión antrópica.

9.4.2.2 Escenario más probable (EP)

Se parte de una distribución de origen del recurso consistente en 25% procedente del acuífero y el 75% restante abastecido por el río Paraguay. Este escenario se basa en la construcción de nuevas plantas potabilizadoras y/o ampliación de la actual, así como la disposición de redes de distribución que dieran servicio a la población cubriendo las necesidades del 75% de la población adicional. El 25% restante se abastece de pozos nuevos o ya existentes. Esta distribución 75%/25% se considera en todo el ámbito.

9.4.3 Extracciones

Para ambos escenarios se procede a calcular la demanda asociada al aumento de población y considerando el origen del recurso según lo mencionado. La demanda se calcula a nivel de distrito para obtener la distribución espacial de las extracciones.

Partiendo de los datos de la población proyectada a 2017 (según cifras de la DGEEC), y considerando los datos del informe de ICES como población proyectada hasta 2050 en un escenario tendencial, el aumento de población en los distritos del ámbito de estudio son los siguientes:

DISTRITO	Población proyectada a 2017	2020	2030	2040	2050	Aumento población 2017-2050
Asunción	524.190	512.112	512.112	512.112	512.112	0
Areguá	72.278	127.206	227.807	391.451	391.451	319.173
Capiatá	228.431	283.340	283.340	283.340	283.340	54.909
Fernando de la Mora	170.361	135.835	150.046	154.274	154.274	0
Guarambaré	34.618	28.409	38.179	51.309	82.899	48.281
Itá	77.229	143.833	257.583	461.292	484.804	407.575
Itauguá	103.350	172.976	289.656	289.656	289.656	186.306
Lambaré	173.884	132.328	132.328	132.328	132.328	0
Limpio	136.323	208.818	324.007	324.007	324.007	187.684
Luque	268.247	460.790	460.790	460.790	460.790	192.543
Mariano Roque Alonso	99.658	131.249	131.249	131.249	131.249	31.591
Ñemby	131.048	108.101	108.101	108.101	108.101	0
San Antonio	64.471	83.671	83.671	83.671	83.671	19.200
San Lorenzo	254.358	249.109	249.109	249.109	249.109	0
Villa Elisa	77.287	71.583	71.583	71.583	71.583	0
Ypacaraí	26.917	31.546	42.395	56.976	76.571	49.654
Ypané	50.708	72.560	129.944	143.435	143.435	92.727
J. Augusto Saldívar	52.709	105.993	105.993	105.993	105.993	53.284
Pirayú	17.727	25.542	34.326	46.131	61.996	44.269
Yaguarón	31.433	44.236	59.450	46.131	107.372	75.939
						1.763.135

Tabla n°22. Aumento de población hasta 2050 por distrito considerando el escenario tendencial definido por ICES (IADB, 2014)

Estas previsiones se han considerado para los distritos en su totalidad. En el siguiente cuadro se considera la población del distrito en un porcentaje equivalente al porcentaje de área que pertenece al acuífero y se calcula el volumen de demanda que requerirá este aumento de población. En aquellos distritos donde se ha alcanzado el “límite de sostenibilidad” la demanda queda idéntica a la actual.

Considerando una dotación promedio de 250 l/hab.día, la demanda de esta población adicional sería de:

$$1196078 \text{ hab} * 250 \text{ l/hab.día} * 365 / 1.000.000.000 = 109,14 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

DISTRITO	Población proyectada a 2017	Aumento población 2017-2050	% de área perteneciente al Acuífero Patiño	Aumento de población dependiente del Acuífero Patiño	Demanda de la población "adicional" (hm ³ /año)
Asunción	524.190	0	100	0	0,00
Areguá	72.278	319.173	52,7	168.204	15,35
Capiatá	228.431	54.909	100	54.909	5,01
Fernando de la Mora	170.361	0	100	0	0,00
Guarambaré	34.618	48.281	84,0	40.556	3,70
Itá	77.229	407.575	63,7	259.625	23,69
Itauguá	103.350	186.306	93,0	173.265	15,81
Lambaré	173.884	0	78,6	0	0,00
Limpio	136.323	187.684	71,4	134.006	12,23
Luque	268.247	192.543	71,5	137.668	12,56
Mariano Roque Alonso	99.658	31.591	100	31.591	2,88
Ñemby	131.048	0	100	0	0,00
San Antonio	64.471	19.200	100	19.200	1,75
San Lorenzo	254.358	0	100	0	0,00
Villa Elisa	77.287	0	100	0	0,00
Ypacaraí	26.917	49.654	31,3	15.542	1,42
Ypané	50.708	92.727	59,6	55.265	5,04
J. Augusto Saldívar	52.709	53.284	100	53.284	4,86
Pirayú	17.727	44.269	38,5	17.044	1,56
Yaguarón	31.433	75.939	47,3	35.919	3,28
TOTAL	2.595.227	1.763.135	-	1.196.078	109,14

Tabla nº23. Aumento de población hasta 2050 por distrito considerando el escenario tendencial definido por ICES (IADB, 2014)

La demanda adicional que requerirá el aumento de población proyectada sería de: 109,14 Hm³/año, centrándose en los distritos más orientales.

9.4.4 Resultados

Las simulaciones realizadas parten del modelo de flujo desarrollado donde se han incluido:

- Las series futuras calculadas con los efectos del cambio climático según lo considerado en el apartado 9.1
- Las extracciones de agua de la demanda adicional generada por el crecimiento poblacional estimado.

El resultado que se analiza es el correspondiente al año 2050 para ambos escenarios planteados.

El análisis de la situación se refleja en las siguientes figuras, donde se ha plasmado la diferencia piezométrica que se produciría entre los años 2017 y 2050. Es decir, nos indican cómo responde el acuífero ante el crecimiento experimentado entre estos años.

Leyenda

Diferencias piezométricas (m)

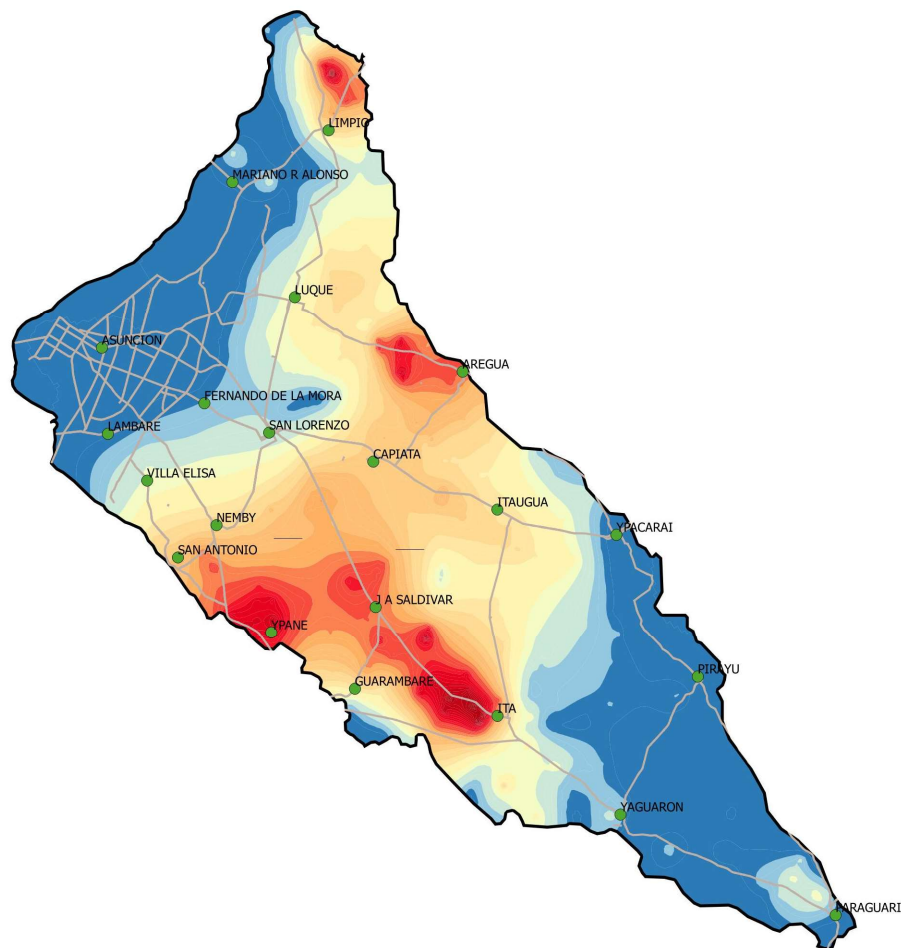
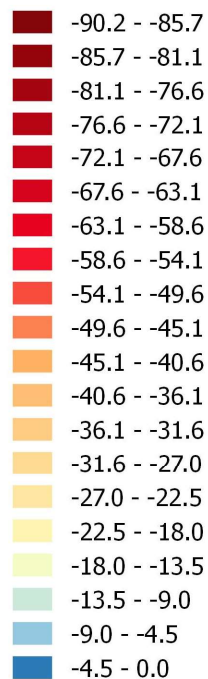


Figura nº93. Distribución de las diferencias piezométricas al año 2050 en la simulación aplicando una expansión sostenible y en un escenario extremo.

Leyenda

Diferencias piezométricas (m)

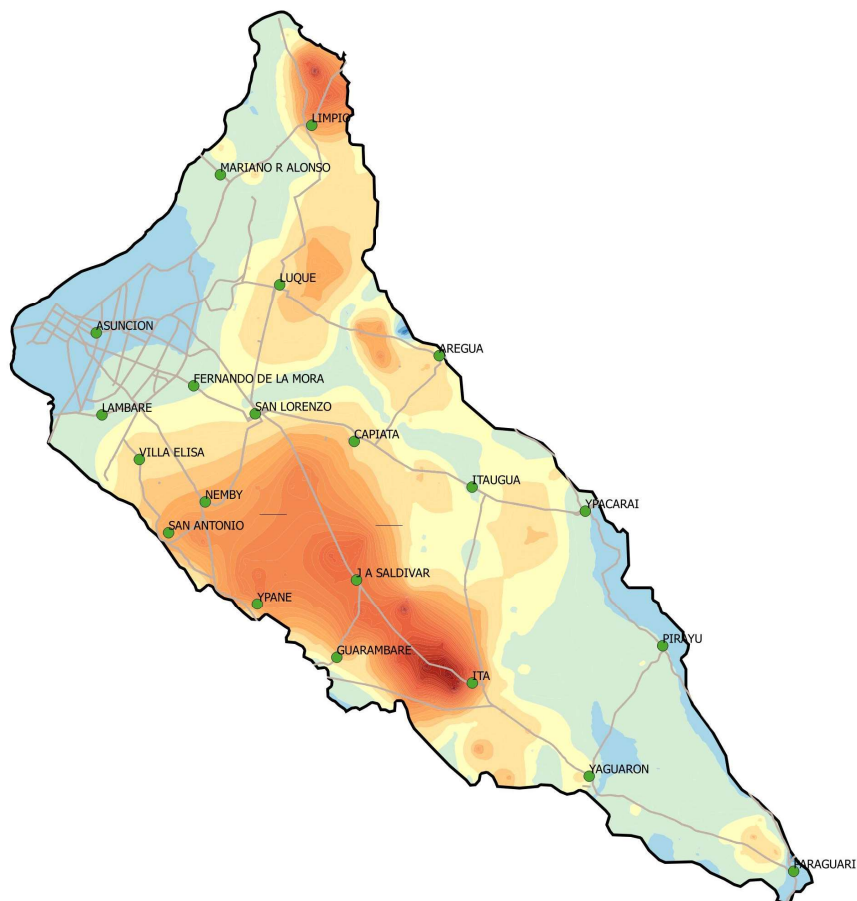
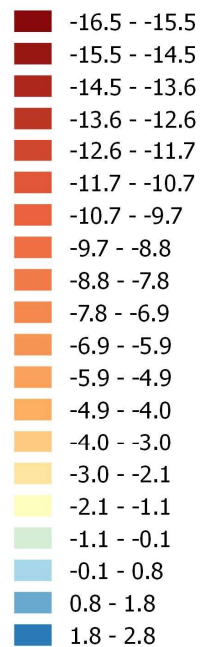


Figura nº94. Distribución de las diferencias piezométricas al año 2050 en la simulación aplicando una expansión sostenible y en un escenario probable

9.4.5 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos muestran un descenso mucho más moderado y desplazado hacia el sur que en la simulación del apartado anterior. En este caso el acuífero se encuentra fuertemente presionado en la zona de Guarambaré, Ypané y San Antonio pero generando descensos de hasta 16 m en el caso del escenario probable y 90m en el caso del escenario extremo.

A la vista de estos resultados las conclusiones son:

- A pesar de una evolución sostenible, el escenario extremo donde solo se utilice el agua subterránea no resulta factible ya que el acuífero no podría soportar tal descenso.
- En el caso del escenario probable, el acuífero se vería presionado en la zona de Guarambaré, Ypané y San Antonio, produciendo descensos de hasta 16m. que podrían ser gestionados de manera más eficaz.
- La presión que soporta el acuífero viene determinada en gran medida de la gestión que se realice de la utilización del recurso.

10 CONCLUSIONES

En base al trabajo realizado en la fase de Diagnóstico se ha consensuado un modelo conceptual que ha servido de base para construir el modelo numérico de flujo y transporte.

Se ha construido un modelo numérico de flujo de diferencias finitas con el software Visual Modflow 5.0. El modelo numérico ha puesto a prueba el modelo conceptual surgido de la recopilación de datos y el documento diagnóstico. Se asume que el Acuífero Patiño representa un sistema de aguas subterráneas de parámetros homogéneos con una evolución de los niveles piezométricos muy controlada por la recarga directa de la lluvia y el drenaje diferido del acuífero a través la red hídrica. A efectos prácticos el acuífero se considera desconectado hidráulicamente de las formaciones geológicas circundantes, con la excepción de los materiales aluviales del río Paraguay.

Se ha calculado la recarga para el conjunto del acuífero mediante la aplicación de un modelo de transformación precipitación-escorrentía que proporciona una función de recarga continua en el tiempo y distribuida espacialmente.

Se han considerado además las recargas al acuífero debidas a las pérdidas de las redes de saneamiento y abastecimiento, estas redes tienen una aportación de agua de una fuente externa al acuífero, aportado agua procedente del río Paraguay.

Las extracciones se han calculado de dos formas diferentes, estimando las demandas en base a una dotación poblacional considerando la población servida mediante el acuífero y un segundo método considerando los caudales nominales registrados a través del inventario realizado, obteniendo como resultado valores entre 84 y 111 hm³ de extracción anual.

Los resultados de la calibración se consideran buenos ya que:

- Los parámetros estadísticos, en especial el promedio de los valores residuales absolutos, la media cuadrática normalizada y el coeficiente de correlación de los residuales, así lo indican.
- Las evoluciones de los niveles piezométricos calculadas en los puntos de control mantienen un rango de oscilaciones muy similar al medido.
- Los errores observados, salvo muy pocas excepciones, se encuentran por debajo de los errores que podrían asociarse a las cotas de referencia (DMS con 30 m de paso de malla).

Se ha verificado el modelo comparando los datos calculados de drenaje en la cuenca del río Yukyry con los datos reales y simulados con el modelo de aguas superficiales disponibles de caudal base del citado río. A nivel promedio y en su evolución general son muy similares.

El modelo numérico responde bien a la realidad observada. Se puede concluir que el modelo conceptual planteado es razonable a la escala estudiada. El balance hídrico promedio resultante indica una recarga anual promedio del orden de 259 hm³, una explotación por bombeos del orden de 90.8 hm³, un drenaje a través de la red hídrica de 136 hm³ y una salida hacia los aluviales del río Paraguay de 13.7 hm³, lo que supone un aumento del almacenamiento en el acuífero cuantificado en 18.4 hm³ anuales.

A la vista de los resultados de la calibración y la verificación y a la concordancia del modelo conceptual planteado en el diagnóstico con la realidad observada, el modelo numérico de flujo transitorio presentado se puede considerar una herramienta adecuada para la predicción de escenarios de gestión.

Se han construido un modelo de transporte que tiene como objetivo ser una herramienta de ayuda a la interpretación del modelo conceptual, ya que no es posible adoptarla como herramienta predictiva dada la ausencia de una serie de datos históricos que permita realizar una calibración del modelo y una adecuada interpretación de los resultados.

En base a este modelo se han testeado dos hipótesis de procedencia de los cloruros, la primera considera una procedencia de la zona del Chaco, comportándose de forma análoga a un contacto de dos masas de agua diferenciadas y la segunda contempla la existencia de aguas salobres congénitas producto del relleno del graben. Una vez realizadas diferentes simulaciones la hipótesis más factible es la segunda.

A partir del modelo calibrado se simulan un conjunto de escenarios que responden a diferentes situaciones y buscan objetivos diferentes, se presenta un primer conjunto de escenarios orientados a la ayuda del seguimiento y control del acuífero que responden a una matriz de variación de los parámetros más importantes que controlan su funcionamiento como son las extracciones y la recarga.

Estos escenarios muestran un acuífero en equilibrio donde un aumento de las extracciones o una reducción de la recarga próximas al 15% pondría al acuífero en una situación de desequilibrio provocando descensos puntuales máximos superiores a los 10 metros, llegando en el caso extremo (15% reducción de la recarga y 15% aumento de las extracciones) a un descenso máximo de 20 metros.

Se ha construido además un conjunto de escenarios orientados a la planificación del territorio que considera la tendencia de crecimiento poblacional observadas en la región. Sobre esta tendencia se construyen dos escenarios, uno considerado extremo que contempla que el 100% del incremento de demanda será servido desde el acuífero, y un segundo escenario, llamado escenario probable, que considera que el 25% de este incremento será proporcionado por agua subterránea.

Además, se contempla una distribución geográfica diferente para el crecimiento previsto, en la primera de ellas se proyecta un crecimiento tendencial a partir del análisis estadístico de crecimiento observado en el pasado y una segunda hipótesis donde el crecimiento se planifica en base a un conjunto de criterios de sostenibilidad del territorio.

Los resultados obtenidos de estos escenarios nos muestran como en el caso del crecimiento tendencial el escenario extremo no se considera viable y por tanto el crecimiento previsto no puede ser servido directamente desde el acuífero. Así mismo, el escenario probable, muestra unos extensos descensos en las zonas de mayor crecimiento y mayor presión actual, que provoca que este escenario tampoco pueda ser considerado como sostenible, infiriendo la necesidad de considerar fuentes de agua alternativas, que vayan asociadas al crecimiento poblacional previsto.

Para los escenarios que consideran un crecimiento planificado según el PEMA, más distribuido en el territorio, nuevamente el escenario extremo muestra la imposibilidad de servir la futura demanda directamente desde el acuífero. Por su parte el escenario probable que considera una distribución de agua superficial del 75% del incremento de demanda, podría ser viable, aunque lleva aparejado la construcción de una red de distribución a lo largo de una extensa superficie del acuífero.

El trabajo realizado en este apartado ha mostrado además un conjunto de necesidades futuras de información que serán contempladas en el plan de gestión del acuífero. En este sentido, resulta necesario desarrollar una línea estratégica de mejora del conocimiento del acuífero a través de medidas que servirán para perfeccionar el conocimiento del modelo conceptual que

rige el transporte de solutos, tener un mayor control de las extracciones del acuífero y reducir la incertidumbre asociada a la estimación de la recarga mediante conocimiento de los caudales circulantes en un mayor número de cursos fluviales.

11 BIBLIOGRAFÍA

- BGR. (2010). Exploración de las lentes de agua dulce en el Distrito de Benjamín Aceval, Dep. Presidente Hayes. *Geologische Rundschau*. <https://doi.org/10.1007/BF01767850>
- Comité, & CIC, I. C. de los P. de la C. del P.-. (2016). Hidroclimatología de la cueca del Plata. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007a). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007b). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- DGEEC. (2017). Anuario Estadístico del Paraguay 2015, 310.
- Dirección General de Estadística, E. y C.-D. (2015). Paraguay Proyección de la población por sexo y edad, según distrito, 2000-2025, 583.
- ESSAP. (2012). Actualización del Plan Maestro de Alcantarillado Sanitario y Tratamiento de Aguas Residuales de Asunción y Área Metropolitana (APM).
- geAM - GESTIÓN AMBIENTAL, & MOPC. (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de Asunción, 110. Retrieved from http://www.geam.org.py/v3/uploads/2015/10/Informe_Final_PEMA_Socio_Demografico-parte-1.pdf
- IADB. (2014). Plan de Acción Asunción, Paraguay.
- INCLAM-HQA. (2017). ESTUDIO DE RECURSOS HÍDRICOS Y VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DEL ACUÍFERO PATIÑO (Diagnóstico) PR-T1207.
- Javandel, I., C. D. and C. F. T. (1984). *Groundwater Transport Handbook of Mathematical Models. Water Resources Monograph Series*.
- JICA. (2009). Estudio Básico para el sector de Agua Potable y Saneamiento ESSAP.
- Kresic, N. (2007). Hydrogeology and Groundwater Modeling. *Taylor & Francis Group*, 2(11), 1–791. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, J. L. H. (1982). *Hydrology for engineers*. (McGraw-Hill, Ed.) (3rd ed.). New York.
- Mate, G. W. (2002). Groundwater Management : Gestión Sustentable del Agua and Tools de la Práctica Paraguay : El Uso de Agua Subterránea en Gran Asunción – Problemas Actuales y Regulación Propuesta, 1–6.
- McDonald, M. ., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite difference

- ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6*, 588. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90079-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90079-X)
- MOPC. (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de Asunción. Retrieved from http://www.geam.org.py/v3/uploads/2015/10/Informe_Final_PEMA_Socio_Demografico-parte-1.pdf
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Rutledge, A. T. (1998). Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records-Update. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, (98–4148), 52. [https://doi.org/Water-Resources Investigations Report 98-4148](https://doi.org/Water-Resources%20Investigations%20Report%2098-4148)
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate technique for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- Strandberg, G., Bärning, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., ... Wang, A. U. and S. (2014). CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. *Report Meteorology and Climatology*, 116(116), 84. [https://doi.org/ISSN: 0347-2116](https://doi.org/ISSN:0347-2116)
- Zhou, P., Huang, J., Pontius, R. G., & Hong, H. (2016). New insight into the correlations between land use and water quality in a coastal watershed of China: Does point source pollution weaken it? *Science of the Total Environment*, 543, 591–600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>