Proyecto 14 INV-190 **PRODUCTO 1**

INFORME: Modelamiento del Acuífero Patiño con PMWIN – Calibración del modelo en estado estacionario y en estado transitorio

Verónica Rojas Scheffer, M.Sc.

Contenido

1. Introducción 1
2. Método 2
2.1 Parámetros de entrada 2
2.2 Simulación en estado estacionario 2
2.1.1 Extracción de agua subterránea 3
2.1.2 Recarga 4
2.1.3 Calibración en estado estacionario 4
2.1.4 Simulaciones realizadas 4
2.3 Simulación en estado transitorio 7
2.3.1 Calibración en estado transitorio 7
2.3.2 Validación 8
Referencias 10

1. Introducción

El objetivo general del desarrollo de un modelo numérico de flujo de agua subterránea para el Acuífero Patiño es comprender mejor la dinámica del sistema de aguas subterráneas del acuífero Patiño. Los objetivos específicos considerados en esta etapa fueron: representar las condiciones de equilibrio del sistema por medio de un modelo en estado estacionario; y simular las condiciones actuales del sistema, a través de un modelo en estado transitorio.

En este informe, se describen primeramente los parámetros de entrada independientes del tiempo, considerados para ambos modelos (en estado estacionario y en estado transitorio). Dichos parámetros son los requeridos por el software PMWIN (*Processing Modflow for Windows*), que fue utilizado para el desarrollo del modelo y la realización de las simulaciones. A continuación, se presenta el proceso de calibración realizado para el modelo en estado estacionario, y los resultados obtenidos para las tasas de recarga luego de efectuar la calibración en dicho estado. Finalmente, se describe el proceso de calibración del modelo en estado transitorio, y se presentan los resultados luego de realizada la calibración.

El método utilizado para calibración, en ambos casos, fue la calibración automática por medio del paquete PEST (Parameter ESTimation) incluido en PMWIN.

2. Método

2.1 Parámetros de entrada

Se describen a continuación los parámetros de entrada para el modelo que fueron utilizados tanto en las simulaciones en estado estacionario, como en estado transitorio.

La superficie del acuífero Patiño es de 1 173 km^2 (Monte Domecq y Báez 2007), y la dimensión del área simulada es de 54 054 m por 60 001 m. El tamaño de la malla utilizada para este modelo fue de 174.931 m de lado, obteniéndose un total de 309 columnas y 343 filas, y un total de 105 987 celdas para todo el dominio, siendo 38 669 de ellas celdas consideradas activas. La selección del tamaño de las celdas se realizó con base en la limitación de PMWIN de número máximo posible de celdas, que es de 250 000.

El acuífero se representó como un acuífero no confinado de una sola capa. La topografía del terreno fue obtenida escalando un modelo digital de elevación (DEM), utilizado en investigaciones previas (Báez, Villalba y Nogués 2014). Este DEM tenía una malla original de 87.431 m de lado, y fue escalado al tamaño de malla requerido a través del software ILWIS. El límite superior de la única capa del acuífero se definió igual a la topografía del terreno, mientras que el límite inferior de la capa se consideró con las mismas características de esta topografía, a una distancia mínima de 300 m (Báez, Villalba y Nogués 2014, Labaky 2007) por debajo de la misma.

Las condiciones de borde aplicadas para el modelo fueron: al norte y al oeste, al río Paraguay se le asignó la condición de carga hidráulica constante; al este, la condición seleccionada fue de *no flow boundary* (borde sin flujo), representando el límite entre el área del acuífero Patiño y la cuenca del Lago Ypacarai; al oeste, también se consideró *no flow boundary* como la condición de borde para el límite entre el área del acuífero y la cuenca del Lago Ypoa. Las condiciones de borde consideradas son similares a las asumidas para el modelo numérico del acuífero Patiño desarrollado en un trabajo anterior (Labaky 2007). Para los ríos y arroyos interiores al dominio del modelo, se aplicó la condición de carga hidráulica constante, tomando los valores de carga hidráulica con base en el mapa DEM escalado.

Los valores de conductividad hidráulica para el dominio del modelo fueron obtenidos de mapas generados en investigaciones previas (Báez, Villalba y Nogués 2014), encontrándose valores de este parámetro entre 0.1 m/d y 3.2 m/d para el área del acuífero.

El campo de porosidad fue generado por medio de una correlación que relaciona la permeabilidad y la porosidad (Holtz, 2002). La permeabilidad fue calculada con base en la conductividad hidráulica.

2.2 Simulación en estado estacionario

El objetivo de la simulación en estado estacionario es comprender el comportamiento del acuífero en la situación de equilibrio, además de servir como punto de partida para las simulaciones en estado transitorio (Anderson, Woessner y Hunt 2015). Es decir, cuando realizamos una simulación en estado estacionario, estamos considerando un sistema estable, en el que las entradas y salidas del sistema se equilibran sin necesidad de utilizar el agua contenida como almacenamiento en el acuífero. Por ello, la simulación en estado estacionario puede utilizarse para asumir condiciones iniciales para las simulaciones en estado transitorio. En este estudio, se utilizaron las cargas hidráulicas obtenidas por medio de la simulación en estado estacionario, como cargas hidráulicas iniciales para la simulación

en estado transitorio (Anderson, Woessner y Hunt 2015); además las tasas de recarga calibradas en estado estacionario, fueron aplicadas en las simulaciones en estado transitorio.

Se asume que el aprovechamiento del acuífero Patiño para provisión de agua potable a la población se inició alrededor de 1980 (Jerozolimski y Gaal 2007), pero no se cuenta con datos de nivel estático de años cercanos a 1980. Los niveles estáticos conocidos por medio de pozos de observación corresponden a los años 2007 (Wehrle y López 2007), 2010, 2011, y 2013 a 2015 ((PMSAS y SEAM 2016)). En la Tabla 1 se muestran las cantidades de pozos piezométricos con datos de nivel estático, para distintos años de medición.

Tabla 1. Pozos de observación con datos de nivel estático en el área del Acuífero Patiño

Año	***Cantidad de pozos***	***Fuente***
2007	37	Wehrle et al., 2007
2010	41	PMSAS-SEAM, 2016
2011	17	PMSAS-SEAM, 2016
2013	48	PMSAS-SEAM, 2016
2014	61	PMSAS-SEAM, 2016
2015	55	PMSAS-SEAM, 2016

2.1.1 Extracción de agua subterránea

Los datos de pozos de extracción (que fueron obtenidos de distintas fuentes y luego incluidos en una base de datos consolidada) indican que hay registro de pozos de extracción (para uso doméstico, industrial y de distribución pública de agua) dese 1938 hasta 2007. El caudal medio de los pozos de extracción en el área del acuífero es de 18.17 m^3/h, y la moda para los datos de caudal existentes es de 12.00 m^3/h. Es importante mencionar que no se cuenta con datos de caudal de bombeo y año de registro para todos los pozos de la base de datos consolidada. En la Tabla 2 se presenta el tipo y cantidad de datos para cada pozo de extracción, a partir de la base de datos.

Tabla 2. Cantidad de datos en pozos de extracción en el área del acuífero Patiño

	Ubicación	*Año de registro*	*Caudal de extracción*
Con dato	3550	1107	831
Sin dato	0	2443	2719
TOTAL	3550	3550	3550

Fuente: elaboración propia con base en datos de ERSSAN y Consorcio CKC para SENASA-BID

Se estima que el aprovechamiento del acuífero Patiño se intensificó a partir del año 1980, posiblemente relacionado a programas de exploración de aguas subterráneas y mayores facilidades para la perforación de pozos, según se menciona en investigaciones anteriores (Jerozolimski y Gaal 2007). La misma fuente menciona que las aguaterías privadas (que proveen de agua para consumo doméstico, principalmente) surgieron en el primer quinquenio de los años 80, debido a la escasa cobertura de la empresa estatal encargada de la distribución de agua potable (entonces CORPOSANA, actualmente ESSAP) y del SENASA (Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental).

Para las simulaciones en estado estacionario, se consideró que la extracción en el acuífero se realizaba por medio de 513 pozos, cuyos datos de ubicación y tasa de extracción eran conocidos. Estos pozos fueron tomados de la base de datos de ERSSAN, y fueron consideraron como pozos activos para el año 1985. Se asumió que, en dicho año, el sistema aún puede considerarse estable para dichas condiciones de extracción.

2.1.2 Recarga

La recarga calculada se consideró la misma que en la investigación de Báez, Villalba y Nogués (2014). Se tuvo en cuenta una recarga natural o por precipitaciones, que fue estimada con base en el promedio de precipitaciones en el área del estudio en el período 1970 a 2009, considerando un 9% de infiltración. Además, se incluyó una recarga artificial estimad con base en el uso de la tierra y datos del excedente entre distribución y facturación de agua potable de la ESSAP en el año 2011 (Báez, Villalba y Nogués 2014).

2.1.3 Calibración en estado estacionario

La calibración en estado estacionario tuvo como objetivo minimizar la diferencia entre las cargas hidráulicas simuladas y observadas. Se realizó calibración automática por medio de PEST, y la variable a calibrar fue la tasa de recarga por zonas, en algunos casos, o bien la conductancia del lecho de ríos internos, según la forma en que fueron representados los ríos y arroyos internos al dominio del modelo (condición de carga hidráulica constante, en el primer caso; por medio del paquete RIVER del MODFLOW, en el segundo). Estas variables-objetivo de la calibración fueron seleccionadas teniendo en cuenta que pueden ser consideradas entre los parámetros principales que controlan los niveles estáticos y los gradientes en sistemas de flujo estacionario (Van Camp, y otros 2013).

Las cargas hidráulicas en pozos de observación, que sirvieron como referencia para la calibración de las distintas simulaciones, correspondieron a uno de los dos conjuntos de datos de nivel estático siguientes: el primer conjunto incluyó los valores observados en 34 pozos piezométricos en el 2007 (Wehrle y López 2007); el segundo conjunto estaba constituido a partir de profundidades del nivel freática medidas en el año 2013 (34 piezómetros) (PMSAS y SEAM 2016).

2.1.4 Simulaciones realizadas

Con el objetivo de encontrar un estado de equilibrio que pudiera ser considerado como estado inicial para las simulaciones en estado transitorio, se realizaron 5 simulaciones en estado estacionario, variando la variable a calibrar y el año de referencia para los datos de nivel estático, que fueron, en todos los casos, la referencia para la calibración. En la Tabla 3 se muestra una comparación entre las simulaciones en estado estacionario realizadas.

Tabla 3. Comparación entre distintas simulaciones realizadas, en estado estacionario.

Parámetro	*SS-A*	*SS-B*	*SS-C*	*SS-D*	*SS-E*
Representación de ríos y arroyos internos	Carga hidráulica constante	Carga hidráulica constante	Paquete RIVER	Paquete RIVER	Carga hidráulica constante
Variable a calibrar	Recarga	Conductividad hidráulica	Conductancia de lecho de ríos	Conductancia de lecho de ríos	Recarga
Referencia para calibración	NE 2007	NE 2007	NE 2007	NE 2007	NE 2013
Discrepancia, post-calibración	0.01%	0.00%	2.07%	2.22%	0.01%
Coeficiente de correlación, post-calibración	0.8558	0.8895	0.8507	0.8558	0.9321

Entre las 5 simulaciones presentadas, dos de ellas (SS-C y SS-D) fueron realizadas utilizando el paquete RIVER de MODFLOW para representar los ríos y arroyos interiores al dominio del acuífero. Se introducen así dos estimaciones adicionales: la cota de fondo de los ríos y arroyos (que se consideró 0.5 m por debajo de la topografía), y la conductancia del lecho de los ríos y arroyos (que fue considerada igual a un valor medio de 50 m^2/s con base en valores estimados en investigaciones previas (Labaky 2007). Luego de realizar la calibración, la discrepancia calculada por PMWIN para las simulaciones que utilizaron el paquete RIVER fue mayor a la discrepancia obtenida para las demás simulaciones, en las que se consideró a los ríos y arroyos interiores como celdas de carga hidráulica constante.

Se comparó la discrepancia calculada por PMWIN entre los elementos de entrada y salida del balance hídrico, para cada una de estas simulaciones, y también el coeficiente de correlación entre las cargas hidráulicas simuladas y observadas para los pozos de observación. La simulación SS-E dio como resultado una discrepancia del 0.01% y un coeficiente de correlación de 0.9321 luego de la calibración de la recarga, tomando como referencia el conjunto de datos de nivel estático en pozos de observación correspondientes a 2013. Las cargas hidráulicas resultantes de la simulación SS-E fueron asumidas como condición de inicio para las simulaciones en estado transitorio.

Se tomó la decisión de calibrar un solo parámetro para cada simulación, teniendo en cuenta que no se recomienda calibrar simultáneamente la recarga y parámetros hidrogeológicos (Van Camp, y otros 2013, Sonnenborg, y otros 2003, Chiang 2001).

En la Figura 1 se presenta el mapa indicando las zonas de recarga consideradas. En la Tabla 4 se resumen los valores de recarga para las distintas zonas consideradas, antes y después de la calibración para la simulación SS-E.

Tabla 4. Valores de recarga para las distintas zonas consideradas para el área de acuífero Patiño, antes y después de la calibración del modelo en estado estacionario

Calibración de recarga en estado estacionario

Zona	Recarga calculada	Recarga calibrada	Variación
	mm/año	mm/año	% rec. calc.
R1	121.08	133.19	10%
R2	125.09	137.59	10%
R3	130.09	143.10	10%
R4	187.90	206.69	10%
R5	191.90	197.45	3%
R6	196.90	216.59	10%
Coef. corr. carga hidráulica observada vs. simulada, año 2013 (PEST, post-calibración)			0.9321

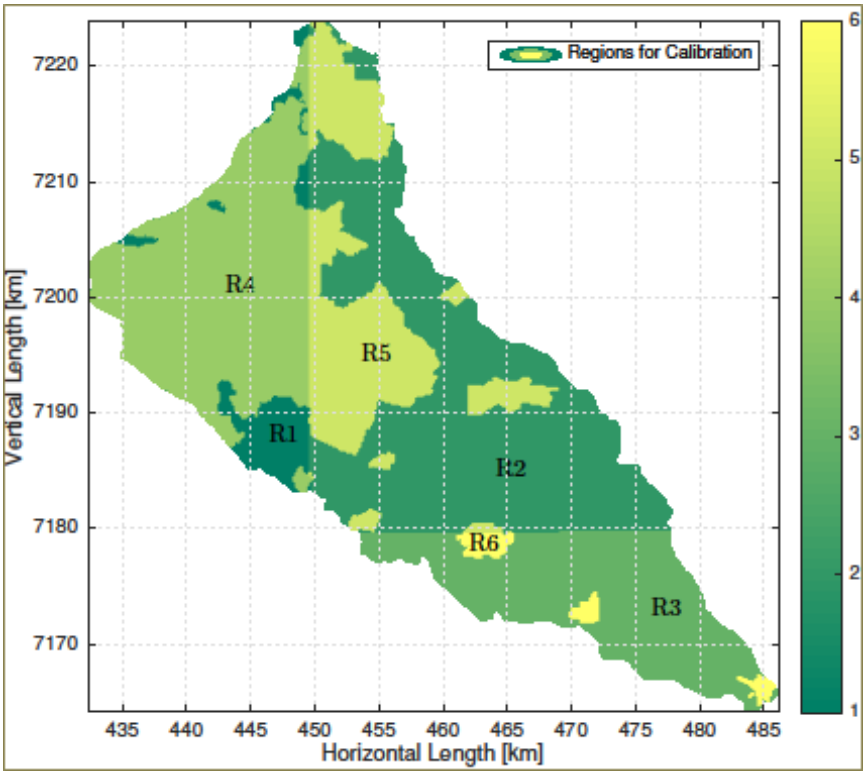

Figura 1. Mapa de recarga calibrada en estado estacionario

2.3 Simulación en estado transitorio

Las simulaciones en estado transitorio presentadas en este informe corresponden a una primera etapa, y fueron realizadas con los siguientes objetivos: validación, (tomando como referencia los datos de nivel estático en los pozos de observación para el año 2007) para comprender la evolución que pudo haber tenido el sistema, partiendo de la situación considerada como estado de equilibrio del sistema (año 1985) hasta las condiciones de aprovechamiento actuales (año 2016); y calibración, realizando simulaciones para calibrar el parámetro de productividad específica (Specific yield), utilizando como referencias de calibración los datos de nivel estático en pozos de observación de 2010 a 2015 (PMSAS y SEAM 2016).

En las simulaciones en estado transitorio se consideraron las cargas hidráulicas obtenidas en la simulación SS-E en estado estacionario como cargas hidráulicas iniciales, asumiendo dichas condiciones para el año 1985. Para la simulación en estado transitorio de un acuífero no confinado PMWIN requiere, además, la introducción del parámetro productividad específica (Specific yield). Este parámetro se consideró con valor uniforme en todo el dominio, seleccionado con base en el tipo de suelo del acuífero (Monte Domecq y Báez 2007, Labaky 2007) y en datos teóricos (Anderson, Woessner y Hunt 2015), y fue ajustado por medio de calibración automática con el paquete PEST incluido en PMWIN.

2.3.1 Calibración en estado transitorio

Se realizaron distintas simulaciones en estado transitorio, variando las condiciones de extracción en relación a la cantidad horas de bombeo por día, y en relación al valor asignado de tasa de extracción asignado a los pozos sin datos de caudal de extracción.

Se realizaron simulaciones considerando 12, 20 y 24 h de bombeo por día, y considerando el valor medio de las tasas de extracción conocidas (Qmedio) para los pozos sin este dato, o bien, la moda de las tasas de extracción conocidas (Qmoda) como tasa de extracción para los pozos sin dato. Se consideraron como pozos activos los 3550 pozos distribuidos en el dominio del acuífero, según la base de datos consolidada (que incluye datos recopilados hasta el año 2007). Además, en todos los casos, el caudal de extracción total se inició en un valor similar al caudal de extracción total del estado estacionario (asumido para 1985), y fue aumentándose linealmente, en todos los pozos, hasta alcanzar el valor correspondiente al año 2007. A partir del 2007, las simulaciones mantuvieron constante dicha tasa de extracción, o bien se siguió aumentando la tasa de extracción uniformemente hasta el año 2016.

Para las dos últimas simulaciones presentadas en este informe (ver Tabla 4), se asigna un valor de caudal igual a la moda de los datos existentes (Qmoda = 12 m3/d), con base en datos del Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ERSSAN) (Ing. Henry, comunicación personal, febrero 2017).

La recarga se asumió como constante, e igual a las tasas de recarga por zonas calibradas en el estado estacionario, en las simulaciones efectuadas con fines de calibración y validación. Los parámetros independientes del tiempo se mantuvieron sin variación respecto a las simulaciones en estado estacionario.

La calibración en estado transitorio se realizó, al igual que para el estado estacionario, a través del paquete de calibración automática PEST. El parámetro calibrado en las simulaciones en estado transitorio fue la productividad específica (*specific yield*) del acuífero y los datos de referencia para realizar la calibración fueron los niveles estáticos medidos en pozos de observación, del 2010 a 2015 (PMSAS y SEAM 2016).

2.3.2 Validación

Los datos de nivel estático correspondientes al año 2007 (Wehrle y López 2007) fueron tomados como referencia para determinar la validez de las condiciones de recarga y bombeo asignadas para las distintas simulaciones en estado transitorio.

Para cada simulación, se compararon los niveles estáticos simulados con los datos de nivel estático observados en pozos de observación para el año 2007. En las simulaciones en estado transitorio se asumió 1985 como año de inicio, y las condiciones de la simulación del estado estacionario SS-E (recarga, tasa de extracción por bombeo y cargas hidráulicas iniciales) como punto de partida (Ver Tabla 3). En la Tabla 4 se resumen las condiciones asignadas para las simulaciones realizadas en estado transitorio, así como los resultados obtenidos post-calibración.

Si bien el coeficiente de correlación para los datos del año 2007 es levemente mayor para la simulación TR-2 con relación a la simulación TR-4, esta última respeta las estimaciones de caudal y horas de bombeo por día que predominan en el área de estudio según comunicación de la ERSSAN.

Tabla 4. Comparación entre simulaciones realizadas en estado transitorio, variando la cantidad de horas de bombeo por día, y el valor de tasa de extracción asignado a los pozos sin dato

Parámetro	*TR-1*	*TR-2*	*TR-3*	*TR-4*
Referencia de calibración	NE 2010 a 2015	NE 2010 a 2015	NE 2010 a 2015	NE 2010 a 2015
Variable a calibrar	Productividad específica	Productividad específica	Productividad específica	Productividad específica
Cantidad de horas de bombeo/ día	24	12	24	20
Tasa de extracción asignada a pozos sin dato	Qmedio	Qmedio	Qmoda	Qmoda
Variación de tasa de extracción entre 1985 y 2016	Aumenta linealmente hasta 2007, luego cte.	Aumenta linealmente hasta 2007, luego cte.	Aumenta linealmente hasta 2016	Aumenta linealmente hasta 2016
Referencia para validación	NE 2007	NE 2007	NE 2007	NE 2007
Coeficiente de correlación, pre-calibración	0.700	0.807	0.773	0.795
Coeficiente de correlación, post-calibración	--	0.811	0.779	0.800

Referencias

Anderson, M.P., W. W. Woessner, and R.J. Hunt. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.* Academic press, 2015.

Báez, L., C. Villalba, and J. Nogués. "Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción." Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. Proyecto INV 20, CONACYT, 2014.

Chiang, W.H. *3D-groundwater modeling with PMWIN.* Vol. 346. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001.

Jerozolimski, T., and R. Gaal. "Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterránes en el área metropolitana de Asunción (Acuífero Patiño). Informe técnico 2.13. Plan de Gestión del Acuífero Patiño." JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamiento s/c Ltda. Cooperación Técnica ATN/JC - 8228 - SENASA - BID, 2007.

Labaky, W. "Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el área metropolitana de Asunción (Acuífero Patiño). Informe técnico 2.12. Simulación matemática." Waterloo Hydrogeologic, Inc. Schlumberger Company. Cooperación técnica ATN/JC - 8228 - PR - SENASA- BID, 2007.

Monte Domecq, R., and J. Báez. "Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el área metropolitana de Asunción (Acuífero Patiño). Informe técnico 2.11. Balance hídrico del Acuífero Patiño." Hidrocontrol S.A. Cooperación Técnica ATN/JC- 8228 - PR - SENASA -BID, 2007.

PMSAS, and SEAM. "Acuífero Patiño. Estudio de las variaciones de nivel estático y calidad. Presentación realizada por Geól. Daniel García en FACEN-UNA." 2016.

Sonnenborg, T.O., B. S. Christensen, P. Nyegaard, H.J. Henriksen, and J.C. Refsgaard. "ransient modeling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration." *Journal of Hydrology*, 2003: 188-204.

Van Camp, M., I.C. Mjemah, N. Al Farrah, and K. Walraevens. "Modeling approaches and strategies for data-scarce aquifers: example of the Dar es Salaam aquifer in Tanzania." *Hydrogeology Journal* 21, no. 2 (2013): 341-356.

Wehrle, A., and D. López. "Estudio de políticas y manejo ambiental de aguas subterráneas en el área metropolitana de Asunción (Acuífero Patiño). Informe técnico 2.6. Perforación de pozos piezométricos." Hidrocontrol S.A. Cooperación Técnica ATN/JC - 8228 - PR - SENASA - BID, 2007.