



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE LA UTILIZACIÓN SUSTENTABLE DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ, ARICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IVO BALIĆ GARRIDO

*PROFESOR GUÍA:
PAULO HERRERA RICCI*

*MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RENE GARREAUD SALAZAR
JULIO VALLEJOS ALFARO
JULIO CORNEJO MORALES*

*SANTIAGO DE CHILE
2015*

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Ivo Balić Garrido
FECHA: 2015
PROFESOR GUÍA: Paulo Herrera Ricci

Modelación numérica de los efectos de la variabilidad climática sobre la utilización sustentable del acuífero de la cuenca del río San José, Arica

El Valle de Azapa concentra la producción agrícola de la Región de Arica y Parinacota. La capacidad de almacenamiento del acuífero de la zona permite sustentar la demanda hídrica entre las temporadas de lluvias que se concentran en los meses de verano y durante periodos de sequía que pueden extenderse por décadas. Es por esto que el acuífero juega un rol de embalse natural de regulación del sistema. Debido al incremento de la demanda hídrica, se estima que el sistema se encuentra cercano a la sobreexplotación en el largo plazo.

El principal objetivo de este estudio, es entender como cambios en las precipitaciones, producto del cambio climático, pueden afectar la recarga del acuífero y como distintos escenarios de extracción influyen en el comportamiento del acuífero, para de esta forma determinar la sustentabilidad del sistema en el mediano y largo plazo.

La metodología empleada consistió en utilizar el modelo hidrogeológico utilizado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, proyectando las recargas futuras en función de una correlación de estas con las precipitaciones históricas, bajo escenarios climáticos de reducción de las precipitaciones hasta en un 40% a lo largo de un periodo de 100 años. A esto se suman proyecciones de incremento y reducción de las extracciones en un 10% para analizar la sensibilidad a estos. Los efectos de estos escenarios resultan en una disminución en los caudales de vertientes y afloramientos en el sector bajo, junto con una reducción en el almacenamiento del acuífero, siendo este último cercano a un 23% en el escenario más crítico (40% menos de precipitaciones y 10% más de extracciones), con un efecto focalizado en el sector bajo del acuífero, reduciendo la capacidad real de extracciones.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	2
Capítulo 2. METODOLOGÍA.....	3
2.1. Caracterización de la zona de estudio	3
2.2. Metodología empleada	5
2.3. Descripción del modelo	11
Capítulo 3. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS SIMULADOS.....	15
3.1. Escenarios climáticos.....	15
3.1.1. Generación de series de precipitación	15
3.1.2. Correlación entre precipitaciones y recarga	17
3.1.3. Asignación de la recarga	18
3.2. Escenarios de demanda	20
3.3. Resumen de escenarios simulados	20
Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	21
4.1. Validación con niveles de pozos observados	21
4.2. Análisis de extracciones	24
4.3. Análisis de drenes y vertientes	25
4.4. Análisis de flujo de salida	28
4.5. Análisis del almacenamiento del relleno sedimentario.....	30
4.6. Comparación del efecto del cambio de la demanda y la disminución de las precipitaciones.	32
4.7. Sustentabilidad del acuífero	35
Capítulo 5. CONCLUSIONES.....	40
5.1. Dinámica del Sistema Acuífero	40
5.2. Debilidades del modelo	42

5.3. Recomendaciones	43
BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS.....	47
Anexo A. Caudales de extracciones	47
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda	47
2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones.....	48
Anexo B. Caudales de vertientes	49
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda	50
2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones.....	51
Anexo C. Caudales de salida del modelo	52
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda	52
2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones.....	53
Anexo D. Caudales de drenes del modelo	54
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda	55
2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones.....	56
Anexo E. Gráficos comparativos entre niveles de pozos y precipitaciones ..	57
Anexo F. Gráficos de escenarios sin extracciones	60
1. Gráficos de vertientes, drenes y salida del acuífero	60
2. Gráficos comparativos para vertientes	61
3. Gráficos comparativos para drenes	62
4. Gráficos comparativos para salida del acuífero.....	63
Anexo G. Gráficos de escenario sin extracciones.....	65
1. Escenario climático similar al actual.	65

2. Escenario climático con precipitaciones promedio reducidas en un 20%.....	67
3. Escenario climático con precipitaciones promedio reducidas en un 40%.....	70
Anexo H. Tablas de resumen de series modeladas	73

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivación

Debido a una demanda excesiva de derechos de agua, los niveles de las aguas subterráneas y vertientes parecen estar en constante descenso, niveles que se recuperan solo tras crecidas del río San José (Jiménez, 2013). Es por esto que es indispensable entender la dinámica entre los distintos factores que influyen en este proceso para poder realizar un manejo adecuado de este recurso. Cuantificar la evolución futura de la recarga en el tiempo no solo requiere una predicción confiable de los cambios en las variables climáticas, también requiere modelar el efecto de estos cambios en el proceso de recarga (Jyrkama, 2007), como resultado se espera determinar la sensibilidad del acuífero frente a una disminución de la recarga por causa del cambio climático.

El agua extraída artificialmente de un acuífero proviene de un descenso en el almacenamiento, una reducción en la descarga del acuífero, un aumento inducido en la recarga o una combinación de estos cambios. La disminución de la descarga más el aumento de la recarga se llama captura. La captura puede ocurrir en la forma de disminución de la descarga de aguas subterráneas a ríos, lagos y el océano, o descensos en la componente de la evapotranspiración proveniente de la zona saturada. Después de que una extracción artificial del acuífero ha comenzado, el nivel del acuífero comenzara a descender hasta que la nueva extracción sea equilibrada por la captura (Theis, 1940). De la descripción de Theis se puede entender que los sistemas de los acuíferos existen naturalmente en equilibrio, pues en la recarga de largo plazo es equilibrada por una descarga de largo plazo. Los principios para un uso perpetuo están bien establecidos según este concepto, sin embargo problemas de implementación se presentan en forma de incompatibilidad en horizontes de tiempo diferentes entre tomadores de decisiones (años o décadas) y la respuesta de los sistemas de aguas subterráneas bajo periodos de tiempo mucho más largos (en ocasiones cientos de años). En muchos casos la incompatibilidad entre los dos marcos temporales crea una explotación de los recursos que se traduce en la extracción de agua del acuífero de forma permanente (Bredehoeft, 2014).

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar y comprender los efectos de la variabilidad climática sobre los niveles piezométricos del acuífero de la cuenca del río San José, Arica. Para poder realizar esto se busca cumplir los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el efecto del cambio climático sobre la recarga de las aguas subterráneas del acuífero, para un horizonte temporal de largo plazo.
2. También es necesario realizar un análisis de sensibilidad sobre las variaciones de las extracciones para así dar pie a futuros estudios enfocados en el desarrollo de un plan de uso sustentable del acuífero.

Capítulo 2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización de la zona de estudio

El Valle de Azapa se ubica en la XV Región de Arica y Parinacota, en el sector aguas abajo del estero del río San José, el cual abastece directamente a la ciudad de Arica, como se puede apreciar en la Figura 1.



FIGURA 1: MAPA DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA (CHAMORRO, 2013).

La cuenca del río San José se extiende por más de 3000 km². Siendo una cuenca de régimen pluvial, esta tiene una fuerte recarga entre los meses de diciembre a marzo debido a las lluvias altiplánicas (Henriquez, 2013), pero durante el resto del año los regantes solo tienen a su disposición el trasvase del río Lauca y las aguas subterráneas. En la actualidad hay proyectados algunos embalses, como el Embalse Livilcar¹, este con un objetivo principal de mitigar los daños de las crecidas, pero con objetivos secundarios de posibilitar generación hidroeléctrica y apoyar a los servicios de agua potable rural, lo que eventualmente puede mejorar la seguridad de riego del sector. Sin embargo en este trabajo se propone analizar el problema de escasez hídrica desde el manejo sustentable del recurso.

¹ Proyectos del plan especial de desarrollo estratégico Arica y Parinacota-GORE (2014).

Tras observar continuos descensos en los niveles de los pozos en la zona baja del acuífero, como por ejemplo los descensos del pozo Las Riveras representado en la Figura 2 entre los años 1988 y 1996, a solicitud de la DGA, AC Ingenieros (1997) realizó una caracterización de mayor detalle de la zona de estudio, con lo cual se determinan características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca.

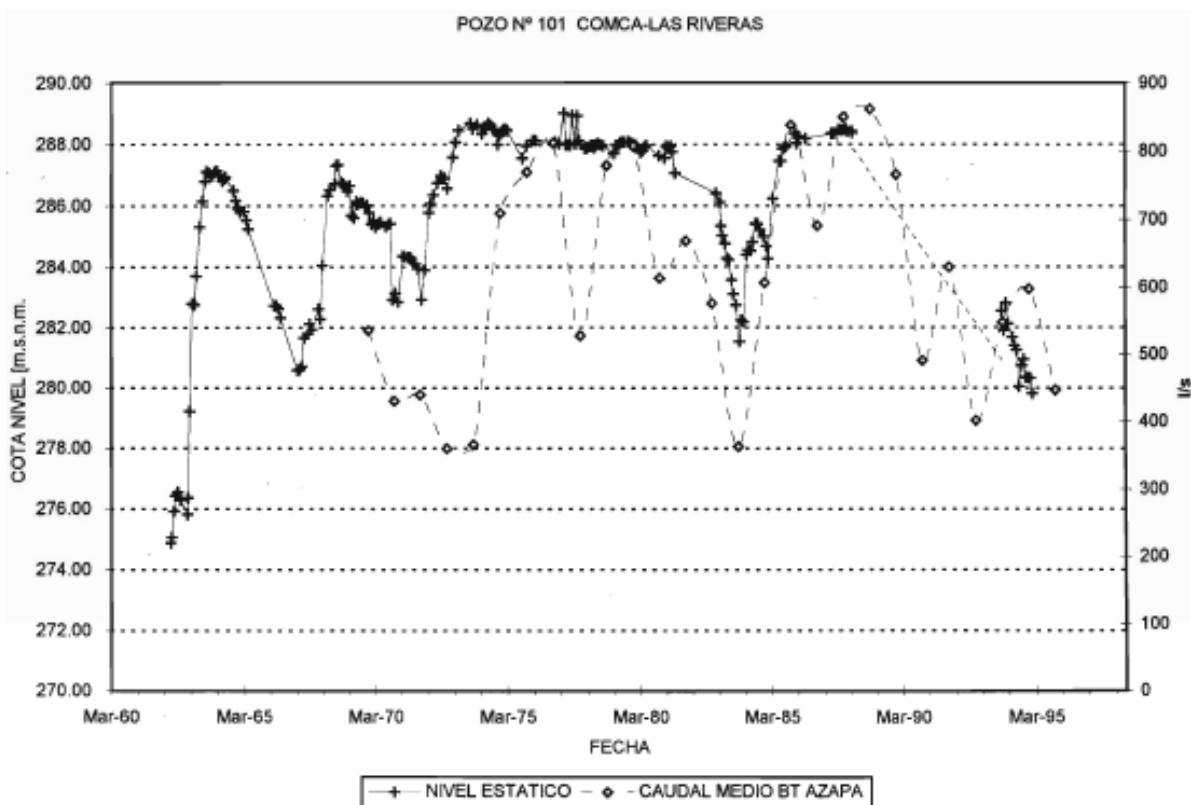


FIGURA 2: DESCENSO EN NIVELES DE POZOS (AC INGENIEROS, 1997).

AC Ingenieros (2010) realizaron un modelo del acuífero del Valle del río San José en Visual MODFLOW para precisar con mayor detalle el funcionamiento de este. Para efectos del modelo, la cuenca se dividió en dos sectores, cuenca alta y cuenca baja. La cuenca baja se modeló con un mayor nivel de precisión, por ser esta la zona de mayor importancia de acuerdo a la presencia de pozos para uso en riego y para agua potable.

Jiménez (2013) concluyó que no basta con implementar sistemas de infiltración artificial, el problema de sobreexplotación se debe solucionar gestionando los recursos de la cuenca adecuadamente.

2.2. Metodología empleada

Scanlon (2006) indica en su trabajo que los tomadores de decisiones deben estar atentos a como el cambio climático o la variabilidad climática podrían impactar las recargas de aguas subterráneas y como se puede cuantificar dichas recargas. Es por esto que es necesario evaluar la relación entre cambio climático y recargas.

Pérez (1990) trabajó en un modelo integrado entre escorrentía superficial y flujo subterráneo para la cuenca del río San José en el Valle de Azapa, estimando una demanda en función de los derechos de agua. También se realizó un estudio histórico de los usos de las aguas subterráneas. Si bien en este trabajo se presenta una línea base para trabajar con respecto al acuífero, este es en función de su recarga, factor que como se explicó anteriormente, es difícil de cuantificar y no trata con el problema de la sustentabilidad del recurso en el largo plazo.

Crosbie (2013) analizó distintos escenarios de cambio climático sobre la recarga en altiplanos, llegando a correlaciones positivas entre recargas y precipitaciones. Usando esto como referencia se procedió a realizar un análisis de correlación entre las recargas determinadas por el modelo de AC Ingenieros y las precipitaciones históricas, llegando a una correlación de 0,79 con la media móvil de 4 años, del promedio de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas Chapiquiña, Belén y Tignamar, estaciones meteorológicas seleccionadas debido a su continuidad de datos y buena representatividad de la zona alta de la cuenca, sector donde ocurren las lluvias principalmente (Henriquez, 2013). Sin embargo hay que tener presente que los resultados de Crosbie son en el hemisferio norte, entre las latitudes 30°N y 45°N, por lo que si bien sirven como guía, no se debe esperar que ambos modelos tengan resultados similares.

Esta correlación se validó ingresando al modelo las recargas calculadas a partir de la serie histórica de precipitaciones, y comparando los resultados obtenidos con la serie de recargas calculada previamente en el trabajo de AC Ingenieros (2010), bajo el supuesto de que las extracciones se mantienen sin variaciones en el periodo ubicado entre el año 2009 y el 2014, obteniéndose los resultados observados en la Figura 3.

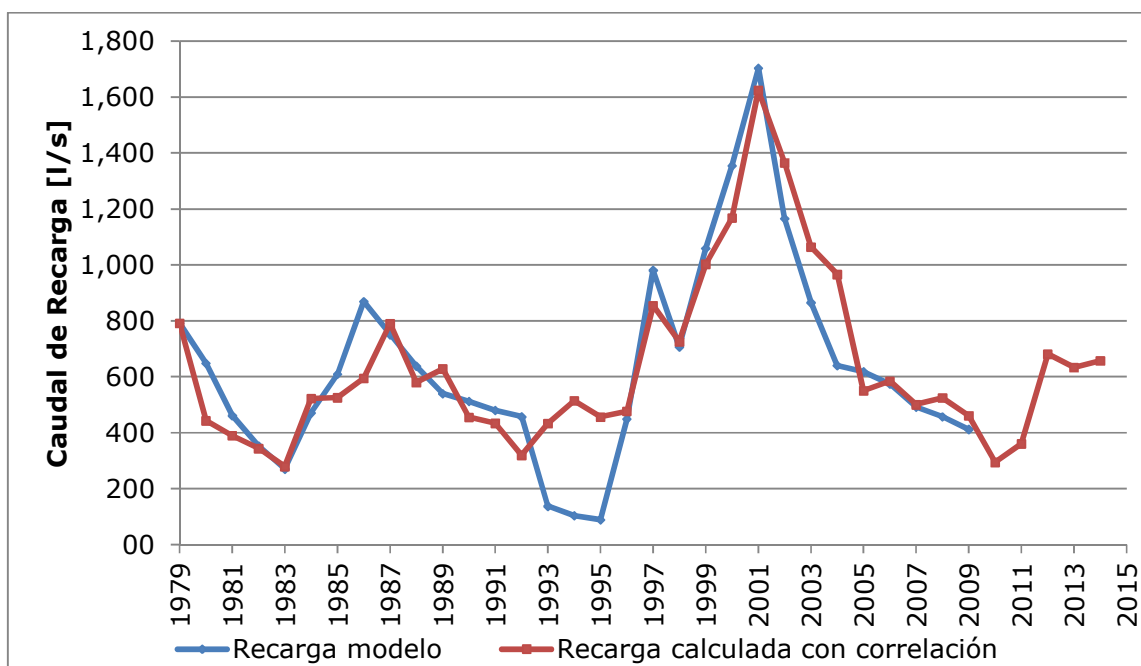


FIGURA 3: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE RECARGA DEL MODELO Y RECARGA CALCULADA UTILIZANDO CORRELACIÓN CON PRECIPITACIONES.

Tras comprobar que las recargas calculadas con el modelo y las recargas calculadas con la correlación presentan valores similares, se procedió a realizar la proyección de tres escenarios de precipitaciones (Escenario actual de precipitaciones, escenario con precipitaciones reducidas en un 20% y un 40% a lo largo de 100 años) para evaluar la respuesta a estos en tres proyecciones distintas de explotación del acuífero (Escenario actual de demanda, escenario de demanda aumentada en un 10% y disminuida en un 10%), esto con el fin de evaluar las distintas respuestas del sistema acuífero, y de esta forma formular recomendaciones para la gestión del recurso. Para estos criterios se utilizó como referencia el trabajo de El-Kadi (2014), en el cual se analizó la isla Jeju. El utiliza siete escenarios de bombeo diferentes para cuatro escenarios diferentes de recarga, concluyendo que si bien, el cambio climático produjo impactos sobre las vertientes de su trabajo, fueron los bombeos quienes influyeron de manera más importante, llegando a secar un 27% de estas. Este es un factor a considerar en el Valle de Azapa pues las vertientes pueden llegar a otorgar hasta 600 l/s en épocas de alta recarga.

También se utilizó como referencia el trabajo de Minvielle y Garreaud (2011) en el cual se estima que las precipitaciones en la zona altiplánica del norte de Chile se verán reducidas entre un 10% y un 30%. Se decidió utilizar un 20%

de reducción como valor promedio en este rango y un 40% como un valor extremo para mantener un rango de seguridad sobre las predicciones.

Dentro de las metodologías para generar las series de precipitaciones se enmarcan los modelos globales de clima o GCM, los cuales proyectan cambios significativos en las temperaturas y precipitaciones para el siglo XXI, a nivel regional y global, lo que probablemente tenga un efecto asociado en la recarga de aguas subterráneas. Un enfoque común en recientes estudios de impacto por efecto del cambio climático es emplear múltiples escenarios de cambio climático escalados regionalmente para alimentar un modelo hidrológico y proyectar una serie de posibles recargas. Sin embargo, cada paso en este proceso involucra más variabilidad en los resultados hidrológicos, lo que se traduce en incerteza en los futuros niveles de las aguas subterráneas (Kurylyk, 2013).

Finalmente, para poder generar estas series de precipitaciones se optó por utilizar un método de generación de números aleatorios por su simpleza y por la baja autocorrelación de los datos observados. Para esto se realizó un análisis estadístico de la precipitación promedio de las estaciones Tignamar, Chapiquiña y Belen las cuales se muestran en la Figura 4. Luego se eligió una distribución de probabilidades que mejor ajustara el histograma del promedio de las precipitaciones, siendo Weibull la distribución seleccionada, y utilizando una rutina de generación de valores aleatorios siguiendo una distribución, que MATLAB (versión 7.10.0.499) tiene entre sus herramientas, se generaron series de datos aleatorias que siguieran la distribución escogida, las cuales se archivaron en archivos de texto para su posterior uso.

Para los escenarios de reducción de precipitaciones se generó un vector con valores equivalentes a la media esperada reducida en un porcentaje igual al del escenario climático a estudiar ponderado por el cociente entre el periodo correspondiente y 99 años. De esta forma para el primer periodo la media esperada es equivalente a la media del escenario sin extracciones, mientras que del último período es equivalente a la media reducida en el porcentaje de reducción producto del cambio climático. Luego, se utilizaron series generadas con la rutina de valores aleatorios bajo una distribución Weibull a la cual se le restó la media esperada a cada elemento para posteriormente sumarle el vector de medias reducidas. Tras realizar este procedimiento se utilizó una condicional en la rutina para que dichos valores tomaran un valor mínimo de 0 [mm/año].

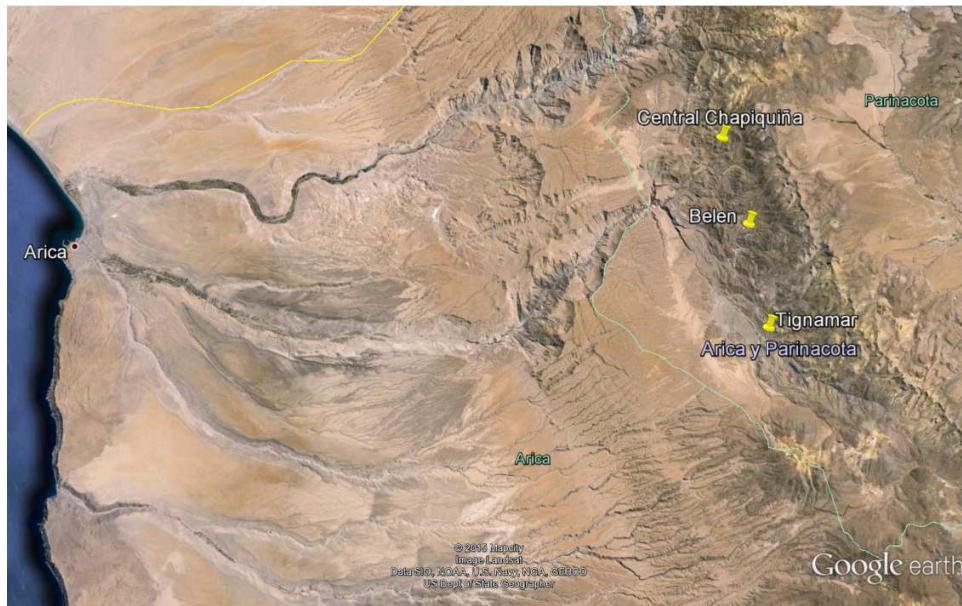


FIGURA 4: UBICACIÓN DE ESTACIONES TIGNAMAR, CHAPIQUIÑA Y BELÉN. IMAGEN OBTENIDA UTILIZANDO GOOGLE EARTH.

Para cada escenario de precipitaciones se generaron cinco series de 100 años, esto con el fin de determinar una respuesta promedio que permitiera observar la tendencia producto de los cambios producidos en el acuífero. Para una mayor significancia estadística en los resultados se deberían usar el máximo número de series por escenario que sea factible, pero debido a que este trabajo es limitado en el tiempo, se determinó que con cinco se puede obtener una primera tendencia bastante aproximada. El largo de estas se escogió considerando que lo que se quiere estudiar es el efecto del cambio climático, por lo tanto las series deben tener un tiempo de acción de al menos un siglo, esto porque en períodos más cortos uno solo logra observar los efectos de la desviación por efectos meteorológicos.

Posteriormente, dichas series se ingresan en la correlación antes mencionada para obtener las recargas correspondientes a cada serie de precipitaciones. Estas recargas se ingresaron al modelo utilizando una rutina en MATLAB.

Los escenarios de extracción se eligieron como una proyección de 3 magnitudes diferentes de demanda constante (665, 740 y 814 l/s) para analizar la sensibilidad del acuífero. Adicionalmente se analizó un escenario sin extracciones para utilizarlo como escenario base, tal como se observa en la Tabla 1. Estas series se ingresaron al modelo utilizando una rutina en Microsoft Excel.

TABLA 1: DETALLE DE ESCENARIOS SIMULADOS

Escenarios de demanda	Escenarios de cambio climático		
	Escenario actual	Reducción de Pp en un 20%	Reducción de Pp en un 40%
Demanda actual	5 series	5 series	5 series
Superior en un 10%	5 series	5 series	5 series
Inferior en un 10%	5 series	5 series	5 series
Sin extracciones	5 series	5 series	5 series

Bredehoeft (2002) planteó que si bien, es importante la recarga como factor de análisis hidrológico, no se necesita para determinar la sustentabilidad, más bien lo que se requiere es conocer las variaciones de la descarga o extracciones producto del bombeo de agua del acuífero, lo que hace que la idea de un plan de manejo de las aguas sea probablemente una mejor solución que la limitación del uso en función de la recarga que en principio es muy complicado de medir. Considerando esto se decidió analizar la sensibilidad del acuífero en función de sus salidas y su almacenamiento.

Para facilitar el entendimiento de la metodología empleada, se presenta un diagrama de flujo explicativo en la Figura 5.

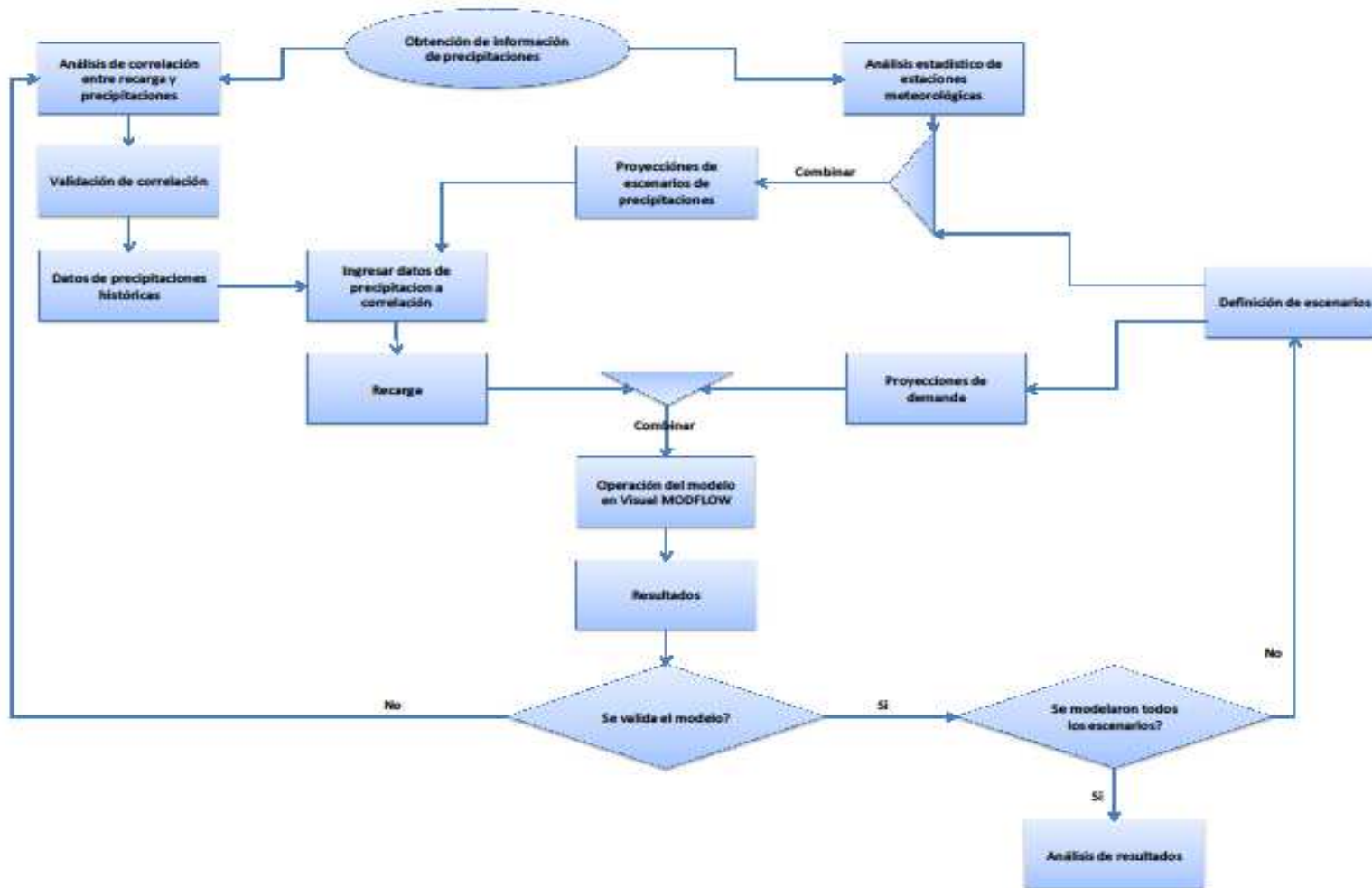


FIGURA 5: DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍA EMPLEADA.

2.3. Descripción del modelo

El modelo utilizado fue construido por AC Ingenieros Consultores (2010), a pedido de la Dirección General de Aguas. Esta sección permitirá familiarizarse con las características principales del modelo de detalle del Valle de Azapa.

El dominio de la zona del modelo de detalle se extiende entre las coordenadas U.T.M. 360 km-416 km este y 7.943 km-7.969 km norte como se observa en la Figura 6, con celdas de 50 metros de largo en dirección norte-sur y celdas que varían su largo entre 50 y 250 metros en dirección este-oeste. El área asociada a este dominio es de 751 km².

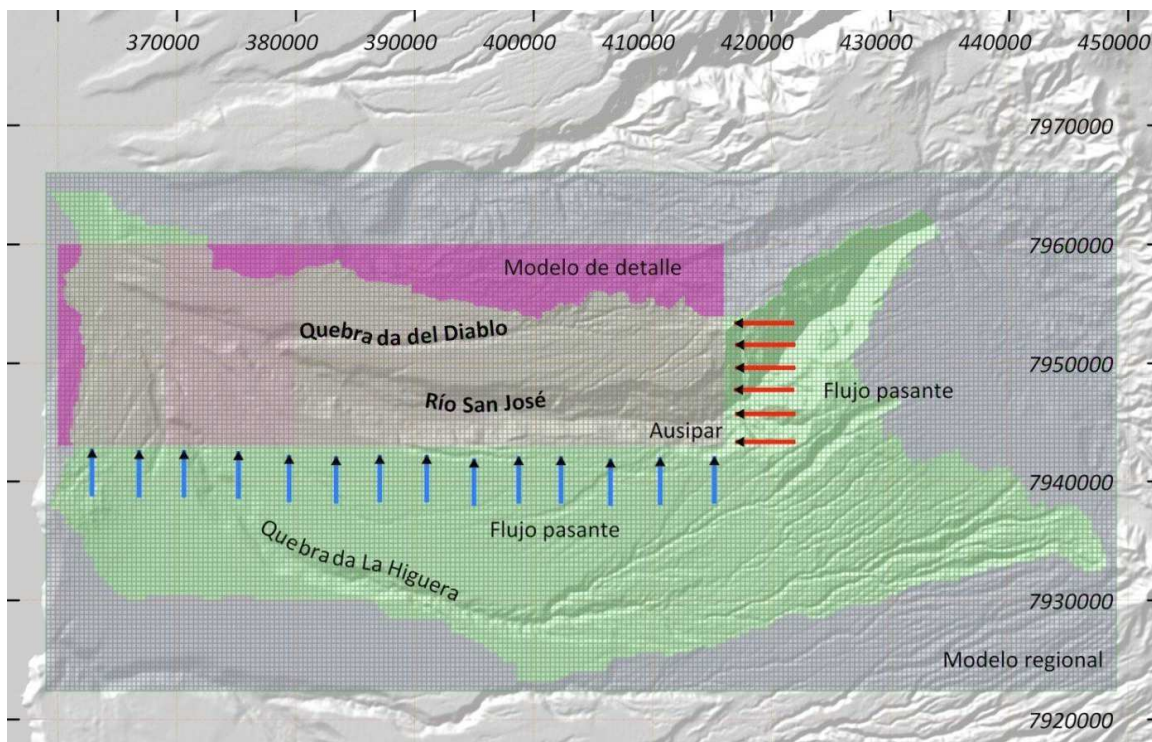


FIGURA 6: MODELO DE DETALLE (AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA, 2010)

Esquemáticamente el modelo se compone de tres entradas: recarga asociada a la escorrentía superficial y precipitaciones, flujo regional y recarga proveniente del riego; tres salidas: extracciones desde pozos y norias, afloramiento de vertientes y drenes y el flujo subterráneo hacia el norte; y una variable asociada a la variación del volumen almacenado como se puede observar en la Figura 7.

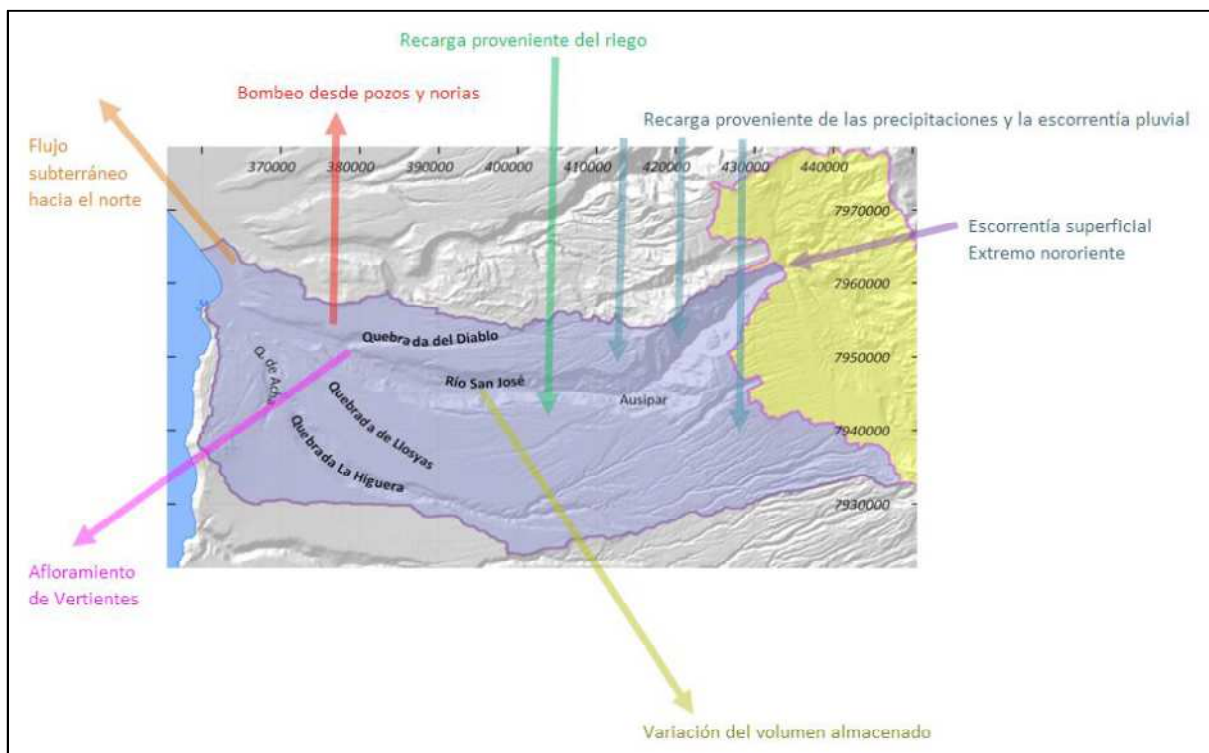


FIGURA 7: ESQUEMA DE FLUJOS DEL MODELO (AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA, 2010)

Sin embargo para efectos de este trabajo se consideró la recarga asociada a las precipitaciones y escorrentía superficial y la recarga proveniente del riego como una sola, ya que la correlación adoptada asume que al promediar las precipitaciones de 4 años seguidos se incorporan los distintos procesos asociados a la recarga tales como evapotranspiración, infiltración y reincorporación de los excedentes del riego.

Adicionalmente se trabajó bajo el supuesto de que las recargas asociadas al flujo regional son invariantes en el largo plazo, las cuales son representadas utilizando pozos de inyección de caudal constante situados en las celdas de los límites sur y este del modelo.

El flujo de salida del modelo está dado por una condición de borde de nivel constante calculada a partir de curvas de igual nivel piezométrico, medidas durante el catastro de captaciones realizado para el estudio de AC Ingenieros Consultores (2010). Esta condición de borde se asignó a las celdas del modelo que conectan con el acuífero del río Lluta, en el extremo nor-oeste del dominio. En las celdas que no tienen conexión con el borde norte del dominio, se asignó una condición de no flujo para representar la desconexión geográfica entre ambos acuíferos.

En la costa, extremo oeste del dominio, se asignó una condición de no flujo representando la estructura subterránea que separa las aguas del mar y las del acuífero.

Para representar las vertientes históricas detectadas en el área, se utilizó celdas tipo dren, cuya ubicación puede observarse en la Figura 8.

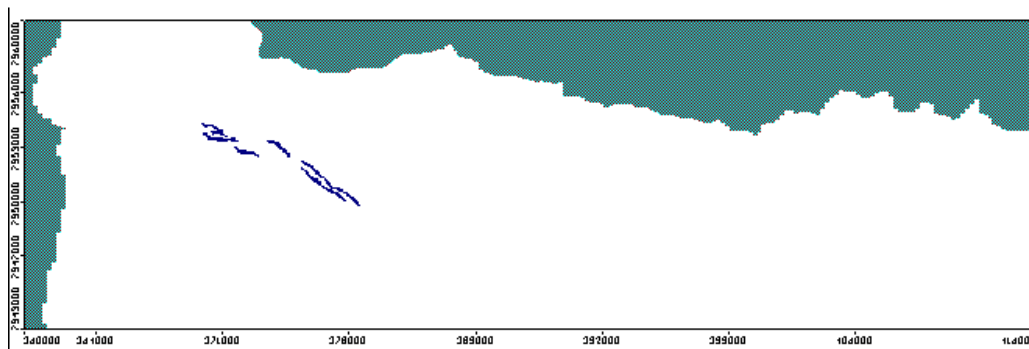


FIGURA 8: UBICACIÓN DE VERTIENTES LAS CUALES SON REPRESENTADAS POR ÁREAS DE COLOR AZUL.

Adicionalmente, AC-Ingenieros incorporó celdas tipo dren en el sector bajo del valle, representando afloramientos registrados en el sector.

De aquí en adelante, los drenes asociados al sector de vertientes serán identificados como las "vertientes", mientras que aquellos drenes que representan afloramientos fuera de las vertientes se identificarán como los "drenes".

Las permeabilidades iniciales se obtuvieron mediante la carta geológica de Arica del Sernageomin, identificando los principales suelos y asignando a estos valores típicos, luego se procedió a ajustar estos valores utilizando los datos de niveles de pozos y afloramiento de las vertientes como indicadores.

Finalmente, el modelo incluye 35 zonas de recarga, de las cuales a 19 zonas de recarga se les asignan valores promedios históricos de tasas de recarga. Las 16 zonas de recarga restantes se asignan al relleno sedimentario de acuerdo a la composición del suelo identificada en la carta geológica de Arica del Sernageomín. La tasa de recarga asignada a las zonas ubicadas en el relleno sedimentario es calculada para cada periodo, multiplicando la recarga total de dicho periodo por un coeficiente de distribución de la recarga, el cual se detalla en la sección 3.1.3 de este trabajo. Esta diferencia en métodos de asignación de recarga es producto de que en el relleno sedimentario es donde ocurren las mayores variaciones del almacenamiento y donde ocurre casi la totalidad de las extracciones del valle.

Existen 514 pozos de extracción, que alternan su funcionamiento para los periodos modelados por AC Ingenieros de acuerdo al catastro efectuado para dicho estudio. Para efectos de este trabajo también se verificó la situación actual de extracciones utilizando la base de datos de Derechos Concedidos de la Dirección General de Aguas para la XV Región.

Para poder analizar las salidas se extrajo el balance hídrico calculado por Visual MODFLOW en la sección de Zone Budget, el cual trae detallado las extracciones, afloramientos, cambios en el almacenamiento, recarga y flujo por condiciones de nivel constante. El modelo cuenta con dos sectores diferentes de Zone Budget, uno asignado específicamente al área comprendida por las vertientes y el otro asignado al resto de la cuenca. Esto es para poder diferenciar el flujo a través de las vertientes con el de los drenes.

Se hizo uso de rutinas generadas en MATLAB para el procesamiento de los datos y la realización de los gráficos para su análisis.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS SIMULADOS

3.1. Escenarios climáticos

Debido a que los escenarios de mayor interés de estudio consisten en escenarios de escases hídrica, se proyectarán dos escenarios en donde las precipitaciones se verán reducidas en promedio en un 20% y un 40% de forma lineal a lo largo de un periodo de 100 años (Minvielle, 2011), esto con el fin de representar de mejor manera la transición de este efecto. Adicionalmente se decidió proyectar un escenario en donde la tendencia actual del clima se mantenga, es decir que la media de sus datos no se vea afectada, esto con un fin comparativo entre los distintos escenarios.

3.1.1. Generación de series de precipitación

Para la generación de las series de precipitaciones se decidió utilizar modelos estadísticos no correlacionados de generación de datos debido a la baja autocorrelación del promedio de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas seleccionadas, como se muestra en la Figura 9.

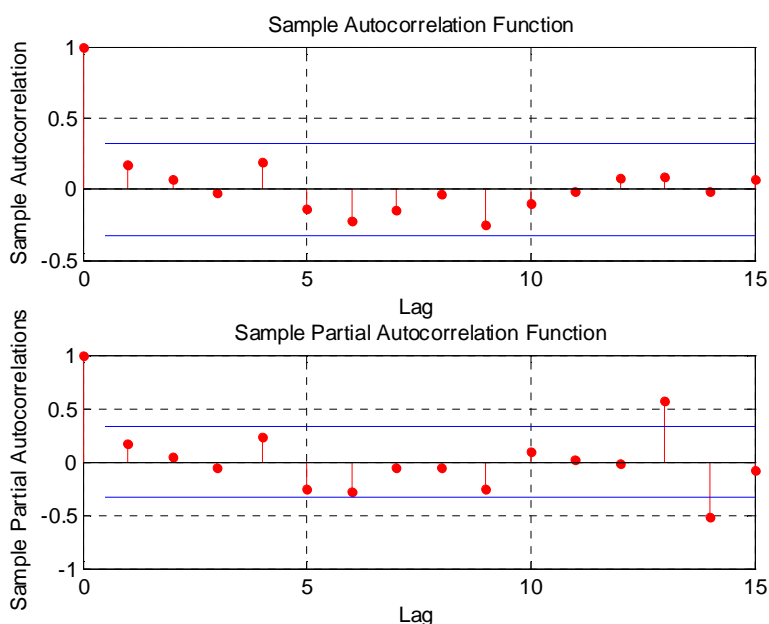


FIGURA 9: EN EL GRÁFICO SUPERIOR SE PRESENTA LA AUTOCORRELACIÓN SIMPLE DE LA MUESTRA DE PRECIPITACIONES PROMEDIADAS DE LAS TRES ESTACIONES, MIENTRAS QUE EN EL GRÁFICO INFERIOR SE MUESTRA LA AUTOCORRELACIÓN PARCIAL. LAS LINEAS AZULES INDICAN UN NIVEL MÍNIMO DE CORRELACIÓN ACEPTABLE. LAG EN AÑOS.

De las estaciones seleccionadas se utilizaron 38 años de datos, comprendidos entre los años 1976 y 2013, estos incluidos. Las distribuciones seleccionadas fueron Log-Normal, Gamma y Weibull por ser distribuciones que mejor representan series de precipitaciones. La Figura 10 muestra que las distribuciones que mejor ajustan la serie de datos observados son la distribución Weibull y Gamma.

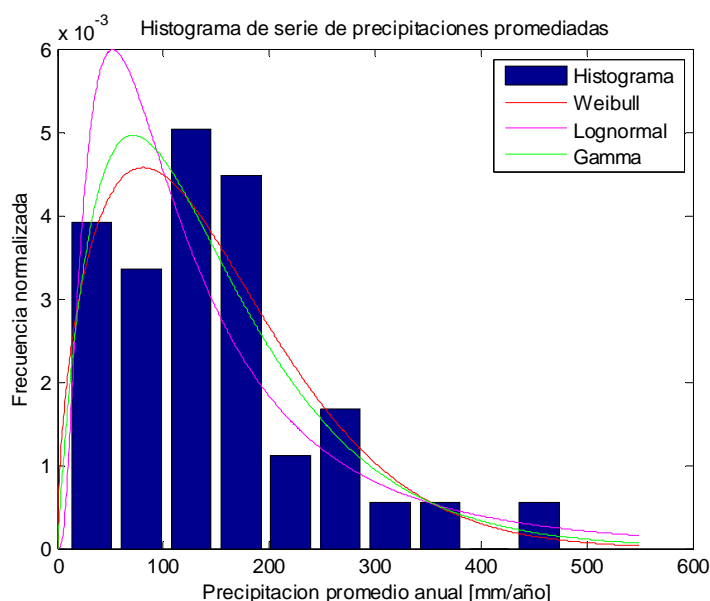


FIGURA 10: HISTOGRAMA DE SERIE DE PRECIPITACIONES PROMEDIO ENTRE ESTACIONES CHAPIQUIÑA, TIGNAMAR Y BELEN. LAS CURVAS REPRESENTAN EL AJUSTE DE LAS DISTINTAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD.

Para comparar las distribuciones se realizó un análisis de bondad de ajuste utilizando un test Chi Cuadrado. Este test compara el valor de bondad de ajuste, que se identificará como "Chi stat" en la Tabla 2, con un valor crítico, el cual de ser sobrepasado indica que la hipótesis nula se rechaza, esto significa que no hay relación entre los datos observados y los datos esperados. En este caso se tienen diez grados de libertad, por lo que el valor crítico de comparación para un nivel de significancia de 0.05 es de 18.31. Esto significa que ninguna de las distribuciones seleccionadas rechaza la hipótesis nula, sin embargo Weibull presenta un valor Chi stat menor que las otras distribuciones, indicando que la diferencia entre los valores observados y los esperados según esta distribución son más cercanos que en las otras distribuciones.² Por este motivo fue seleccionada para la generación de series de precipitación.

² http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Chi_cuadrado.pdf

TABLA 2: RESULTADOS DE AJUSTE DE LAS DISTRIBUCIONES

	Lognormal	Gamma	Weibull
Chi stat	2.51	2.82	2.22
p [%]	-	24%	33%

3.1.2. Correlación entre precipitaciones y recarga

El efecto de las precipitaciones se ingresan al modelo a través de la recarga asociada a estas. Sin embargo, se espera que estas tengan algún tipo de correlación con las recargas debido a que la principal fuente de agua proviene de las precipitaciones. Es así como tras realizar un breve análisis de correlación del promedio de las precipitaciones de las tres estaciones meteorológicas, bajo medias móviles de distintas longitudes, con las recargas calculadas por el modelo de AC Ingenieros, se determinó que la mayor correlación ocurre entre la recarga total del modelo y la media móvil ponderada de 4 años como se muestra en las Figura 11 y Figura 12. Es muy importante observar que gran parte de los estudios climatológicos analizan la media móvil de 4 años de las precipitaciones por ser un buen representante de la tendencia del clima, filtrando gran parte del ruido de esta provocado principalmente por la incerteza meteorológica.

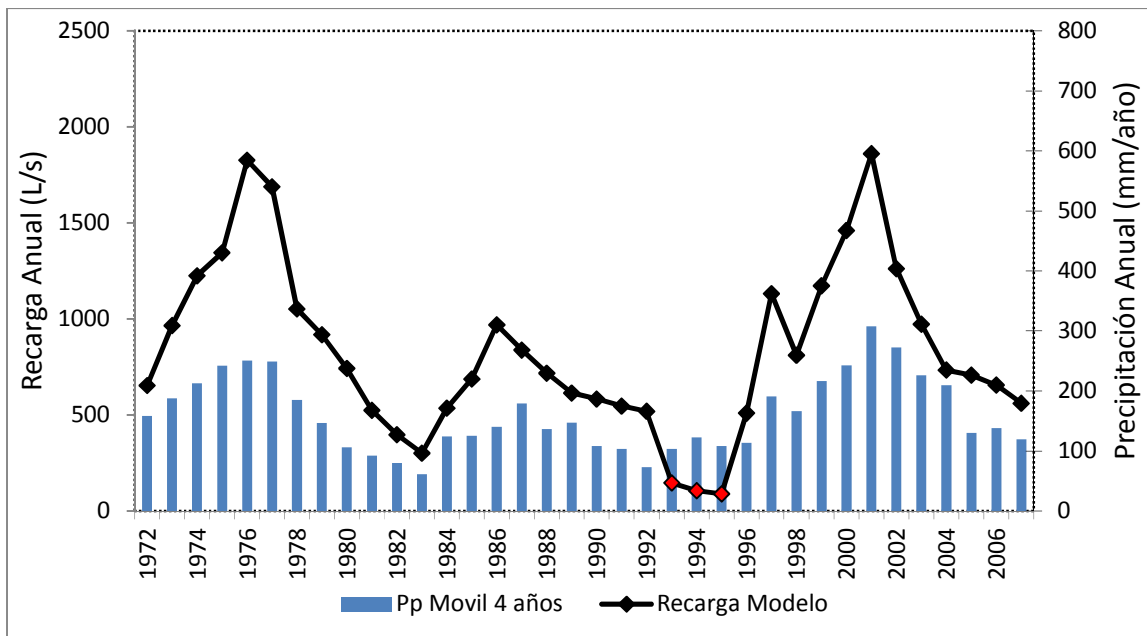


FIGURA 11: MEDIA MOVIL DE 4 AÑOS PARA PROMEDIO DE PRECIPITACIONES EN BARRAS AZULES, MIENTRAS QUE LA RECARGA CALCULADA POR EL MODELO SE MUESTRA CON UNA LINEA NEGRA.

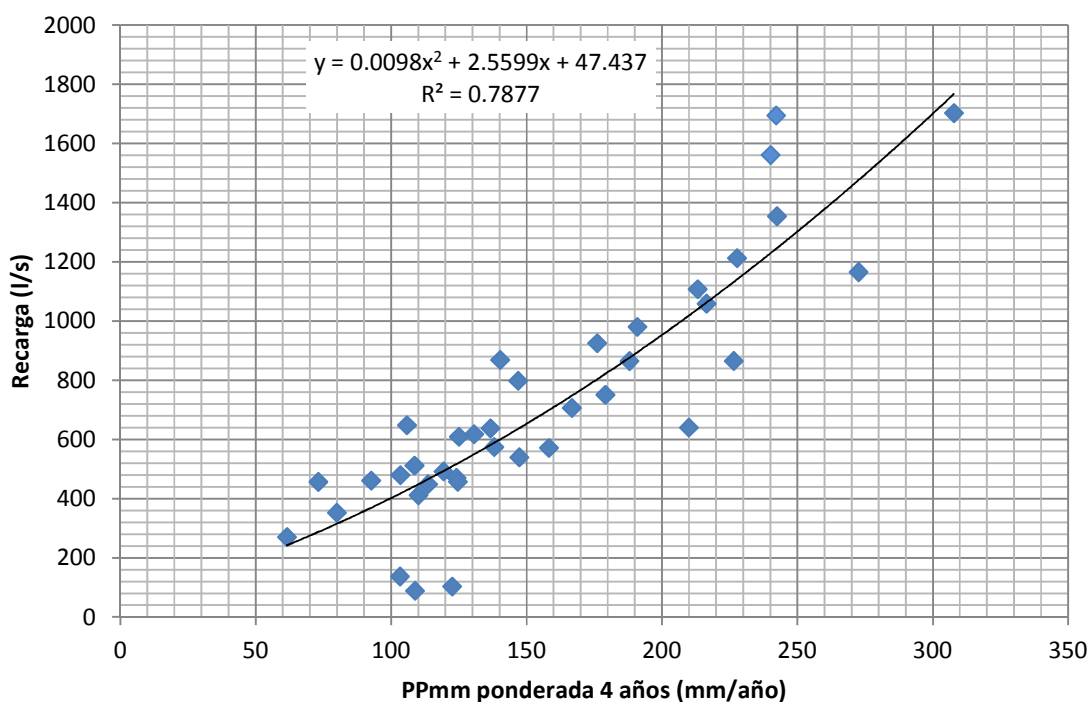


FIGURA 12: CORRELACIÓN ENTRE PRECIPITACIONES Y RECARGA DEL MODELO

3.1.3. Asignación de la recarga

El modelo tiene 35 zonas de recarga diferentes, de las cuales 16 demuestran variación en función de las precipitaciones, mientras que las otras 19 son zonas utilizadas para el ajuste realizado por el modelo regional, en las cuales se usan recargas promedio, calculadas con un modelo de flujo superficial (AC Ingenieros, 2010).

Para poder distribuir la recarga en las distintas áreas, se requiere saber cuál es el aporte de cada una de estas a la recarga total del modelo. Es por esto que se calculó el volumen de agua recargado en metros cúbicos por año para cada una de las zonas y se comparó con el volumen total recargado en metros cúbicos por año, generando de esta forma coeficientes de distribución para la recarga según lo observado en la Tabla 3, los cuales al ser multiplicados por la recarga total, entregan como resultado el volumen de recarga asociado a dicha zona. Este volumen es dividido posteriormente por el área de la zona para determinar la tasa de recarga correspondiente.

TABLA 3: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE RECARGA.

Zona	Área [m2]	Área [km2]	Tasa promedio [mm/año]	Volumen de recarga [m3/año]	Coefficientes de distribución [c]
1	306.049.200	306	0	140.783	0,006
2	158.163.240	158	0	68.010	0,003
3	47.005.380	47	0	20.212	0,001
4	111.055.380	111	1	56.638	0,003
5	74.678.640	75	3	257.455	0,012
6	911.230	1	3	3.141	0,000
7	1.085.446	1	14	15.663	0,001
8	576.560	1	165	94.844	0,004
9	1.084.202	1	350	379.471	0,017
10	75.206	0	13.454	1.011.825	0,045
11	332.156	0	386	128.238	0,006
12	-	-	700	-	0,000
13	203.053	0	12.309	2.499.307	0,112
14	167.957	0	7.082	1.189.394	0,053
15	307.085	0	700	214.959	0,010
16	62.670	0	16.411	1.028.485	0,046
17	7.727.358	8	4	27.046	0,001
18	62.670	0	7	439	0,000
19	-	-	7	-	0,000
20	1.391.276	1	647	900.672	0,040
21	1.015.247	1	765	776.944	0,035
22	-	-	140	-	0,000
23	6.199.308	6	590	3.655.417	0,163
24	5.760.840	6	679	3.909.081	0,175
25	3.885.456	4	70	271.982	0,012
26	1.647.000	2	786	1.294.977	0,058
27	1.131.818	1	4	3.961	0,000
28	2.100.730	2	7	14.705	0,001
29	1.027.801	1	41	42.430	0,002
30	1.040.318	1	350	364.111	0,016
31	813.472	1	73	59.047	0,003
32	5.815.740	6	119	691.062	0,031
33	1.391.276	1	100	139.128	0,006
34	8.144.598	8	383	3.116.902	0,139
35	282	0	23	6	0,000
Total	750.912.596	751	56.372	22.376.335	1,000

El cálculo del volumen anual de agua recargado por zona requiere que se conozcan la tasa de recarga y un área sobre la cual esta recarga actúa. Las

áreas se encuentran como valores implícitos dado por el tamaño y cantidad de celdas asociadas a la zona en cuestión, es por esto que se procedió a calcular dichas áreas utilizando el mismo modelo. Sistemáticamente se cambió la recarga de cada zona a la cual se requirió calcular su área a $1[m^3/año]$, mientras que a las demás zonas de recarga se les asoció una recarga de $0[m^3/año]$, estas recargas son ponderadas internamente por el área asociada a cada celda, de esta forma al determinar la recarga anual del modelo, el volumen que se obtiene como resultado es el área asociada a dicha zona.

Aquellas zonas que no presentan un área calculada en la Tabla 3, son zonas que el modelo tiene disponible para asignar, pero que sin embargo no tienen ninguna celda activa asociada, de modo que la recarga aportada por dichas zonas es nula.

3.2. Escenarios de demanda

Se utilizó tres escenarios de demanda para medir la sensibilidad del sistema acuífero a los cambios producto de las distintas extracciones. Un escenario de extracciones base igual a la la demanda actual de $740 [l/s]$, obtenida de la base de datos de derechos concedidos de la DGA para la cuenca del río San José, para los 100 años simulados. Una demanda con un 10% más de extracciones, equivalente a $814 [l/s]$, para poder evaluar un posible aumento en la demanda producto de crecimiento de la población y aumento en la actividad agrícola. Y una demanda con un 10% menos de extracciones, equivalente a $665 [l/s]$.

Finalmente y con el propósito de comparar estos escenarios de demanda y sus efectos sobre la respuesta del acuífero, se analizó un escenario sin extracciones el cual representa el funcionamiento natural del sistema acuífero.

3.3. Resumen de escenarios simulados

Para dejar explícito, en cada escenario climático se realizó un análisis de sensibilidad sobre la demanda, generando de esta forma nueve escenarios posibles de simulación. Para cada combinación de escenario climático más escenario de demanda se realizó cinco simulaciones, esto con el fin de poder determinar una respuesta promedio en cada situación de análisis. De esta forma se realizaron sesenta simulaciones en total.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta un análisis de los resultados obtenidos a partir de los escenarios simulados, el cual se enfoca principalmente a la relación que existe entre extracciones, salidas (vertientes, drenes y condición de borde) y variación del volumen de almacenamiento, tal como sugiere Bredehoeft (2002). Para esto analizamos la evolución promediada de los distintos factores en función de las distintas combinaciones de escenario propuestos, primero realizando un análisis del efecto de la variabilidad climática, para luego comparar el efecto de los escenarios de bombeo y concluir comparando ambos.

4.1. Validación con niveles de pozos observados

Para dar mayor validez al estudio, se analizó la correlación entre las precipitaciones y los niveles de los pozos. Para esto se compararon las observaciones y registros, de los niveles de pozos y precipitaciones respectivamente, con los niveles calculados con el modelo y las series de precipitaciones. Para una comparación más directa se utilizó el escenario de precipitaciones y extracciones actuales, obteniendo los resultados presentes en la Figura 13.

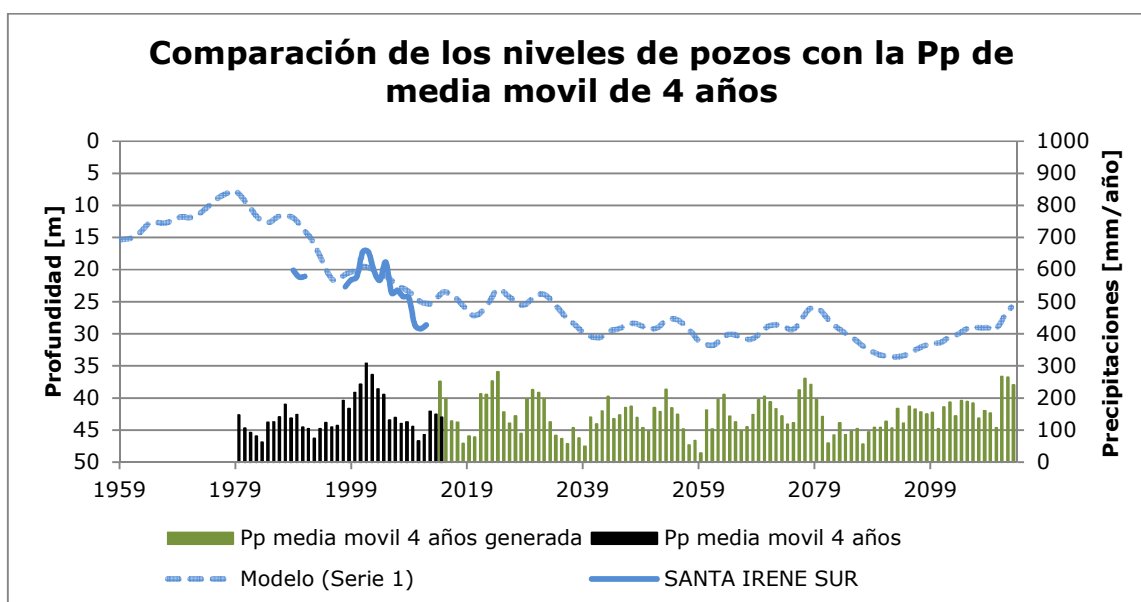


FIGURA 13: COMPARACIÓN ENTRE NIVELES DEL POZO SANTA IRENE SUR Y PRECIPITACIONES. BARRAS NEGRAS REPRESENTAN PRECIPITACIONES MEDIDAS, BARRAS VERDES REPRESENTAN UNA SERIE

GENERADA DE PRECIPITACIONES. LINEA CONTINUA REPRESENTA OBSERVACIONES MIENTRAS QUE LINEA DISCONTINUA REPRESENTA RESULTADOS DEL MODELO.

Existe una diferencia en la magnitud de las fluctuaciones de los niveles del pozo debido a que la correlación de las precipitaciones y la recarga es imperfecta, por lo que no estima correctamente algunos valores de recarga extremos.

Adicionalmente, existe el efecto de que las extracciones simuladas corresponden a caudales fijos, lo cual no representa a cabalidad lo que pasa en la realidad, puesto que la rotación de los cultivos y el ganado junto con la percepción de escasez o abundancia de agua genera que estas extracciones sean muy dispares en el periodo de algunos años, incrementando el efecto sobre la variación de los niveles de los pozos.

Por otro lado, al observar la Figura 14, uno puede notar que los niveles del pozo Las Riveras de Madrid representan las fluctuaciones de los datos de forma un poco más fidedigna. Sin embargo, este se ubica muy cerca de donde se encuentran las vertientes, debido a esto los niveles alrededor de esta zona son mucho más superficiales y las fluctuaciones aparentan ser más pronunciadas, pero si se compara la magnitud de estas fluctuaciones con las del pozo Santa Irene Sur, llegamos a valores similares.

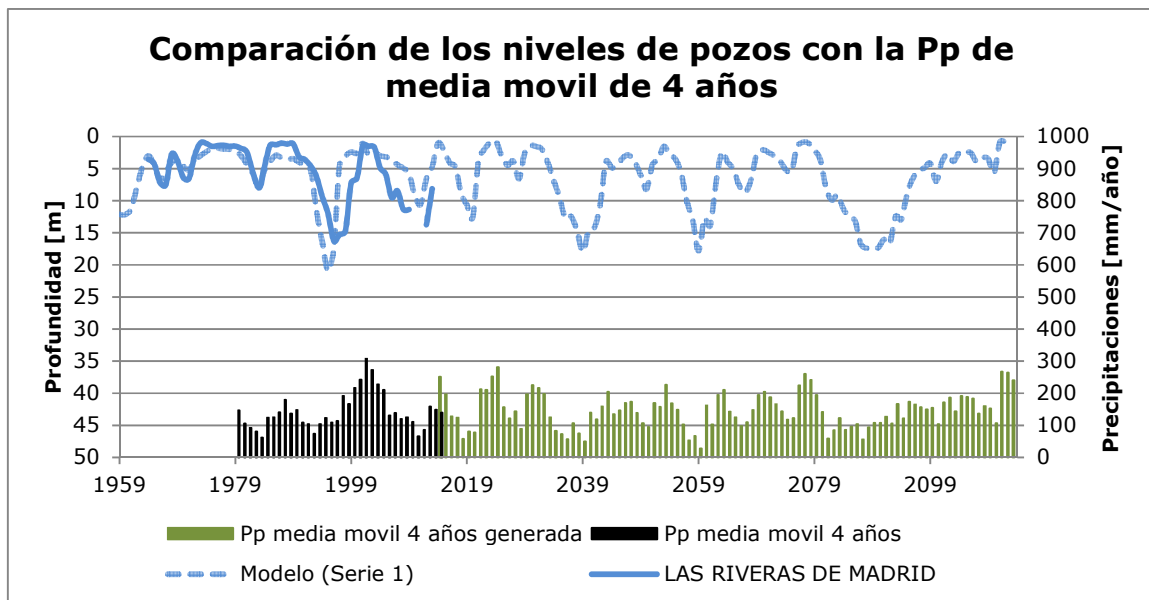


FIGURA 14: COMPARACIÓN ENTRE NIVELES DEL POZO LAS RIVERAS DE MADRID Y PRECIPITACIONES. BARRAS NEGRAS REPRESENTAN PRECIPITACIONES MEDIDAS, BARRAS VERDES REPRESENTAN UNA SERIE GENERADA. LINEA CONTINUA REPRESENTA OBSERVACIONES MIENTRAS QUE LINEA DISCONTINUA REPRESENTA RESULTADOS DEL MODELO.

La diferencia está en que los datos registrados para Santa Irene Sur llegan a mayores profundidades, haciendo evidente que estos niveles pueden elevarse, pero en Las Riveras de Madrid, los años lluviosos no se representan bien pues los excedentes son descargados a través de las vertientes.

Al observar el pozo Las Animas representado por la Figura 15, el cual se encuentra aguas debajo de las vertientes, se aprecian fluctuaciones de sus niveles similares a los de Santa Irene Sur. Se destaca que la recarga promedio en el largo plazo se mantiene constante para este escenario, por lo que al fijar las capturas, el acuífero compensa la diferencia entre estos dos valores ajustando las salidas del sistema y las variaciones de almacenamiento. Si los valores de recarga son en promedio mayores que la captura, las salidas del sistema serán mayores y las variaciones de almacenamiento indicarán un aumento del volumen almacenado en el largo plazo, lo que implicaría un aumento en los niveles promedio de los pozos. Si los valores de recarga son en promedio menores que la captura, las salidas del sistema serán menores y las variaciones de almacenamiento indicarán una disminución del volumen almacenado en el largo plazo, lo que implicaría una disminución en los niveles promedio de los pozos. Al observar que los niveles se mantienen alrededor del mismo promedio de las observaciones históricas, se concluye que el sistema se encuentra en equilibrio.

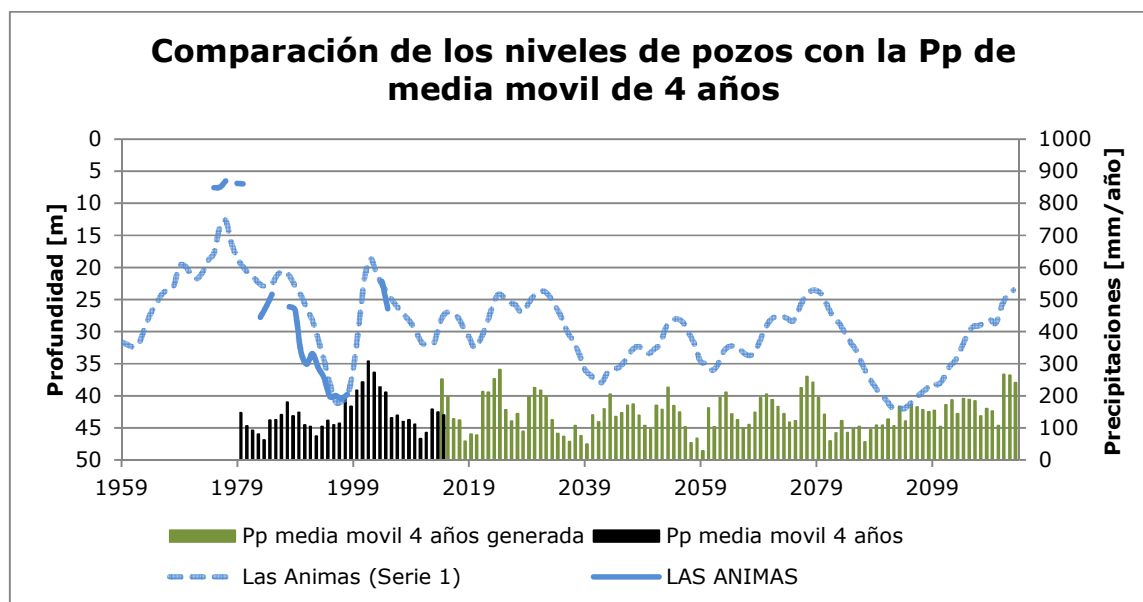


FIGURA 15: COMPARACIÓN ENTRE NIVELES DEL POZO LAS ANIMAS Y PRECIPITACIONES. BARRAS NEGRAS REPRESENTAN PRECIPITACIONES MEDIDAS, BARRAS VERDES REPRESENTAN UNA SERIE GENERADA. LINEA CONTINUA REPRESENTA OBSERVACIONES MIENTRAS QUE LINEA DISCONTINUA REPRESENTA RESULTADOS DEL MODELO.

El objetivo de mostrar los resultados de una simulación versus la serie de precipitaciones asociada a dicha simulación, es comparar ambos para confirmar una correlación entre las precipitaciones y los niveles de los pozos. Sin embargo, para poder analizar el conjunto de los resultados, se construyeron gráficos del promedio de los niveles para cada pozo, los cuales pueden ser encontrados en el Anexo E. En estos resultados se puede observar que las fluctuaciones de los niveles no tienen las mismas magnitudes que en años previos a los 100 años de simulación.

4.2. Análisis de extracciones

Se puede observar en la Figura 16 que hay una respuesta directa sobre las extracciones reales del valle, esto ocurre debido a que la menor cantidad de precipitaciones implican una menor recarga y al mantener una demanda constante e igual a la demanda actual (captura constante), las salidas y el almacenamiento deben responder adecuadamente según el principio de Theis (1940). En otras palabras los drenes, vertientes y salidas por condiciones de borde reducen sus caudales mientras que las variaciones en el almacenamiento presentan un aumento en el volumen de almacenamiento, lo cual se traduce en un descenso de los niveles de agua hasta el punto en donde los pozos no son capaces de extraer agua. El modelo interpreta esto como que no hay agua disponible en la celda, apagando momentáneamente las extracciones de los pozos asociadas. Debido a que los pozos de extracción funcionan en dos estados (prendido o apagado), al apagarse una celda que contenga varios pozos el caudal entero asociado a estos se substraer de las extracciones potenciales, viéndose como saltos en el gráfico. Cabe destacar que la versión de Visual MODFLOW utilizada tiene una opción que permite rehumedecer celdas secas (*rewetting*), esto significa que vuelvan a considerarse celdas activas por el modelo. Sin embargo esto no ocurre si las celdas adyacentes también están secas, es por esto que si el radio de influencia combinado de varias bombas afecta un sector, este puede secarse por periodos prolongados de tiempo.

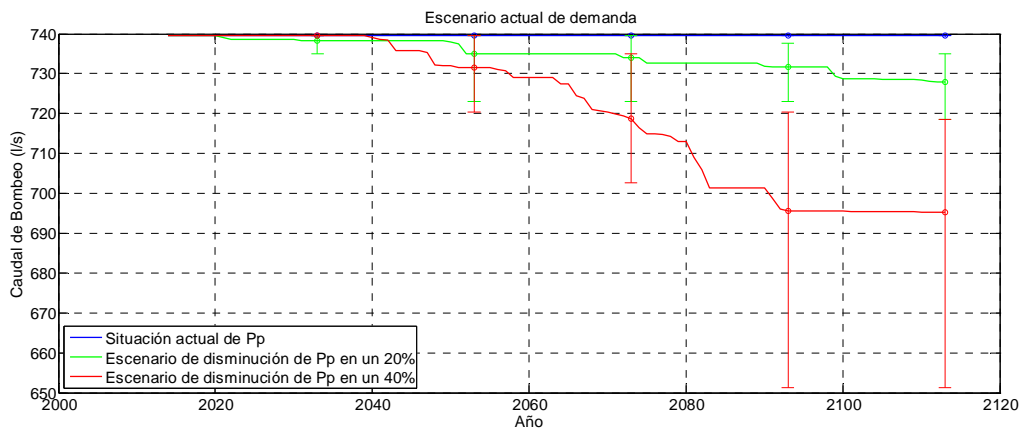


FIGURA 16: COMPARACIÓN DE LAS EXTRACCIONES PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE PRECIPITACIONES, LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN EXTRACCIONES PROMEDIADAS MIENTRAS QUE LÍNEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

Por otro lado, los descensos en los casos más desfavorables corresponden hasta un 12% de los caudales de extracción lo que significa que la captura para satisfacer la demanda se obtiene de las otras variables del sistema: los drenes de la zona baja de la cuenca, las vertientes, la condición de borde ubicada a la salida de la cuenca y la variación en el almacenamiento.

En el caso de los otros escenarios de demanda, la respuesta es similar, con la diferencia de que en el escenario de demanda reducida las variaciones entre los distintos escenarios climáticos son menores, mientras que en el escenario de demanda aumentada, la diferencia entre los distintos escenarios climáticos es mayor. Los gráficos asociados a estos escenarios se encuentran en el Anexo A.

4.3. Análisis de drenes y vertientes

Al comparar los caudales de las vertientes según los distintos escenarios climáticos para un mismo escenario de demanda como se muestra en la Figura 17, se observa el efecto del cambio climático como una disminución de la media de los afloramientos. El caudal de afloramiento en un escenario climático como el actual se encuentra alrededor de los 600 l/s, mientras que para un escenario con disminución de un 40% de las precipitaciones, la media de los últimos años se encuentra alrededor de los 450 l/s. Sin embargo, al observar la Figura 18 en donde se comparan los escenarios climáticos bajo una demanda equivalente a la actual, la media de los caudales para el escenario climático sin reducciones se ve reducida alrededor de 100 l/s por efecto de la captura artificial.

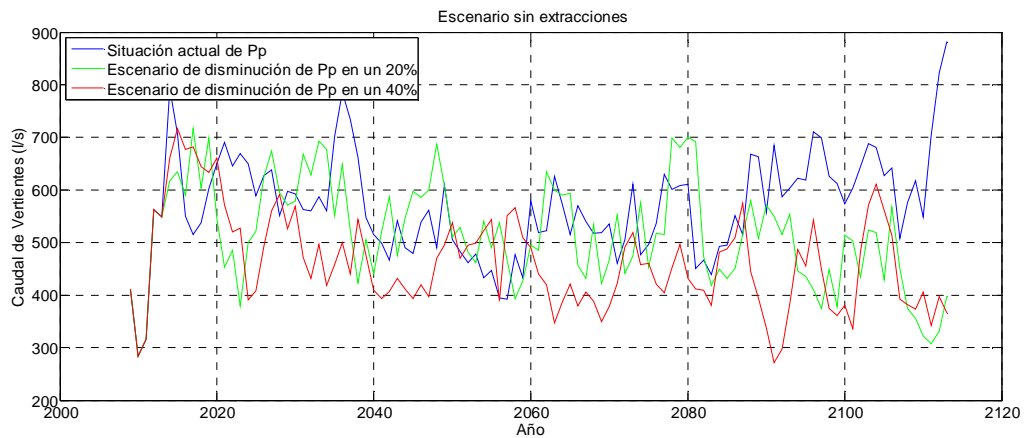


FIGURA 17: COMPARACIÓN DE CAUDAL PROMEDIO DE VERTIENTES PARA UN ESCENARIO SIN EXTRACCIONES. LOS VALORES REPRESENTAN EL CAUDAL PROMEDIO QUE AFLORA EN VERTIENTES.

Se destacan los altos valores observados en el último periodo de las simulaciones para el escenario de precipitaciones actuales. Esta situación ocurre por efecto de las altas precipitaciones simuladas en una de las series generadas para este escenario. Esto tiene como efecto que la recarga calculada para la serie tenga valores elevados que aumentan los caudales de las salidas del sistema para dicha serie, de esta forma el promedio para estos periodos también se eleva.

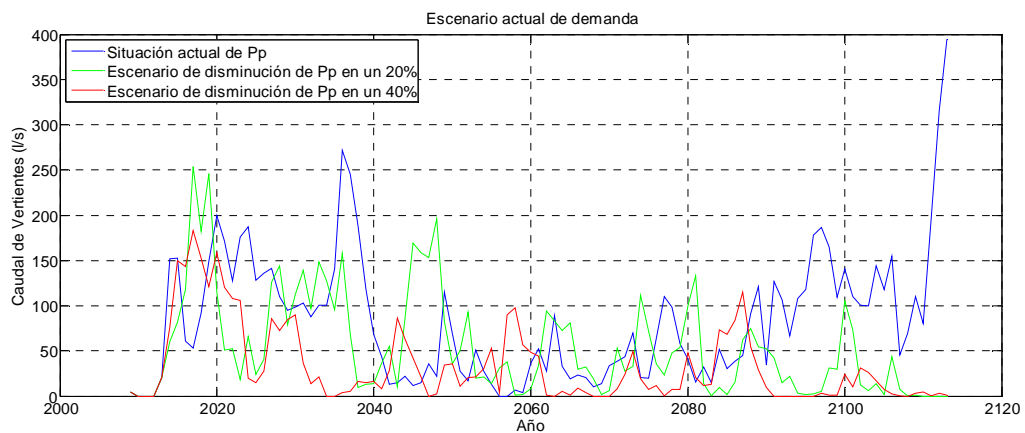


FIGURA 18: COMPARACIÓN DE CAUDAL DE VERTIENTES PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE PRECIPITACIONES. LOS VALORES REPRESENTAN EL CAUDAL PROMEDIO QUE AFLORA EN VERTIENTES.

Las diferencias de las medias de los caudales en las vertientes observadas en el escenario sin extracciones tiende a mantenerse, lo que tiene como efecto que el caudal de afloramiento desaparezca. Estos efectos se ven con mayor frecuencia y magnitud a medida que se recorre el eje que representa los años. Esto ocurre debido a que como la recarga es menor, para poder cubrir

la demanda las bombas capturan agua que en un principio evacuaría por las vertientes.

Los drenes también presentan una respuesta directa al cambio climático tal como se observa en la Figura 19. Sin embargo los caudales medios de los drenes de la zona baja para los tres escenarios climáticos son bastante cercanos, con valores que rondan los 300 l/s.

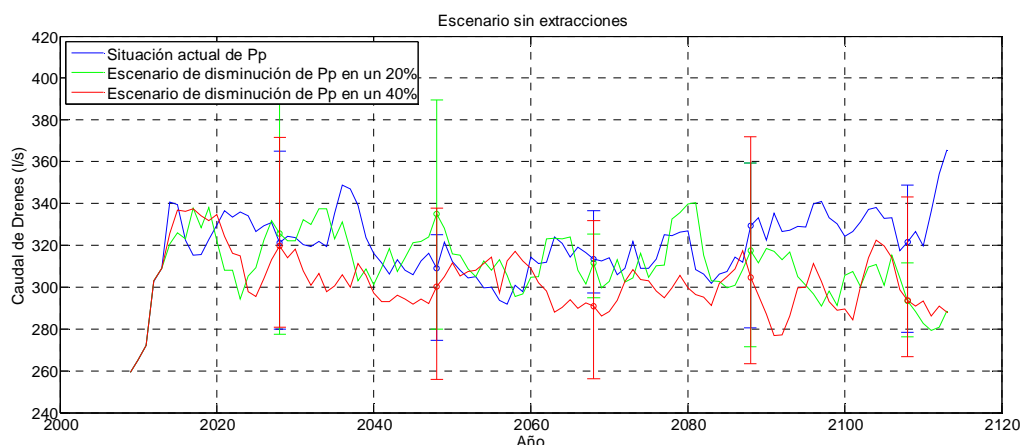


FIGURA 19: COMPARACIÓN DE CAUDAL DE DRENES PARA UN ESCENARIO SIN EXTRACCIONES. LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS DE LOS DRENES MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

Al insertar extracciones se observa un descenso de los caudales medios de forma general y una disminución de las fluctuaciones de los caudales aflorados. Sin embargo, la diferencia de los valores promedio tiende a mantenerse al igual que en las vertientes como se observa en la Figura 20, pero con la diferencia de que estos caudales no alcanzan a disminuir tanto pues la influencia de los pozos de extracción es mayor alrededor de las vertientes.

Al igual que las extracciones, las vertientes y drenes tienen una respuesta similar producto de los distintos escenarios de demanda pero con magnitudes diferentes. Para un mayor detalle de estos ver Anexos B y D, para vertientes y drenes respectivamente.

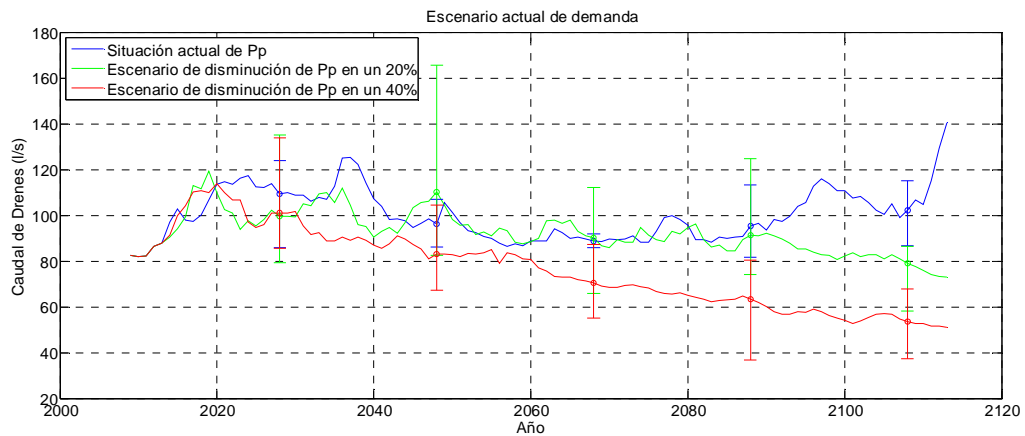


FIGURA 20: COMPARACIÓN DE CAUDAL DE DRENES PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE PRECIPITACIONES LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS DE LOS DRENES MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

4.4. Análisis de flujo de salida

Las salidas se graficaron utilizando valores de caudales negativos para representar caudales que salen del acuífero, mientras que los valores positivos representan caudales que entran a tal. Se puede observar en la Figura 21 que los caudales de salida rondan los 22 l/s. En este caso la disminución de la recarga por efecto del cambio climático se traduce en una reducción de la magnitud de los caudales que salen del acuífero, es decir se hacen menos negativos.

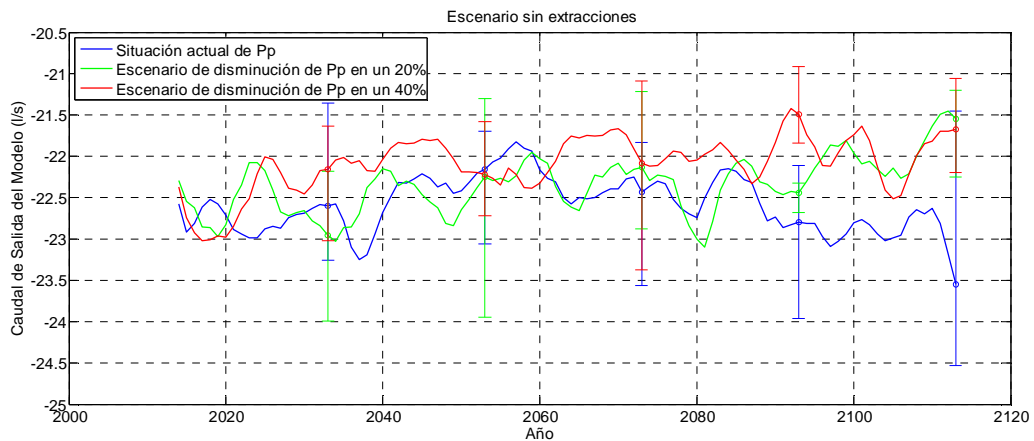


FIGURA 21: CAUDALES DE CONDICIÓN DE BORDE DE SALIDA DEL MODELO PARA UN ESCENARIO SIN EXTRACCIONES. LOS VALORES NEGATIVOS REPRESENTAN CAUDALES DE SALIDA DEL ACUÍFERO. LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

Al considerar las extracciones, se puede observar (ver Figura 22) una variación con respecto a la situación base sin extracciones que,

proporcionalmente es de gran magnitud, pero si es comparada con los valores de las otras salidas representa una fracción menor, indicando una menor influencia de los pozos de extracción que en el caso de los drenes por ejemplo.

Por otro lado, los valores positivos que se observan para el escenario de reducción de las precipitaciones en un 40% se producen principalmente debido a que existe una condición de borde constante y cuando los niveles del modelo descienden por debajo de los niveles de esta, el gradiente entre las celdas cercanas al borde y este mismo, se invierte, provocando de esta forma que se genere un flujo de entrada.

Si bien el caudal que entra al modelo es pequeño, puede significar un problema importante. En el primer caso podría implicar que se está afectando al acuífero del río Lluta, reduciendo la captura de los pozos en la zona baja de este. Por otro lado, la confección del modelo original probablemente no consideró un escenario en que los niveles del acuífero fueran menores a la condición de borde en algún momento, por lo que esta situación debiese ser revisada con mayor atención.

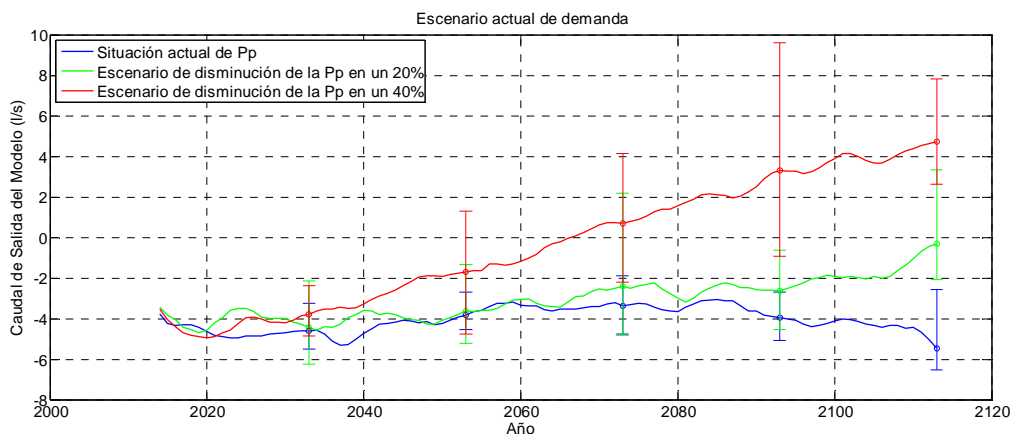


FIGURA 22: COMPARACIÓN DE CONDICIÓN DE BORDE DE SALIDA DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE PRECIPITACIONES. LOS VALORES NEGATIVOS REPRESENTAN CAUDALES DE SALIDA AL ACUÍFERO MIENTRAS QUE LOS POSITIVOS SON CAUDALES DE ENTRADA. LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

4.5. Análisis del almacenamiento del relleno sedimentario

Cuando se evalúa la capacidad de captura, se debe observar tanto las salidas como la variación del almacenamiento del acuífero, ya que este último puede llegar a ser una de las principales fuentes cuando las salidas no son suficientes para compensar una captura elevada y las recargas se consideran relativamente constantes.

El cálculo del volumen de almacenamiento del relleno sedimentario se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$V = S * A * \Delta h$$

Donde V corresponde al volumen almacenado, A es el área de la celda, Δh es la altura de la columna de agua y S es el coeficiente de almacenamiento, el cual se define de la siguiente manera:

$$S = S_s * \Delta h + S_y$$

donde S_s corresponde al almacenamiento específico y S_y a la capacidad específica.

El relleno sedimentario se encuentra a lo largo de todo el cauce como se puede ver en la Figura 23, en la cual los tonos azules representan un bajo o nulo almacenamiento mientras que los colores rojos equivalen a volúmenes de almacenamiento mayor por superficie. Si bien el resto de la cuenca, también es potencialmente un lugar de almacenamiento para aguas subterráneas, los coeficientes de almacenamiento asociados a estos sectores son significativamente menores al del relleno sedimentario, por lo que no serán tomados en cuenta en este análisis. De esta forma el almacenamiento inicial del sector modelado es de 1.366 [hm³]. Como referencia cabe mencionar que este valor es 100 veces mayor que el volumen proyectado para el embalse Livilcar³ y 10 veces mayor que el volumen promedio anual precipitado en el dominio del modelo, el cual consiste en 111 [hm³].

³ Proyectos del Plan Especial de Desarrollo Estratégico Arica y Parinacota-GORE (2014).

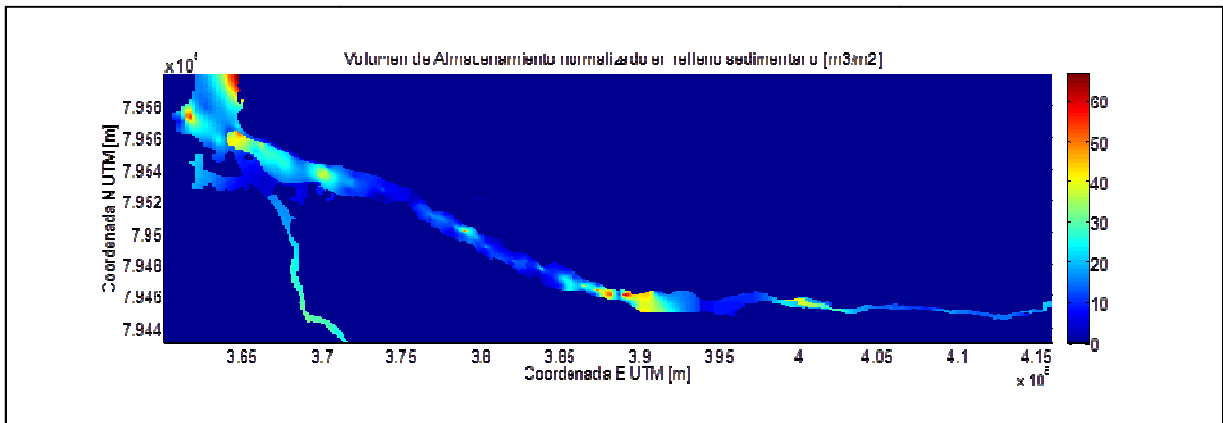


FIGURA 23: VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO NORMALIZADO, A VALORES MÁS ALTOS DE ALMACENAMIENTO, LAS CELDAS ADQUIEREN COLORES MÁS ROJOS.

Al comparar el almacenamiento inicial con el volumen almacenado al final de la simulación para un escenario de reducción de las precipitaciones en un 40%, se observa una reducción del volumen de agua almacenado en el acuífero de un 16%, equivalente a 223 [hm³]. Si bien un 16% es una proporción menor del almacenamiento total, este presenta una focalización producto de la alta densidad de pozos en dos sectores específicos del modelo como se puede observar en la Figura 24. Esto se traduce localmente a una pérdida de capacidad de abastecimiento importante ya que el capturar el almacenamiento de otros sectores implica realizar pozos de extracción adicionales, elevando los costos que si bien pueden no ser tan altos para una gran empresa, pueden representar una inversión mayor para un agricultor.

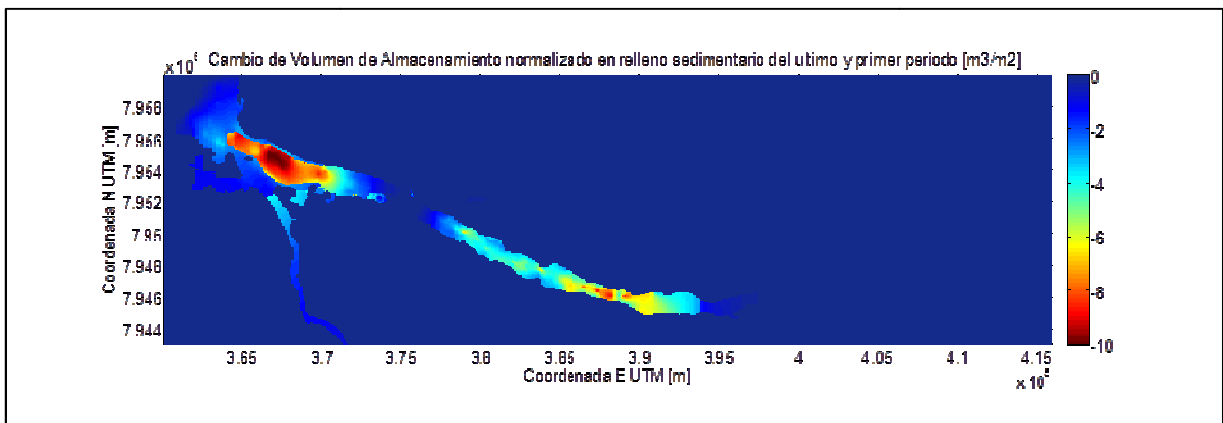


FIGURA 24: VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO LUEGO DE 100 AÑOS, COLORES ROJOS DENOTAN UNA PÉRDIDA DE VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO.

4.6. Comparación del efecto del cambio de la demanda y la disminución de las precipitaciones.

Hasta ahora se ha resaltado la importancia del efecto de la variabilidad climática, específicamente de la disminución de las precipitaciones en el tiempo, sin embargo no se ha comparado con la importancia de los cambios en la demanda, la cual se sugiere que es uno de los factores que influyen de forma importante la evolución de los niveles piezométricos en un acuífero.

Al elevar la demanda potencial, se espera que los niveles en los pozos se deterioren más velozmente y por ende que se sequen más pozos. Si bien la velocidad a la que se apagan los pozos de bombeo, representada por la pendiente de la curva en la Figura 25 es mayor; no es suficiente para que el bombeo disminuya bajo los niveles de bombeo del escenario sin modificación de la demanda, lo que sugiere que quizás el acuífero puede sostener una demanda más alta. Analizando en conjunto con la Figura 24, los pozos ubicados en los sectores de mayor efecto sobre el almacenamiento son más vulnerables a ser apagados producto de la falta de agua, pero repartir los pozos de extracción homogéneamente en sectores que sufren un menor efecto sobre el almacenamiento implicaría una menor velocidad de secado de dichos pozos, puesto que no se encontrarían tan concentrados, permitiendo sostener por más tiempo mayores caudales de extracción y aprovechar un mejor uso del volumen de agua almacenada.

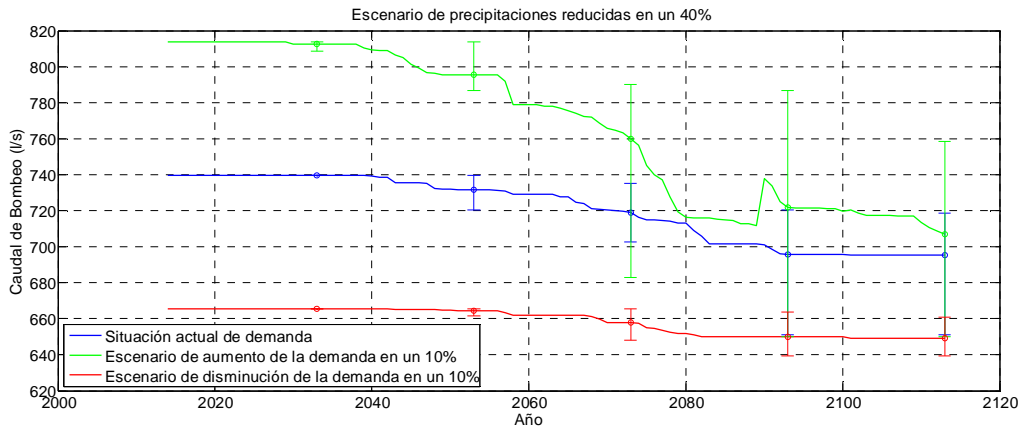


FIGURA 25: COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LAS EXTRACCIONES PARA DISTINTAS CONDICIONES DE DEMANDA, LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN EXTRACCIONES PROMEDIADAS MIENTRAS QUE LÍNEAS VERTICALES REPRESENTAN VARIACIÓN ENTRE DISTINTOS ESCENARIOS.

Por otro lado, el análisis del caudal que aflora en las vertientes revela que una parte del caudal necesario para suplir esta demanda elevada, es

capturada del caudal que se espera que aflore en estas, lo que se refleja en una reducción de los caudales de salida de hasta más de un 50% en algunos años como se puede observar en la Figura 26. Así mismo una disminución del caudal de extracción genera el efecto opuesto, aumentando el caudal que aflora en las vertientes debido a que como la recarga es la misma y la captura es menor, para mantener el balance las salidas deben ser mayores, permitiendo menos periodos de años secos.

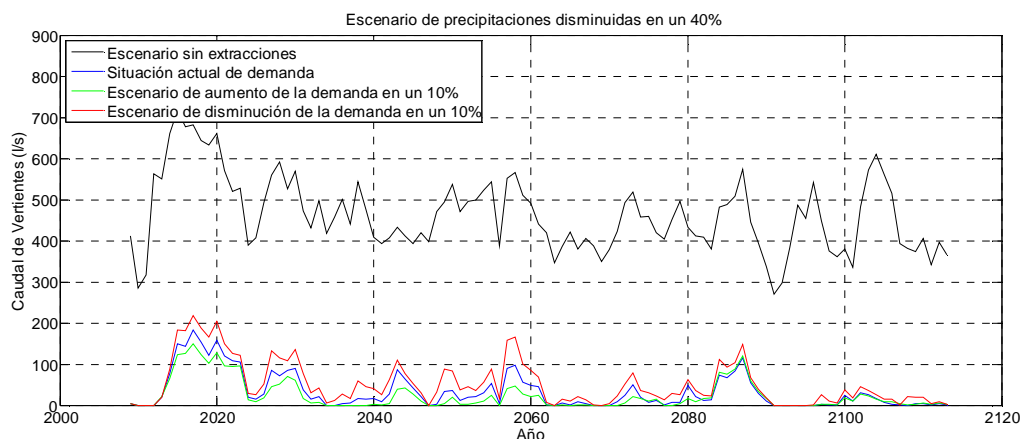


FIGURA 26: COMPARACIÓN DE CAUDAL DE VERTIENTES PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA, LOS VALORES REPRESENTAN EL CAUDAL PROMEDIO QUE AFLORA EN VERTIENTES.

Como efecto de que los pozos se vayan desconectando a tal velocidad al aumentar la demanda potencial, el bombeo real de este escenario termina siendo muy cercano al bombeo del escenario sin modificación de la demanda, por lo que los caudales de las vertientes terminan siendo muy similares.

Lo anterior también ocurre para los drenes de la parte baja del modelo como se observa en la Figura 27. Al aumentar los caudales de extracción, el caudal que aflora por estos es significativamente menor, sin embargo a diferencia de las vertientes, la diferencia entre los caudales simulados para los distintos escenarios se mantiene y aumenta a lo largo del tiempo, indicando que los pozos de extracción de la zona más baja del acuífero se demoran más en quedar secos y apagarse. Para entender mejor esto hay que analizar el caso opuesto. Si los pozos de extracción del sector bajo del modelo se fuesen apagando, la captura en este sector sería menor. Al tener una menor captura las salidas circundantes a dichos pozos se verían aumentadas, reduciendo la diferencia entre escenarios de demanda de mayor extracción con aquellos en donde las salidas son mayores producto de una menor extracción.

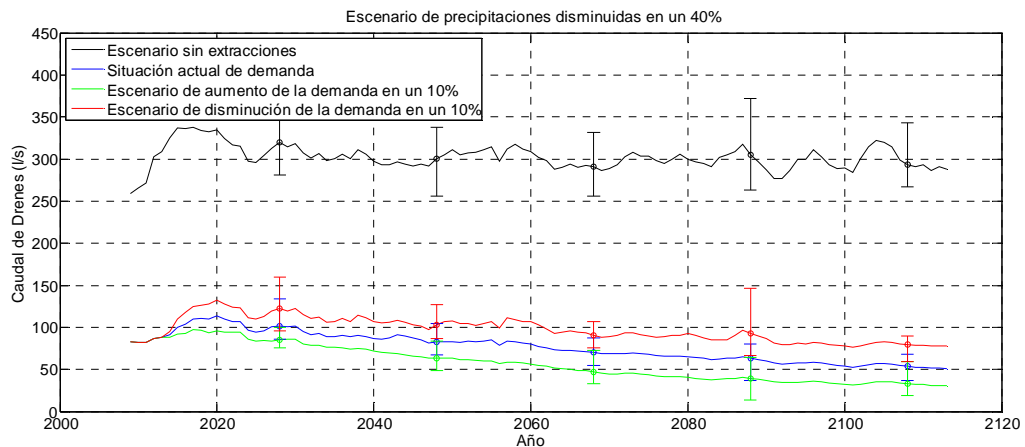


FIGURA 27: COMPARACIÓN DE CAUDAL DE DRENES PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA, LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS DE LOS DRENES MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

Por otro lado en el relleno sedimentario se observa una reducción del almacenamiento de un 23% en un escenario de aumento de la demanda de un 10% y reducción de las precipitaciones en un 40%, igualmente concentrado en estos dos sectores, lo que se traduce en que el almacenamiento se reduce hasta 20 [m³/m²]. Esto significa que por aumentar las extracciones en un 10% en el mismo escenario de precipitaciones reducidas, se duplico el efecto de reducción local de almacenamiento, es decir hay la mitad del agua en el sector afectado de lo que habría si solo se enfrentara un escenario de sequía.

Finalmente, cabe destacar que para todos los escenarios en donde las extracciones han sido aumentadas, se genera una inversión del flujo en la condición de borde de salida aguas abajo, en otras palabras, las salidas de este sector que terminan cambiando de signo para compensar las extracciones. Sin embargo, una reducción de las extracciones permite que el flujo continúe siendo de salida inclusive en los escenarios con un 40% menos de precipitaciones, tal y como se puede observar en la Figura 28.

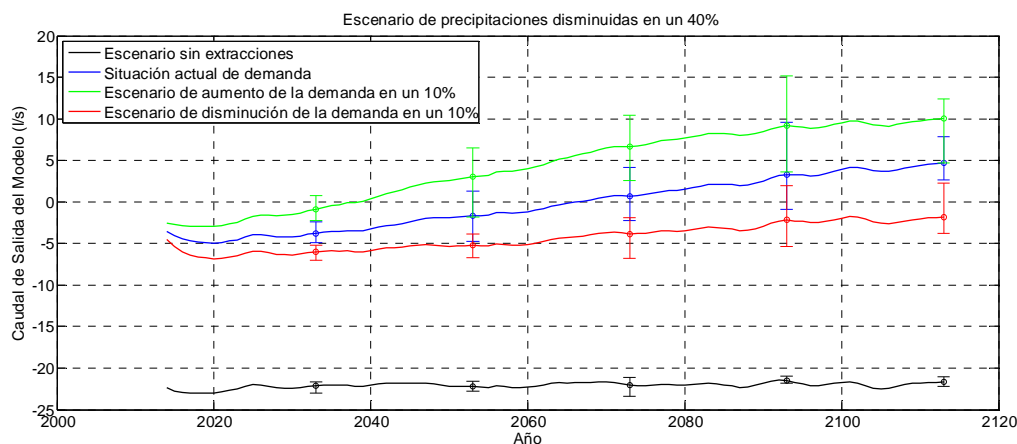


FIGURA 28: COMPARACIÓN DECONDICIÓN DE BORDE PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA, LOS VALORES NEGATIVOS REPRESENTAN CAUDALES DE SALIDA AL ACUÍFERO MIENTRAS QUE LOS POSITIVOS SON CAUDALES DE ENTRADA. LÍNEAS CONTINUAS REPRESENTAN SALIDAS PROMEDIADAS MIENTRAS QUE LINEAS VERTICALES REPRESENTAN ERROR EN LA MUESTRA.

4.7. Sustentabilidad del acuífero

Esta sección busca comparar los efectos que son producto de las extracciones, con la respuesta del acuífero en su estado natural, es decir, sin extracciones artificiales. Teniendo en cuenta la relación propuesta por Theis, las variaciones en la recarga deben influir directamente sobre las distintas salidas del modelo. Adicionalmente este análisis permite identificar niveles base de operación de los pozos para comparar con el efecto que tienen las extracciones sobre estos.

La Tabla 4 muestra un resumen de los resultados del último año de simulación. Los valores que se presentan corresponden al volumen anual aportado por cada variable, expresado como un caudal promedio para facilitar la comparación entre las distintas variables del sistema. Se decidió presentar el último periodo en lugar del promedio de los datos pues esta última opción no permite observar el efecto acumulado sobre el almacenamiento, el cual repercute sobre el caudal de extracción de los pozos y la salida por la condición de borde constante. En esta tabla se puede apreciar algunos detalles con mayor facilidad, como por ejemplo que el caudal de extracción de los pozos se ve levemente afectado a pesar de ser objeto de recargas pequeñas, esto se explica nuevamente debido a que como las extracciones están fijas, la captura sustrae agua de las salidas y el almacenamiento del modelo.

TABLA 4: RESUMEN DE RESULTADOS PARA SIMULACIONES DE ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL. VALORES EN [L/S]. ÚLTIMA COLUMNA REPRESENTA LA DIFERENCIA ENTRE LA RECARGA Y LA SUMA DE LOS CAUDALES DE LAS OTRAS VARIABLES.

	Serie	Recarga	Drenes	Vertientes	Pozos	Salida	Almacenamiento	Diferencia
Extracciones actuales	Serie 1	1502	158	500	740	7	98	0.1
	Serie 2	1458	154	450	740	6	108	0.3
	Serie 3	2099	177	863	740	6	313	0.7
	Serie 4	586	83	0	740	3	-238	-0.8
	Serie 5	988	130	160	740	6	-48	0.9
Demanda aumentada un 10%	Serie 1	1502	84	405	809	0	205	0
	Serie 2	1458	97	377	809	3	172	0.8
	Serie 3	2099	86	765	793	0	456	0.7
	Serie 4	586	70	0	802	-1	-283	-1
	Serie 5	988	91	113	802	3	-21	0.2
Demanda disminuida un 10%	Serie 1	1502	190	564	666	9	74	0
	Serie 2	1458	177	510	666	8	98	0
	Serie 3	2099	210	936	666	8	279	0.1
	Serie 4	586	93	0	666	5	-177	-0.3
	Serie 5	988	153	212	666	8	-52	1.6
Sin Extracciones	Serie 1	1502	397	1027	0	25	54	0
	Serie 2	1458	380	977	0	24	76	0.1
	Serie 3	2099	425	1428	0	24	222	-0.2
	Serie 4	586	280	320	0	22	-35	0.1
	Serie 5	988	347	658	0	24	-40	-0.3

Por otro lado, se observan tasas de almacenamiento de mayor magnitud para escenarios en donde la demanda aumenta en un 10%. Esto no significa directamente que al aumentar la demanda aumente el almacenamiento, sino que la respuesta dinámica de la capacidad del suelo para almacenar volúmenes de agua aumenta. En los escenarios en donde la demanda es menor, los niveles piezométricos son más altos, por lo que el volumen para almacenamiento se ve reducido. Es por esto que para mismas series de recarga y distintos escenarios de demanda, un escenario de mayor demanda otorga un mayor volumen disponible para almacenar y por ende se observan tasas de almacenamiento de mayor magnitud, mientras que las tasas de las salidas se ven reducidas en comparación a otros escenarios de demanda.

Otro punto interesante de observar es como a pesar de existir años con recarga claramente inferior a las extracciones, estas pueden ser sustentadas a partir de la captura de parte del flujo de las distintas salidas. Esto confirma lo que se ha discutido varias veces a lo largo de este trabajo, en relación a

que la tasa de extracción sustentable queda determinada por la capacidad de disminuir los caudales de descarga del sistema.

En los escenarios de precipitaciones reducidas se observa que debido a que la recarga es menor en promedio, el efecto de largo plazo sobre el volumen de almacenamiento es mayor, por lo que en series donde la recarga es similar, los valores de los caudales de los pozos de extracción son menores que los de un escenario de misma demanda pero con un escenario de precipitaciones actual. Para observar las tablas comparativas para los escenarios con reducción de las precipitaciones, dirigirse al Anexo H.

Adicionalmente se quiso observar el comportamiento de los pozos de observación para los escenarios sin extracciones. En la Figura 29 se puede observar que los niveles se vuelven más superficiales, indicando de esta forma que al no haber extracciones las variaciones en el almacenamiento se deben únicamente a la varianza meteorológica representada en la serie de precipitaciones.

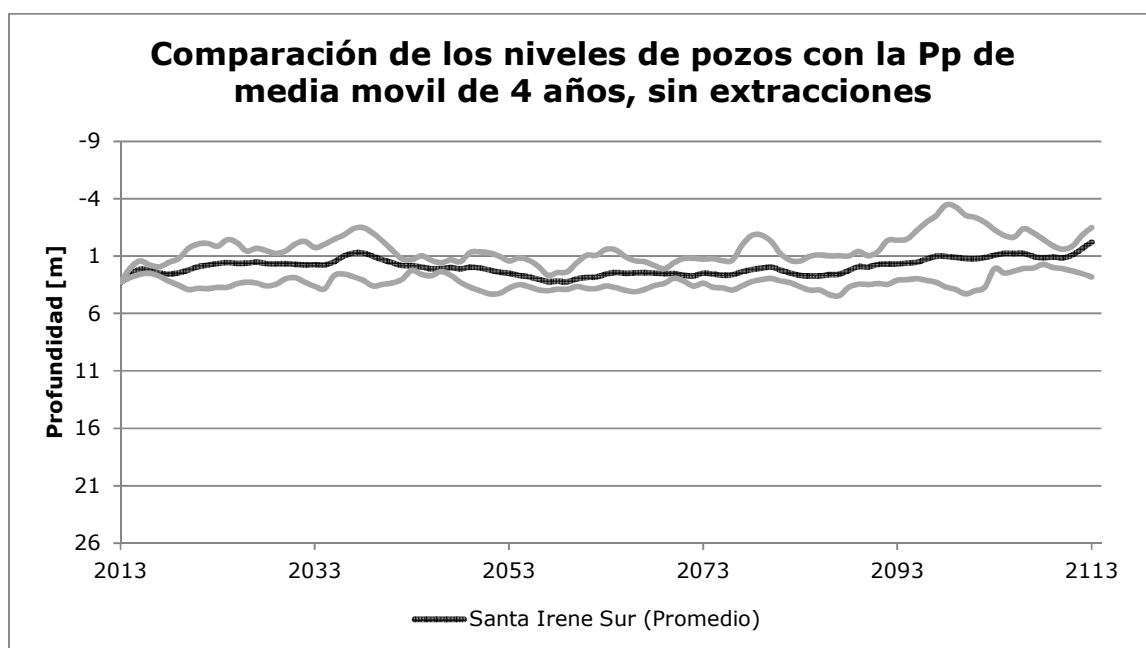


FIGURA 29: NIVELES DEL POZO SANTA IRENE SUR CALCULADOS POR MODELO PARA ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL SIN EXTRACCIONES. LINEA CONTINUA NEGRA REPRESENTA NIVEL PROMEDIO DEL MODELO. LINEAS GRISES REPRESENTAN MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

En la figura Figura 30, la cual muestra los niveles para el pozo Las Riveras de Madrid, se observa que la respuesta de dichos niveles es similar al pozo Santa Irene Sur, sin embargo al ser un pozo muy cercano a las vertientes los

niveles de este se mantienen cercanos a la superficie de forma natural, no presentando una diferencia sustancial con respecto a un escenario de extracciones normales. Sin embargo para escenarios con reducción en las precipitaciones, en ambos pozos puede observarse un descenso de los niveles para los últimos años de simulación, que es cuando la disminución alcanza su mayor magnitud, la cual no supera los 5 [m] por debajo del nivel inicial en el escenario climático con precipitaciones reducidas en un 40%, a diferencia de escenarios con extracciones en donde el descenso puede ser de 15 [m] en un escenario climático similar al actual. Estos escenarios con precipitaciones reducidas pueden ser observados en el ANEXO G.

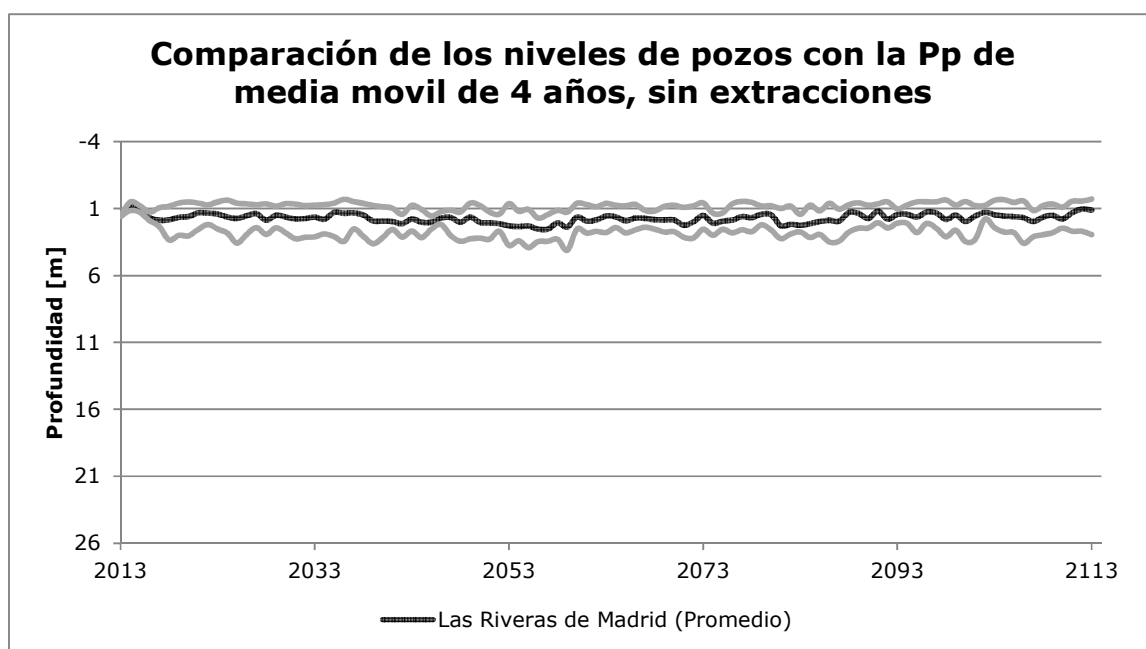


FIGURA 30: NIVELES DEL POZO LAS RIVERAS DE MADRID CALCULADOS POR MODELO PARA ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL SIN EXTRACCIONES. LINEA CONTINUA NEGRA REPRESENTA NIVEL PROMEDIO DEL MODELO. LINEAS GRISES REPRESENTAN MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

Si se observa también los niveles del pozo Las Animas en la Figura 31 se puede observar una estabilidad alrededor de los 15 [m] de profundidad, nivel alcanzado como equilibrio de largo plazo para el escenario de precipitaciones base o equivalente al actual. Este pozo presenta una menor diferencia entre sus niveles máximos y mínimos, sugiriendo un mayor volumen de almacenamiento en esta zona que permite una mayor estabilidad de los niveles frente a cambios menores en la recarga.

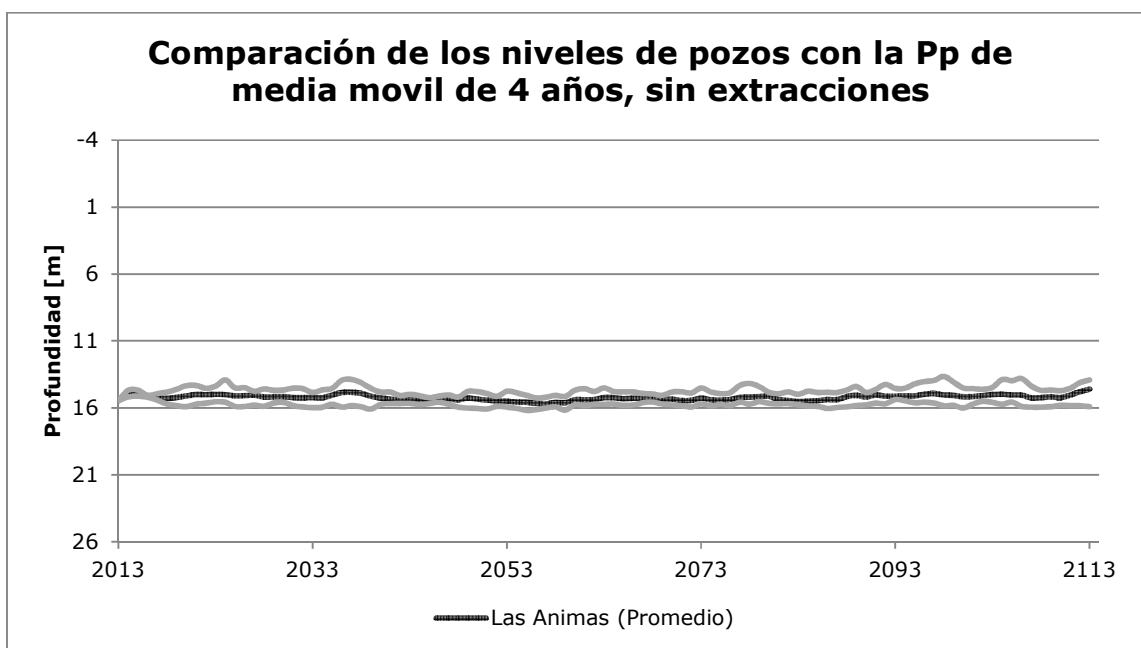


FIGURA 31: NIVELES DEL POZO LAS ANIMAS CALCULADOS POR MODELO PARA ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL SIN EXTRACCIONES. LINEA CONTINUA NEGRA REPRESENTA NIVEL PROMEDIO DEL MODELO. LINEAS GRISES REPRESENTAN MÁXIMOS Y MÍNIMOS.

Para los 3 pozos se observan variaciones de los niveles de igual magnitud, así como un equilibrio entre recarga y descargas de largo plazo (Bredehoeft, 2014), propios de un sistema no alterado. No obstante, según lo observado en los gráficos presentes en el ANEXO G, el equilibrio del acuífero se ve alterado con el efecto del cambio climático, pues para compensar la disminución en la recarga, la variación en el almacenamiento debe suministrar parte de la diferencia entre entrada y salidas del sistema.

Finalmente, al comparar los niveles sin extracción con aquellos con extracción, se pueden reportar diferencias de hasta 35 [m] en el pozo Santa Irene Sur y de hasta 30 [m] en el pozo Las Animas, para un escenario climático similar al actual. Esto refleja el efecto que tiene la alta concentración de los pozos de extracciones sobre el almacenamiento del relleno sedimentario.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1. Dinámica del Sistema Acuífero

El análisis realizado consideró un total de tres escenarios climáticos diferentes: escenario climático actual, escenario climático con precipitaciones reducidas en un 20% y escenario climático con precipitaciones reducidas en un 40%; y cuatro escenarios de demanda: situación actual de demanda, aumento de la demanda en un 10%, reducción de la demanda en un 10% y sin extracciones, que al combinarlos generan un total de doce escenarios diferentes. Los cuales, tras un análisis de la respuesta del sistema acuífero en las secciones 4.2, 4.3, 4.4 y 4.6, revelaron que los efectos de mayor magnitud sobre el almacenamiento y las salidas del modelo se ven asociados a la reducción de las precipitaciones debido al cambio climático.

Se observa que las proyecciones del cambio climático tienen un efecto menor en la demanda potencial de largo plazo incluso bajo condiciones climáticas que reduzcan en un 40% las precipitaciones. Este efecto es producto de que al fijar la captura (las extracciones artificiales) y reducir la recarga, se fuerza al acuífero a reducir las salidas naturales y el almacenamiento. Un efecto de esto es que la cantidad de años en donde las vertientes están secas (caudal de 0 [l/s]) aumenta en promedio a un 27%. Dicho efecto puede tener repercusiones ambientales locales que debiesen ser analizadas en mayor detalle junto con un análisis del costo de oportunidad de capturar las aguas de las vertientes mediante el aumento de las extracciones, contra la posibilidad de capturarlas superficialmente debido a una reducción en las extracciones. Por otro lado, el volumen de almacenamiento en el acuífero supone un problema crítico, puesto que la concentración espacial que sufre debido a la alta densidad de pozos de extracción, se traduce directamente en un descenso significativo de los niveles de los pozos, reduciendo la capacidad de extracción de los regantes por una disminución de la eficiencia de bombeo, debido a una mayor necesidad de energía para extraer los caudales requeridos, o pozos que no son suficientemente profundos.

El aumento de las extracciones aumenta los caudales capturados, las vertientes se secan un 10% más, la tasa a la que se secan las celdas aumenta, genera inversión del flujo de salida del acuífero y acentúa el problema de almacenamiento. Estos efectos confirman que para realizar un manejo sustentable, lo que se debe controlar son las salidas del sistema,

pues son estas las que se ven afectadas en pos de mantener un equilibrio entre la recarga y las extracciones.

Por otro lado la reducción de la demanda en un 10% se traduce en una estabilización de los caudales de las vertientes las cuales no se secan y también permite recuperar volumen de almacenamiento. Sin embargo, los tomadores de decisión se pueden ver enfrentados a una incapacidad de suministrar los derechos totales de los regantes en función de buscar recargar el acuífero. Es por esto que se debe realizar un control adecuado de las extracciones, teniendo en cuenta el almacenamiento disponible y la recarga estimada para el año en cuestión, aumentando las extracciones bajo escenarios en donde el volumen de almacenamiento disponible es elevado y disminuyéndolas en años en que este haya sido disminuido por efecto de escasez de precipitaciones.

Debido a que los niveles descienden considerablemente por efecto de la concentración de los pozos de extracción, las celdas se van secando, por lo que se puede deducir que el acuífero llegará a un equilibrio de las extracciones en el largo plazo, el cual estará dado por el máximo caudal extraíble que la recarga más las salidas puedan sostener, mientras el efecto combinado de los conos de depresión asociado a tales pozos de extracción no siga secando más celdas aledañas, pero como se puede observar en la Figura 25, este equilibrio debe encontrarse por debajo del caudal presente en un escenario de precipitaciones reducidas y aún más abajo si se considera que el modelo estima que los pozos llegan hasta el nivel inferior de la capa, supuesto que no se cumple para la mayoría de estos pozos puesto que en la realidad no son tan profundos, lo que tiene como efecto que a partir de ciertos niveles, los usuarios se vean imposibilitados de extraer agua de sus pozos.

Para poder considerar el uso del acuífero en forma de embalse, este debe tener tiempo para recuperarse entre un periodo de bajas precipitaciones y otro, pero debido a que, incluso en estos periodos, las extracciones se mantienen cuasi constantes y la recarga no es suficiente para cubrir la demanda y tener un excedente para recargar el acuífero, este no tiene oportunidad de recuperarse, imposibilitando de esta forma la dinámica esperada. Este problema podría ser más abordable si tales extracciones fuesen menos sectorizadas. En la Figura 24 pueden observarse algunos sectores del relleno sedimentario que no han sido tan explotados y que podrían suministrar un volumen de almacenamiento extra al cual acceder para capturar agua, sin embargo la ubicación de los pozos obedece a un

interés económico principalmente agrícola, el cual no se satisface en estos sectores. Reposicionar los pozos requiere sobrepasar varios obstáculos. Primero se debe resolver la reubicación del derecho de aprovechamiento de las aguas subterráneas asociadas a dicho pozo. Luego hay que sellar el pozo que se dejará de utilizar para evitar problemas de contaminación de la napa. Posteriormente se debe construir el nuevo pozo en el cual, para abaratar costos, se puede reutilizar el equipo de bombeo si se encuentra en buen estado. Finalmente se debe implementar un sistema de transporte de las aguas extraídas hacia la zona de interés. Este transporte puede ser realizado de manera gravitacional en caso de que el nuevo pozo de extracción se encuentre a una mayor altura que el sector de destino de las aguas, pero si no es el caso puede ser necesario un sistema de impulsión a presión, lo que puede incurrir en gastos adicionales en un equipo de impulsión más cañerías apropiadas.

5.2. Debilidades del modelo

El modelo numérico requiere, entre otros parámetros de entrada, las extracciones y la recarga. Las extracciones pueden ser obtenidas desde la Dirección General de Aguas que guarda registro de los derechos de agua concedidos y realizando un catastro, como el realizado en el trabajo de AC Ingenieros (2010). Por otra parte, la recarga no es un valor conocido. En este trabajo se simplificó el cálculo de esta mediante una correlación entre las precipitaciones y la recarga, una metodología simple y eficiente mientras se pueda conseguir una buena correlación entre los datos. Sin embargo, el modelo numérico originalmente utiliza otro modelo para los flujos superficiales el cual determina las infiltraciones por sector, utilizando hidrogramas unitarios sintéticos (AC Ingenieros, 2010, 27p). Esto significa que para algunos valores extremos de precipitaciones, la correlación no estima los mismos valores de recarga que aquellos calculados por el modelo. Si bien este método es aceptable, un modelo que integre los flujos superficiales y subterráneos sería lo recomendable para evaluar la situación del acuífero y el río en forma acoplada.

Adicionalmente, para simular el flujo regional, el modelo utiliza pozos de inyección a lo largo de los bordes sur y este del modelo los cuales inyectan un caudal promedio histórico, calculado a partir de un modelo regional. Si bien, debido a sus bajos caudales estos tienen una influencia menor sobre el almacenamiento del relleno sedimentario, se recomienda verificar estos valores con mediciones de terreno.

Finalmente, el modelo no posee herramientas que permitan programar un plan de extracciones condicional a variables como los niveles registrados en los pozos. En la realidad los usuarios administran las extracciones que realizan en función de las precipitaciones observadas y los niveles de los pozos. Esto limita las proyecciones que se pueden realizar sobre la demanda pues actualmente, uno debe fijar las extracciones para cada periodo antes de correr el modelo, sin conocer el estado de las distintas variables del acuífero a priori.

5.3. Recomendaciones

Este trabajo tiene muchas aristas que pueden y deberían ser estudiadas con mayor detenimiento. Primero, para una mayor significancia estadística en los resultados se deberían usar el máximo número de series por escenario que sea factible. Como primer trabajo de este estilo la cantidad de series modeladas es suficiente para identificar tendencias y caracterizar la interacción de las distintas variables del acuífero.

Otro factor importante, es la necesidad de determinar la respuesta del acuífero asociada a eventos temporales de menor envergadura. Es posible que la rápida reacción del acuífero a las precipitaciones (cuatro años) permita gestionar el acuífero con dos horizontes temporales de planificación totalmente distintos. Uno en el largo plazo donde el objetivo principal sea la sustentabilidad, considerando el efecto acumulado de las extracciones sobre el almacenamiento en el tiempo, permitiendo identificar ciclos de recarga y uso de este. Y otro a corto plazo, en donde el objetivo principal sea cubrir la demanda inmediata considerando las decisiones tomadas y las precipitaciones registradas de los últimos tres años, de esta forma las precipitaciones proyectadas para el año a planificar se pueden modelar como una banda de confianza con la cual se puedan tomar decisiones más certeras sobre la posible evolución del acuífero a lo largo del año.

Como existen varios sectores de almacenamiento que no son debidamente aprovechados, se podría capturar el agua que llega a estos sectores y transportarla a sectores de mayor interés, si bien es una opción que asume una inversión importante en la construcción del nuevo pozo, el profundizar los pozos para poder capturar el agua debido a los descensos de estos puede llegar a implicar una inversión importante para profundizar, aumento en los costos de operación debido a que el agua debe ser elevada una mayor distancia y el problema de una tasa de descenso de los niveles mucho mayor lo que puede llevar a secar el pozo en menos tiempo.

Con el fin de utilizar el acuífero a modo de embalse, se propone calcular los derechos extraíbles para el año actual como la media móvil de 8 años de las precipitaciones, esto con el fin de incluir en esta al menos dos veces la recarga del acuífero. Al tratarse de una media móvil de ocho años, esta seguirá mejor la tendencia global y reducirá las fluctuaciones de los datos meteorológicos, es así que para tendencias de precipitaciones a la baja, presentará inicialmente valores levemente más altos, capturando agua de las salidas del modelo y permitiendo una transición del uso de los recursos hídricos más fácil de programar. Mientras que para tendencias de precipitaciones a la alza, otorgará valores más bajos inicialmente, permitiendo al acuífero aprovechar estas instancias para recargarse, y en caso de que esta tendencia se extienda, los derechos extraíbles se ajustarán a las nuevas recargas permitiendo mayores caudales de riego, potable e industrial. Cabe destacar que este ejercicio es puramente teórico puesto que para poder hacerlo efectivo se requiere un cambio legislativo y constitucional que otorgue las herramientas necesarias a alguna entidad gubernamental capaz de gestionar la oferta de estos derechos de agua.

Con respecto al modelo, se sugiere comparar las condiciones de borde con mediciones en terreno que verifiquen este flujo regional y los aportes de los cauces adyacentes, pues el caudal que infiltra por dichos cauces y el aporte del río San José, proveniente de la zona alta de la cuenca al este del modelo, ingresan directamente al relleno sedimentario por lo que su aporte puede ser capturado por los pozos de extracción o ingresar al almacenamiento. Mientras que para la condición de nivel constante utilizada en el borde norte del modelo, se debiese analizar la representatividad que tiene bajo escenarios de extracciones intensas, puesto que de ser así, el modelo podría estar representando una conexión entre el acuífero del río San José y el acuífero del río Lluta, indicando un trasvasije de aguas con distintas calidades.

Bibliografía

- AC Ingenieros Consultores LTDA. "Definición de Estrategias de Manejo Sustentable Para El Acuífero de Azapa, XV Región." Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, 2010.
- . "Estimaciones de Demanda de Agua Y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV." Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, 1997.
- Bredehoeft, John. "The Water Budget Myth Revisited: Why Hydrogeologists Model" 40, no. 4 (2002): 340–45.
- Bredehoeft, J., and Alley, W. "Mining Groundwater for Sustained Yield" 44, no. 1 (2014): 33–41.
- Chamorro, A. "Carnaval Andino En La Ciudad de Arica: Performance En La Frontera Norte Chilena." Estudios Atacameños, no. 45 (2013): 41–54. doi:10.4067/S0718-10432013000100004.
- Crosbie, R., Scanlon, B., Mpelasoka, F., Reedy, R., Gates, J., and Zhang, L. "Potential Climate Change Effects on Groundwater Recharge in the High Plains Aquifer, USA" 49 (2013): 1–16.
- El-Kadi, Aly I., Tillery, Suzanne, Whittier, Robert B., Hagedorn, Benjamin, Mair, Alan, Ha, Kyoochul, and Koh, Gi-Won. "Assessing Sustainability of Groundwater Resources on Jeju Island, South Korea, under Climate Change, Drought, and Increased Usage" 22 (2014): 625–42.
- Henriquez, G. "Antecedentes Climáticos XV Región de Arica Y Parinacota." CIREN, 2013.
- Jiménez, G. "Caracterización de La Cuenca Del Río San José En Arica Para La Evaluación a Nivel de Perfil de Un Sistema de Recarga Artificial de Acuíferos." Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2013.
- . "Recopilación Y Análisis de Antecedentes de La Hidrología Superficial Y Subterránea de Las Cuencas Del Río Lluta Y San José En El Norte de Chile," 2014.
- Jyrkama, M., and Sykes, J. "The Impact of Climate Change on Spatially Varying Groundwater Recharge in the Grand River Watershed (Ontario)" 338 (2007): 237–50.
- Kurylyk, B., and MacQuarrie, K. "The Uncertainty Associated with Estimating Future Groundwater Recharge: A Summary of Recent Research and an Example from a Small Unconfined Aquifer in a Northern Humid-Continental Climate" 492 (2013): 244–53.

- Minvielle, M., and Garreaud, R. "Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano" 24 (2011): 4577–83. doi:10.1175/JCLI-D-11-00051.1.
- Pérez, Felix. "Operación Del Modelo de Simulación de Recursos Hídricos Del Valle de Azapa." Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, República de Chile, 1990.
- Ruelland, D., Brisset, N., Jourde, H., and Oyarzun, R. "Modelling the Impact of Climatic Variability on Groundwater and Surface Flows from a Mountainous Catchment in the Chilean Andes" 346 (2011): 171–79.
- Scanlon, B., Keese, K., Flint, A., Flint, L., Gaye, C., Edmunds, W., and Simmers, I. "Global Synthesis of Groundwater Recharge in Semiarid and Arid Regions" 20 (2006): 3335–70.
- Theis CV. "The Source of Water Derived from Wells," 1940, 277–80.
- Yang, Zhi, Zhou, Yangxiao, Wenninger, Jochen, and Uhlenbrook, Stefan. "A Multi-Method Approach to Quantify Groundwater/surface Water-Interactions in the Semi-Arid Hailiutu River Basin, Northwest China" 22 (2014): 527–41.

Anexos

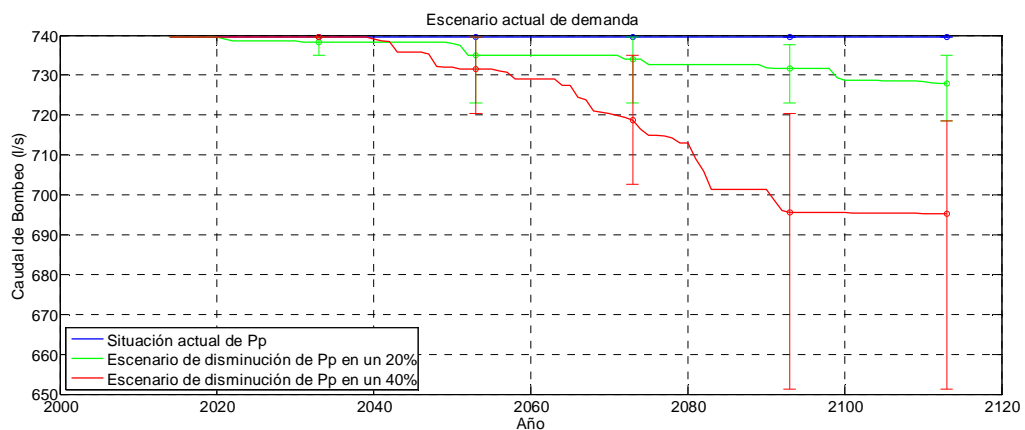
Anexo A. Caudales de extracciones

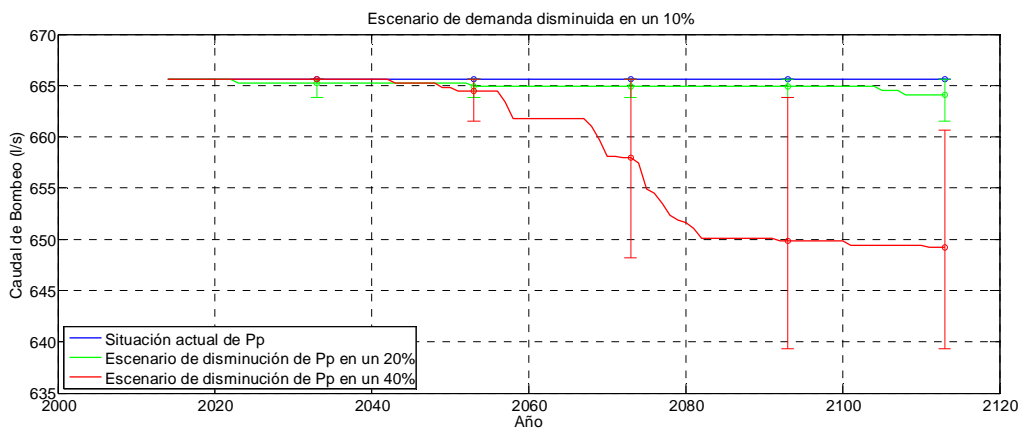
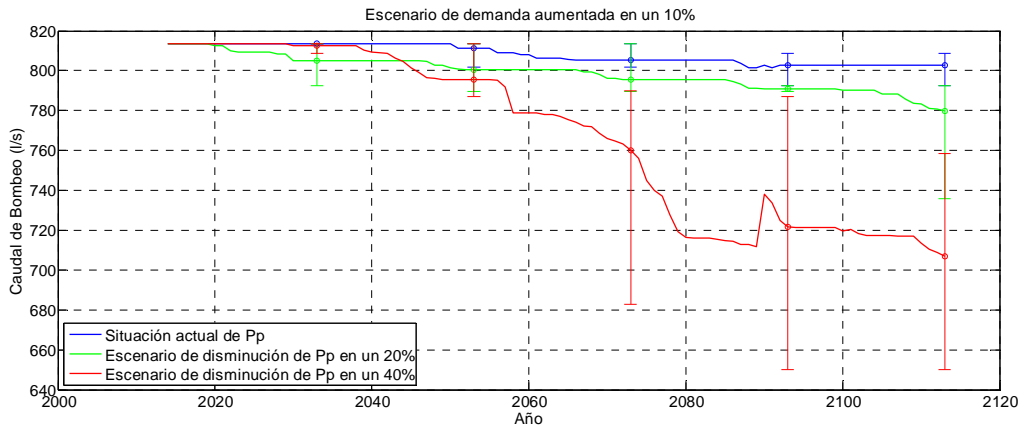
A continuación se presentan los caudales de extracciones asociados a los distintos escenarios. La línea continua representa el caudal promedio para cada escenario climático, calculado por el modelo, mientras que las líneas verticales representan el error de este promedio. Estos caudales representan el caudal real extraído por los pozos. Esto ocurre debido a que la alta concentración de pozos aumenta la intensidad de drenado del almacenamiento, reduciendo los niveles de los pozos hasta que estos se secan y no son capaces de extraer más agua.

El aspecto escalonado del descenso se debe a que la reducción del caudal extraído por el modelo ocurre en valores discretos y no continuos, es decir que los pozos de extracción están prendidos o apagados, pero no en un punto intermedio de extracciones.

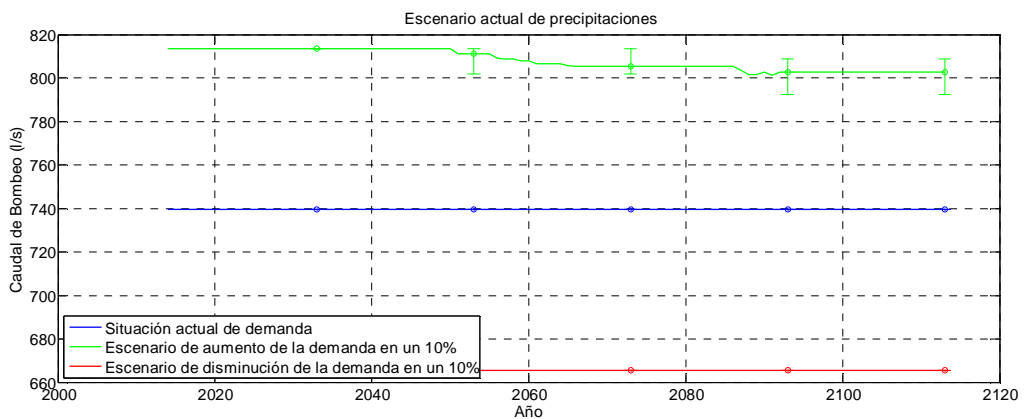
Finalmente, el modelo posee la opción de re-humedecer las celdas para simular el efecto de recuperación de los niveles, sin embargo esto no ocurre en todos los escenarios, pues en algunos casos las extracciones de los pozos vecinos capturan la recarga asociada al pozo afectado.

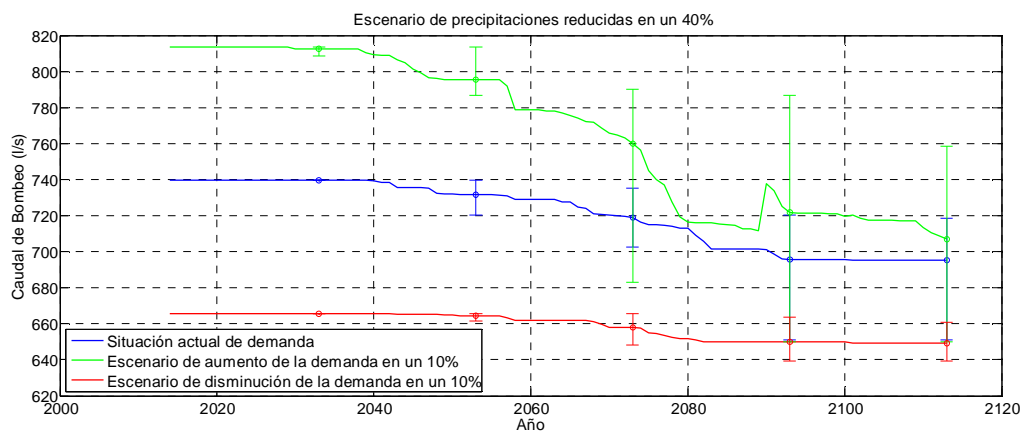
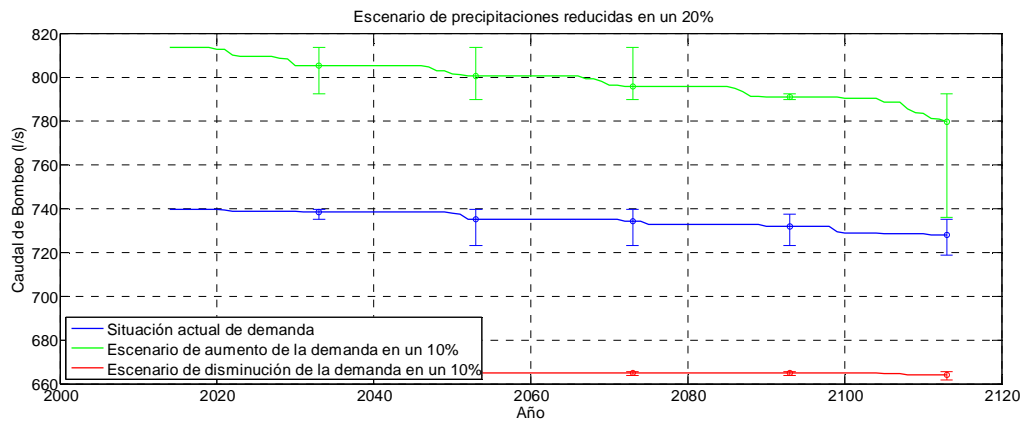
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda





2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones



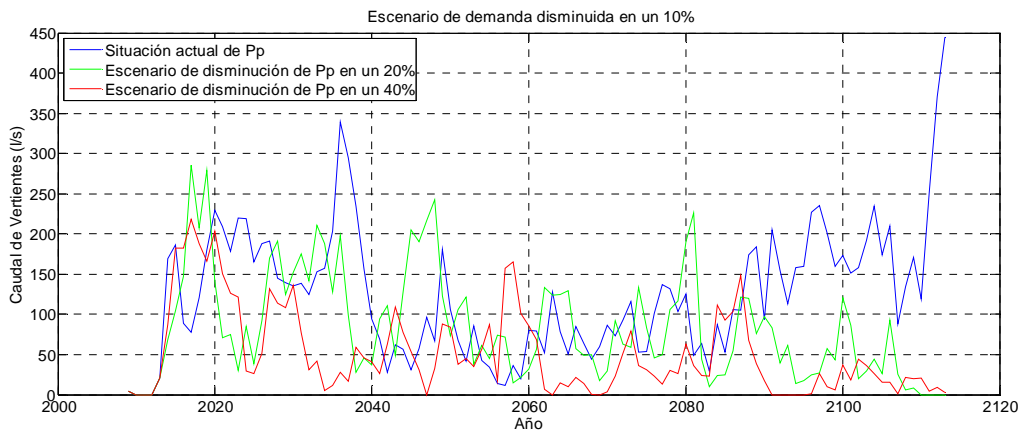
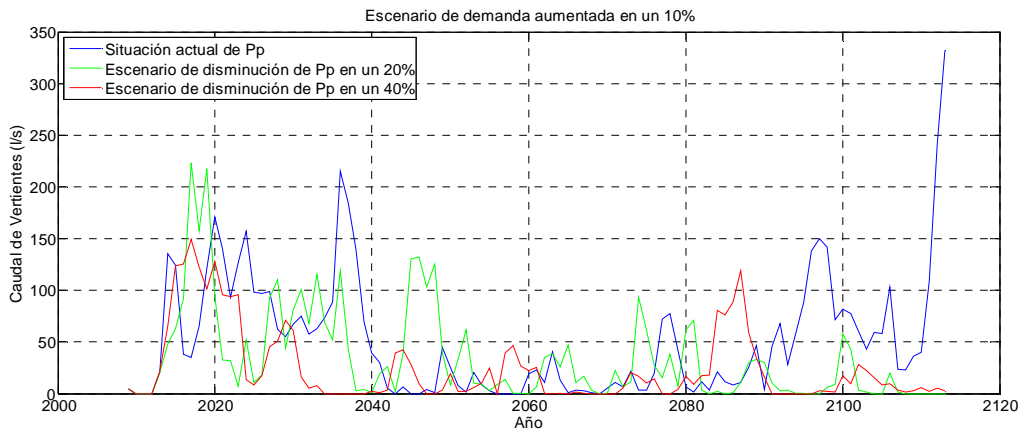
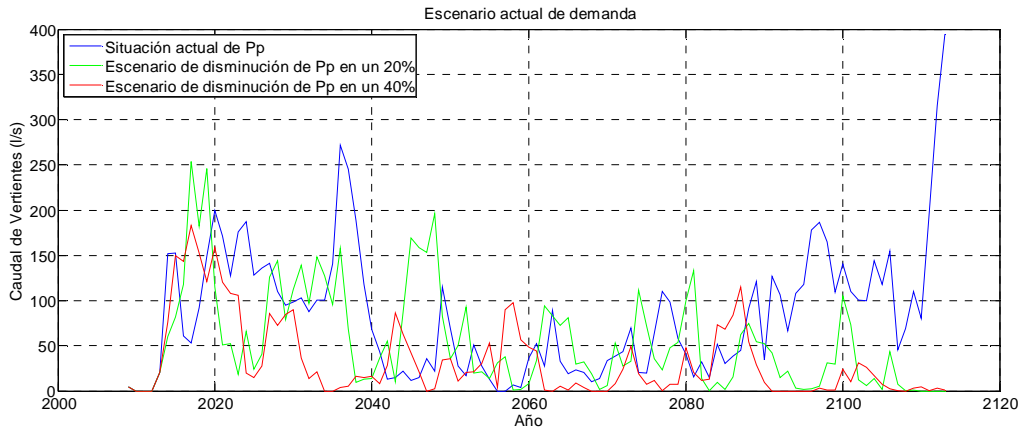


Anexo B. Caudales de vertientes

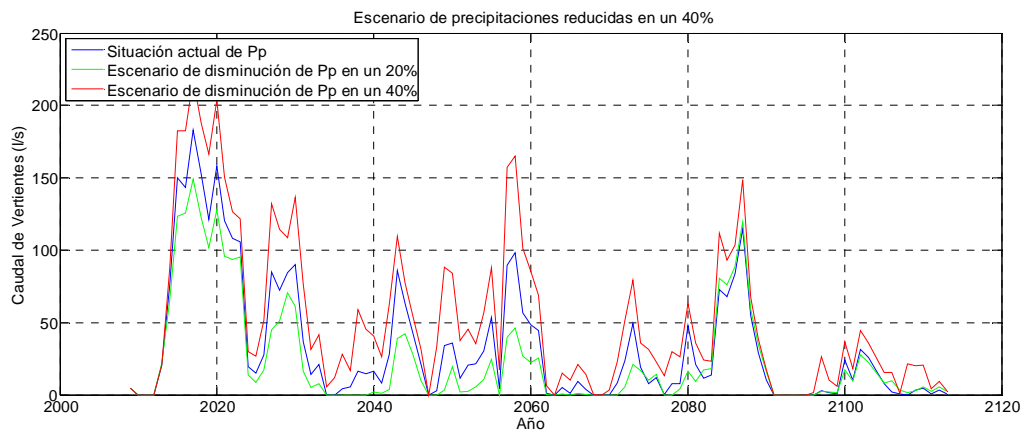
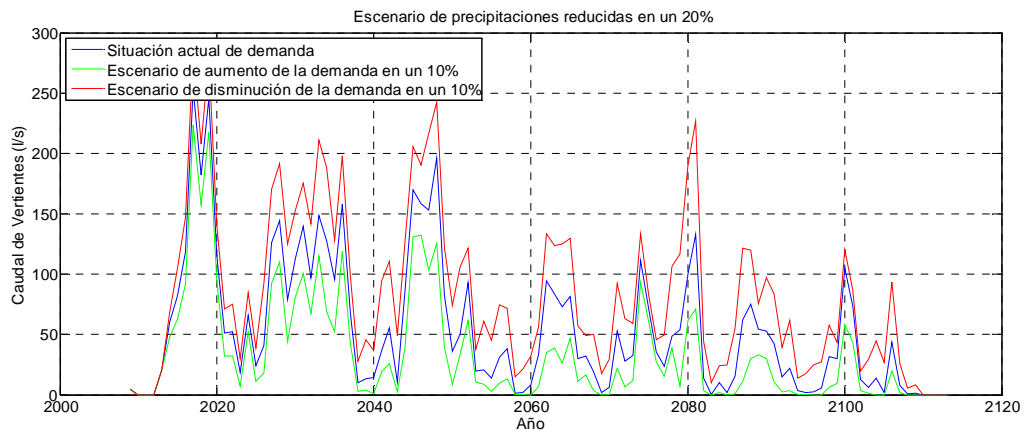
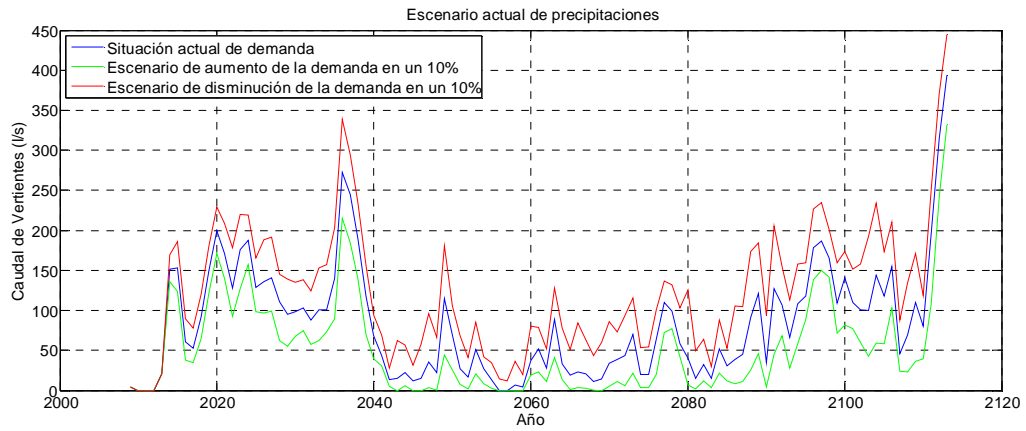
Caudales promedio de vertientes de cinco series para cada escenario. Valores iguales a 0 [l/s] representan años en los que la vertiente se seca. Los caudales presentados en estos gráficos representan el caudal promedio que aflora en las vertientes para cada periodo. A lo largo de este trabajo se observará que la línea que representa al escenario climático similar al actual toma valores altos para los últimos periodos en comparación con el resto, esto se debe a la presencia de precipitaciones extremas ocurridas en una de las series las que elevan el promedio para ese escenario, sin embargo, estos valores de recarga no son anormales, simplemente tienen un alto periodo de retorno.

Se observa que una variación del 10% sobre la demanda, se traduce a casi 50 [l/s] de variación en las vertientes, lo que se traduce a casi un 70% del incremento del caudal de extracciones, indicando que es la principal fuente de captura cuando existen variaciones en las extracciones. Sin embargo para distintos escenarios de cambio climático, puede existir una diferencia de hasta 100 [l/s].

1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda



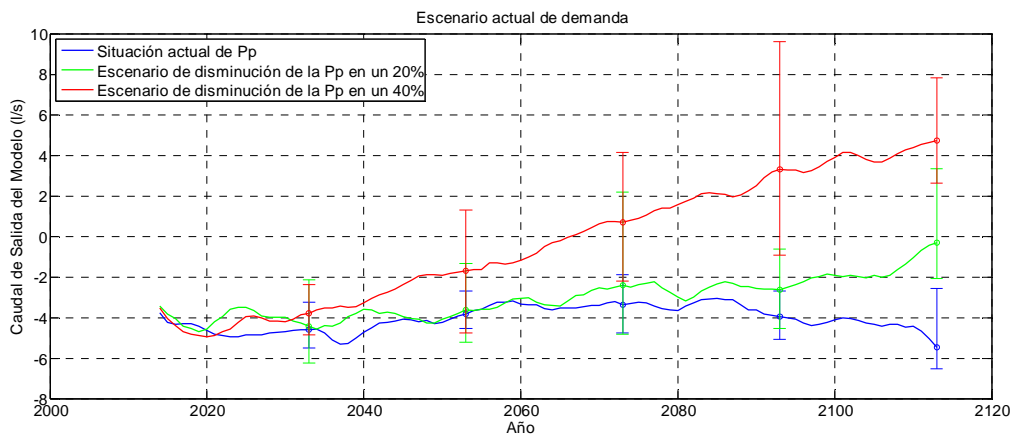
2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones

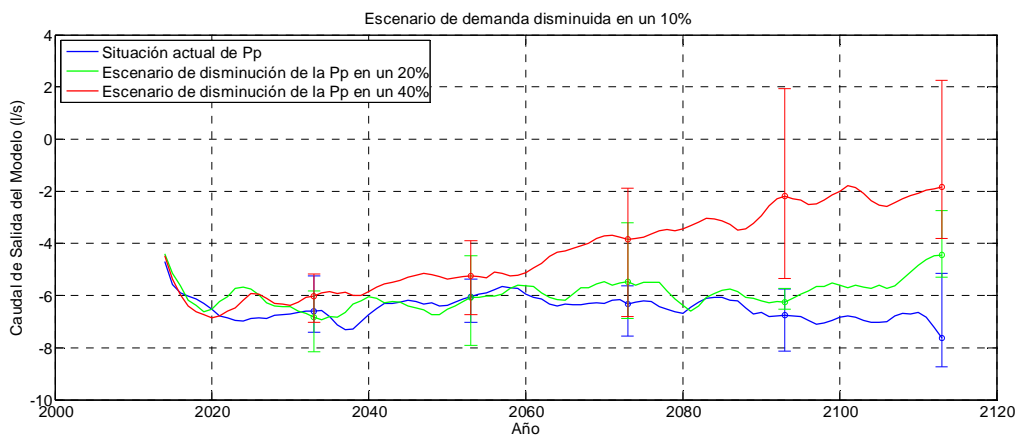
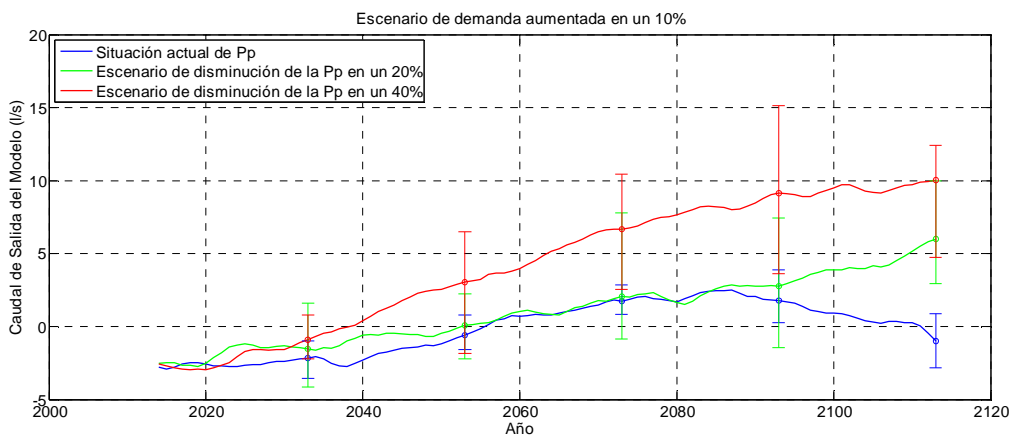


Anexo C. Caudales de salida del modelo

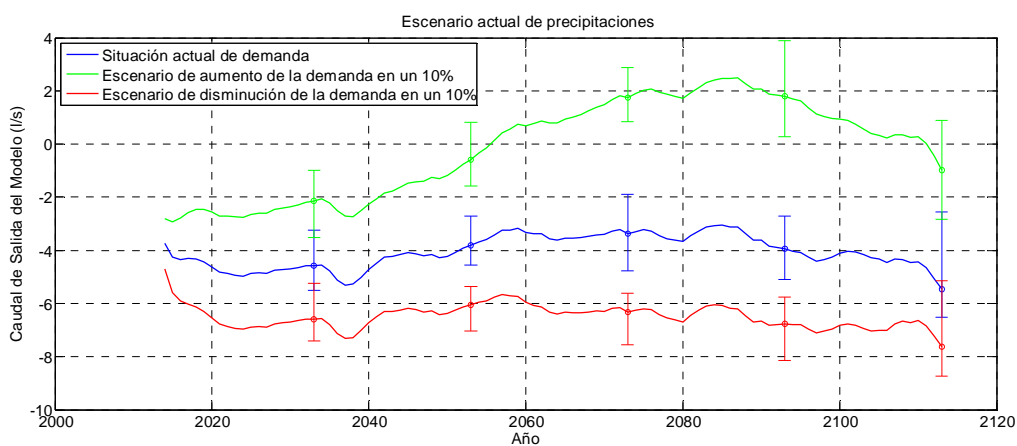
Las líneas continuas representan los caudales promedio para cada escenario, mientras que las líneas verticales representan el error asociado a este promedio. Valores negativos representan caudales que salen del acuífero a través de la condición de borde constante aguas debajo de la cuenca, mientras que valores positivos representan caudales que entran al acuífero a través de la condición de borde constante. Esta situación ocurre debido a que los niveles del acuífero en el sector bajo, descienden por debajo de la condición de borde constante, induciendo un flujo desde la condición de borde hacia el acuífero. Como los niveles del acuífero son menores que los de la condición de borde constante, a medida que los pozos de extracción aumentan su radio de influencia, aumenta el gradiente entre estos y la condición de borde, aumentando el caudal capturado. Sin embargo esta condición de borde puede no ser representativa en estos casos, indicando que posiblemente el acuífero del río San José puede estar capturando agua del acuífero del río Lluta.

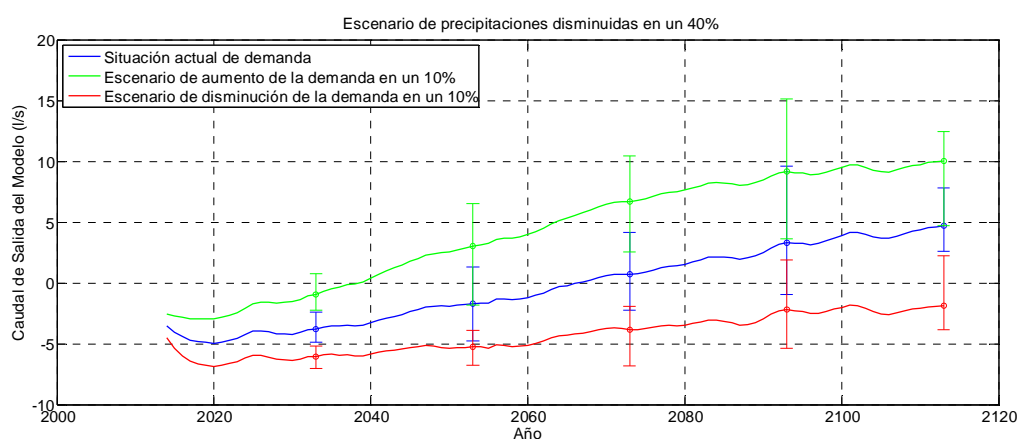
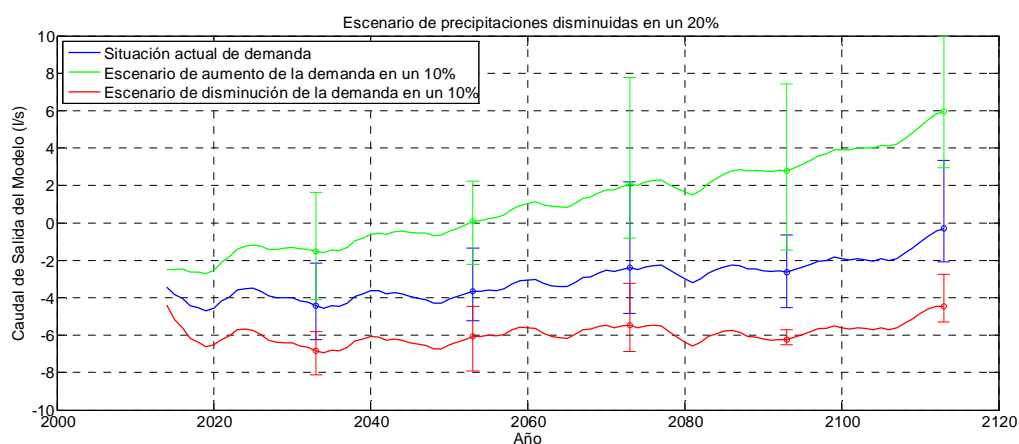
1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda





2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones



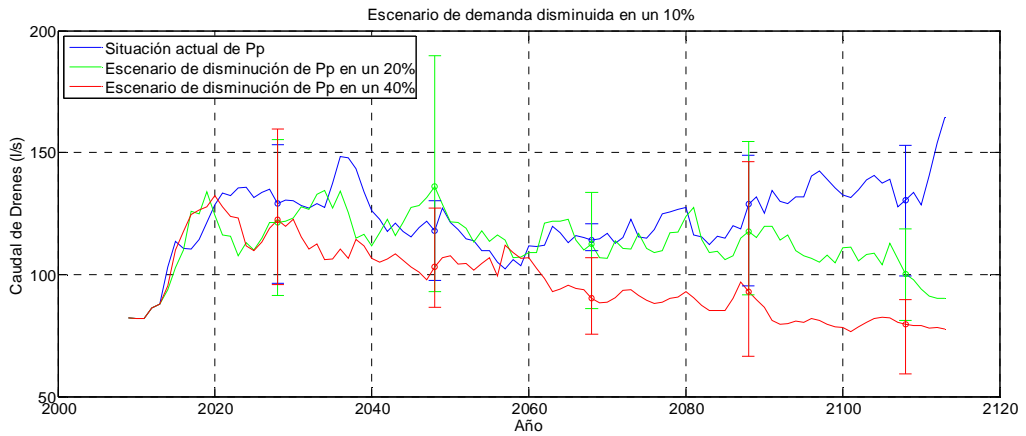
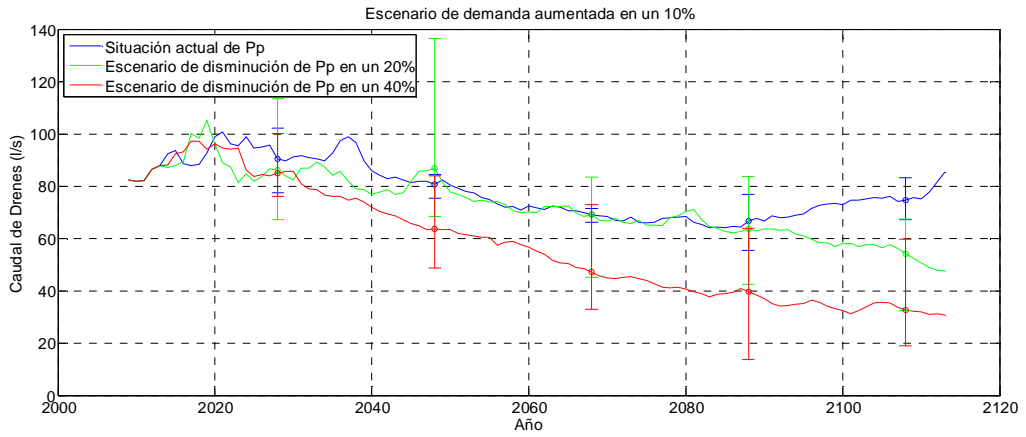
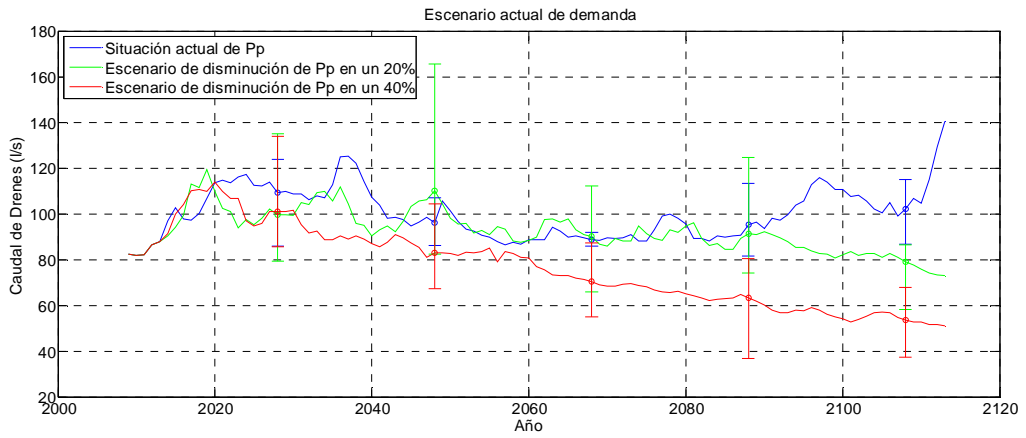


Anexo D. Caudales de drenes del modelo

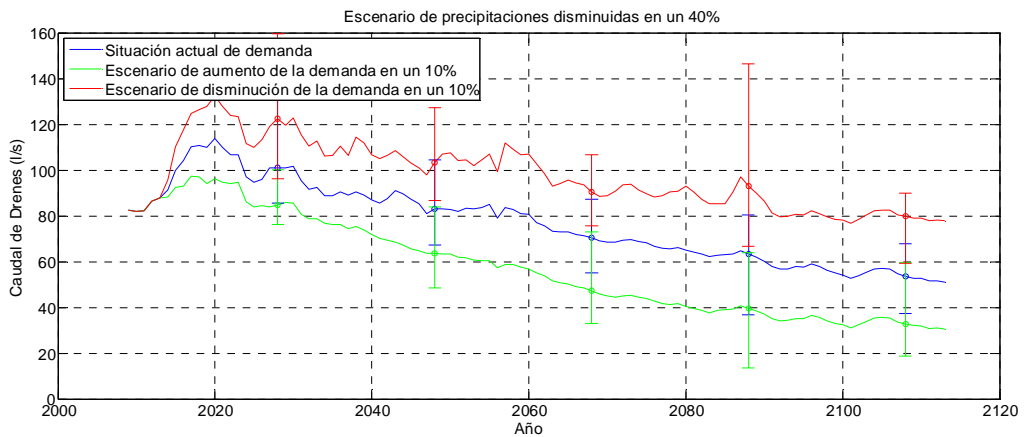
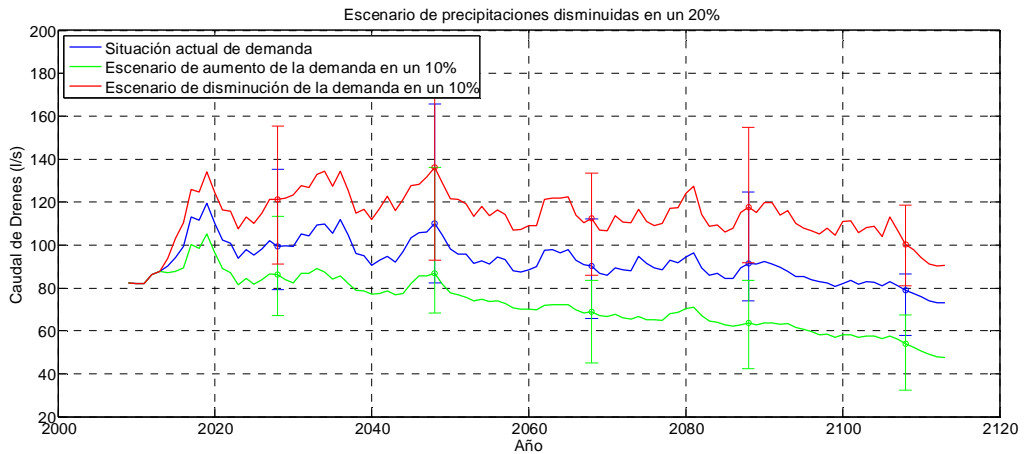
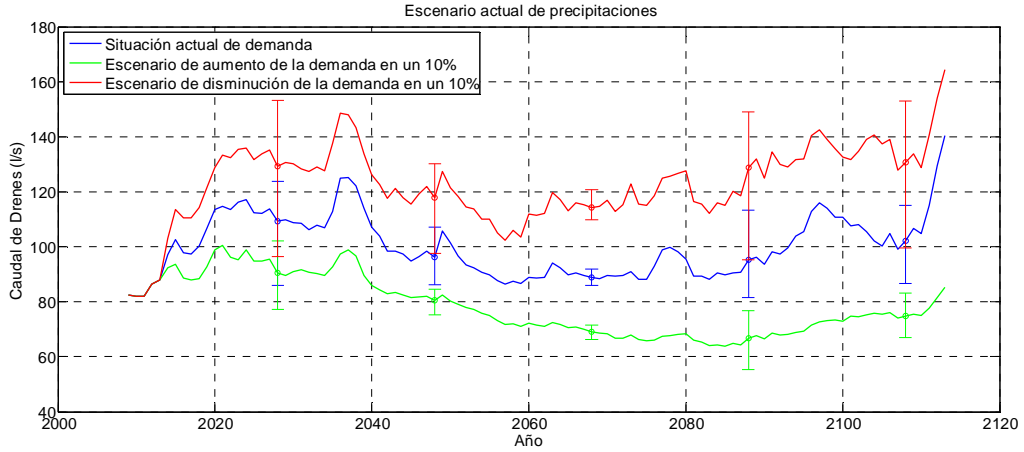
Las líneas continuas representan caudales promedio de afloramiento a través de los drenes de la zona aguas debajo de la cuenca. Las líneas verticales representan el error asociado a dicho promedio. Si bien los caudales de los drenes se ven afectados por el cambio climático y las extracciones, el efecto de estos no tiene la misma magnitud que sobre las vertientes, sugiriendo que la influencia de los pozos circundantes a estos drenes es menor.

Por otro lado, en este caso también se puede apreciar que el efecto del cambio climático es casi el doble que el de las extracciones, reduciendo los caudales que afloran por los drenes en casi 40 [l/s] contra casi 20 [l/s] producto de las extracciones.

1. Comparación de los escenarios de precipitaciones para una misma demanda



2. Comparación de los escenarios de demanda para un mismo escenario de precipitaciones



Anexo E. Gráficos comparativos entre niveles de pozos y precipitaciones

En este anexo se presentan los niveles promedio de los pozos Las Riveras de Madrid, Santa Irene Sur, Las Animas, Las Vargas y Algodonal, representados por la línea continua negra. Los valores mínimos y máximos son representados por la línea continua gris. Finalmente, se comparó los valores obtenidos por el modelo con las observaciones de los pozos en una línea discontinua gris. Esta comparación se utilizó para verificar la validez del modelo, la cual es aceptada por su buen ajuste en general.

Tanto el escenario climático como el de demanda fueron seleccionados para ser similares al actual.

Los pozos seleccionados se ubican en los lugares indicados en la Figura 32.

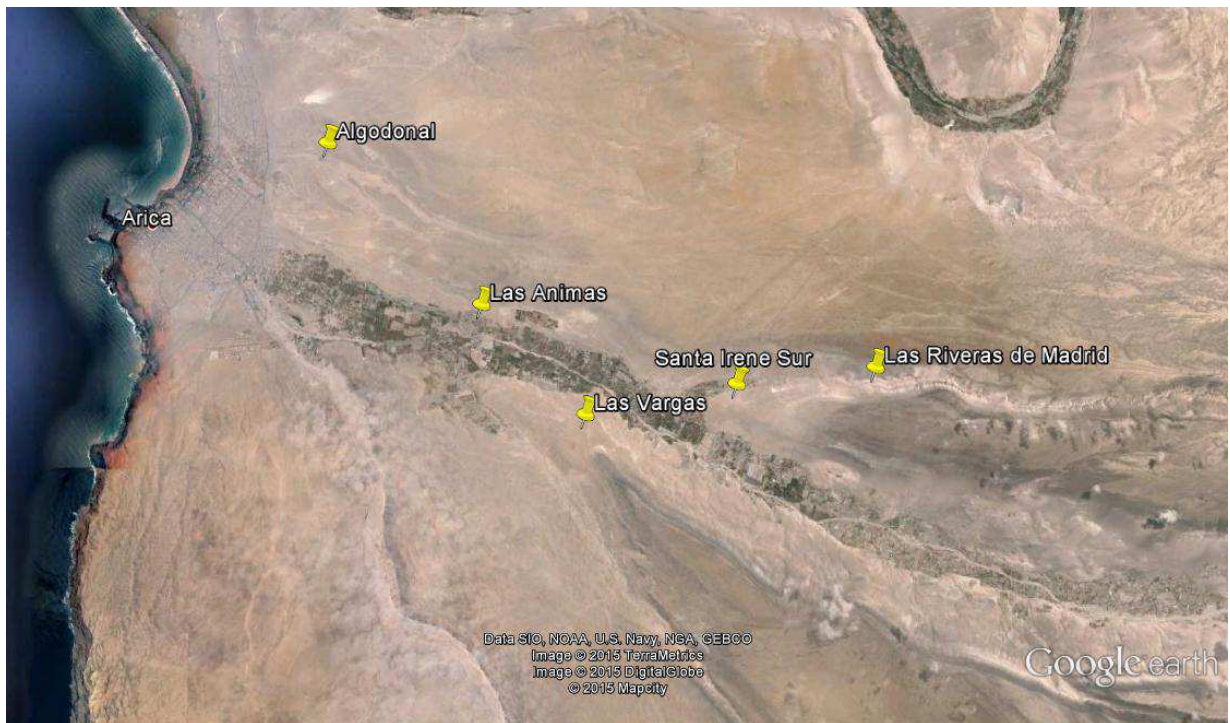
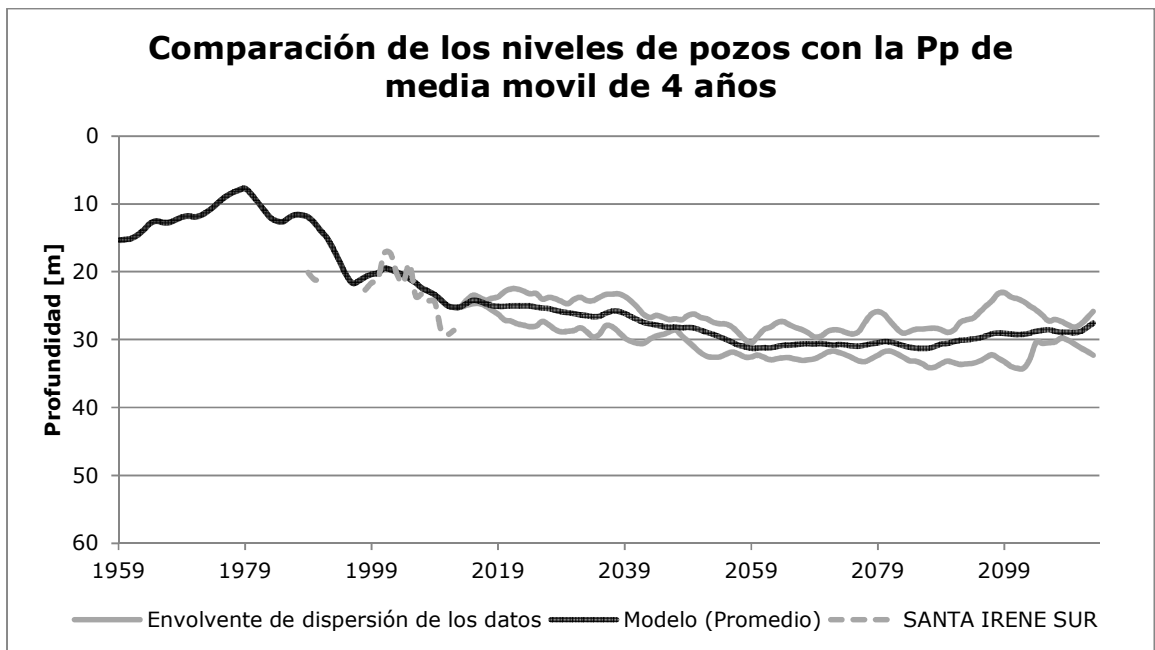
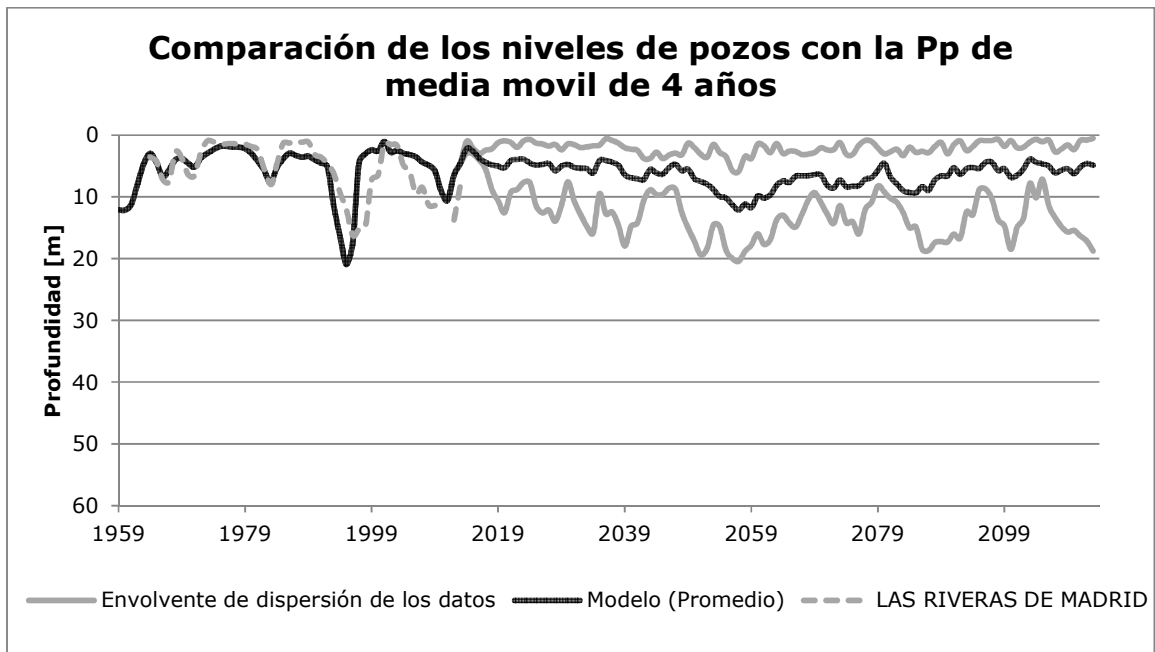
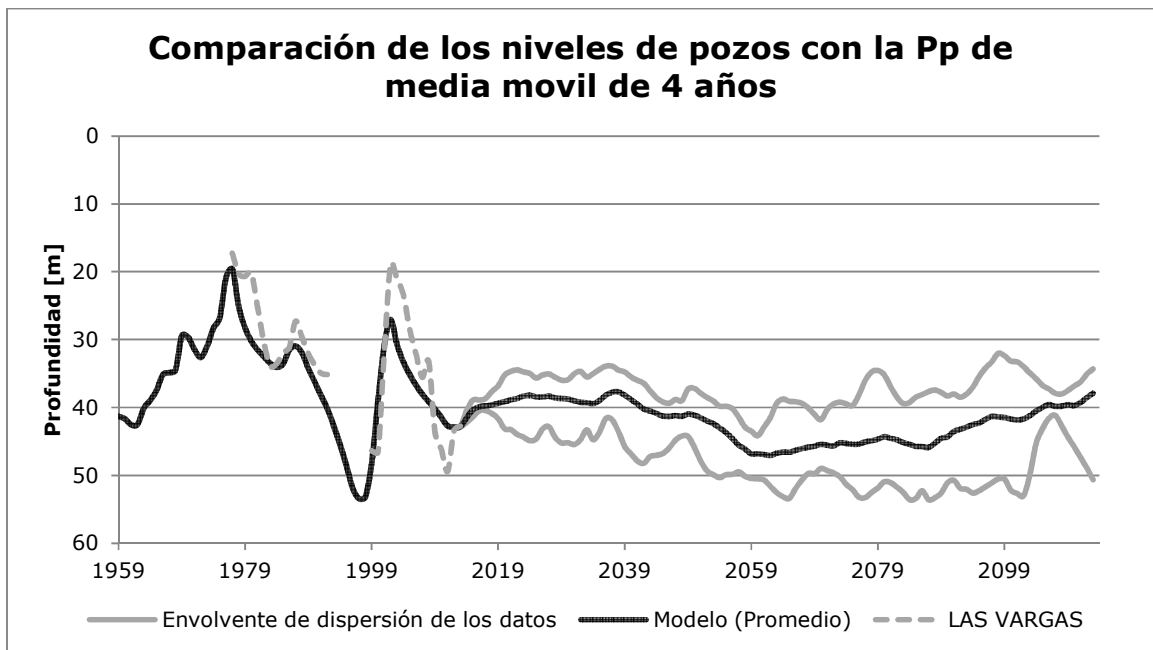
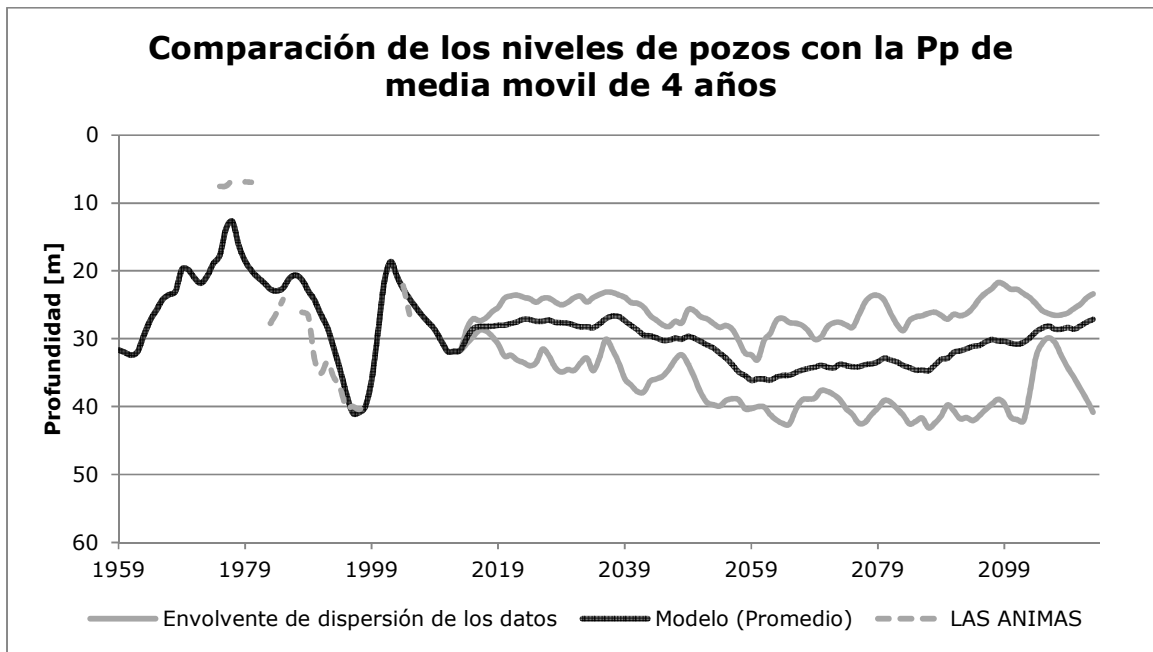
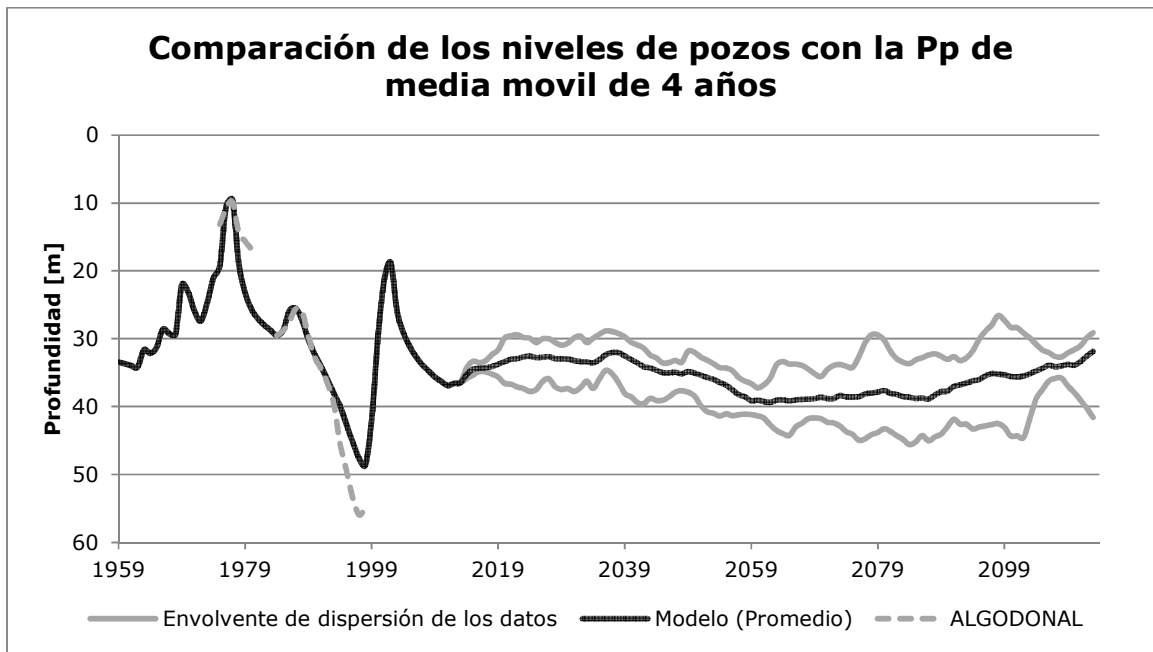


FIGURA 32: UBICACIÓN DE POZOS DE OBSERVACIÓN. IMAGEN OBTENIDA CON GOOGLE EARTH.





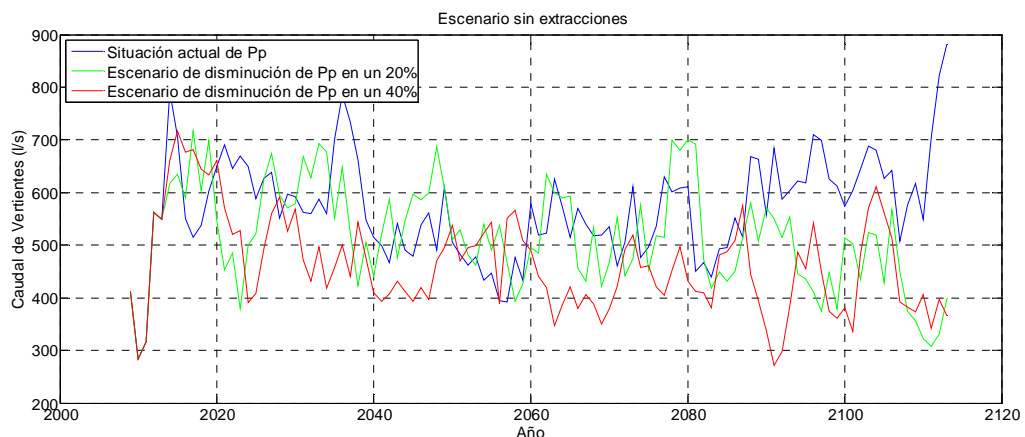


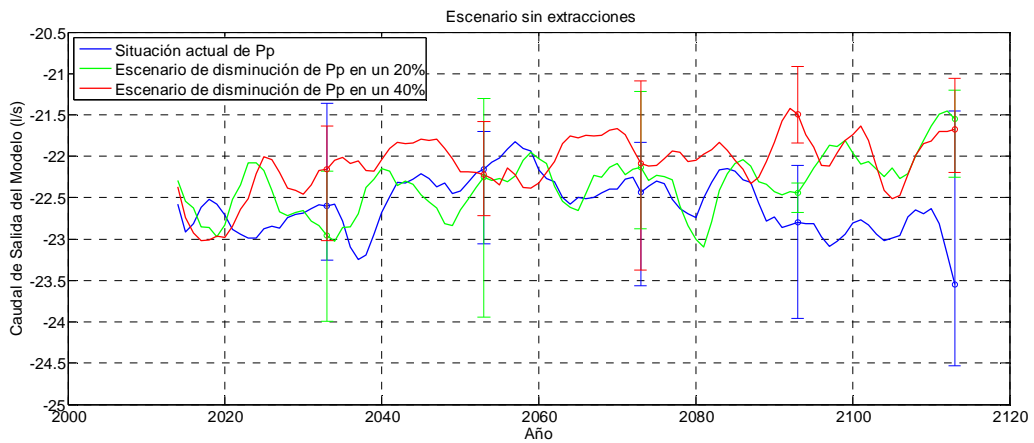
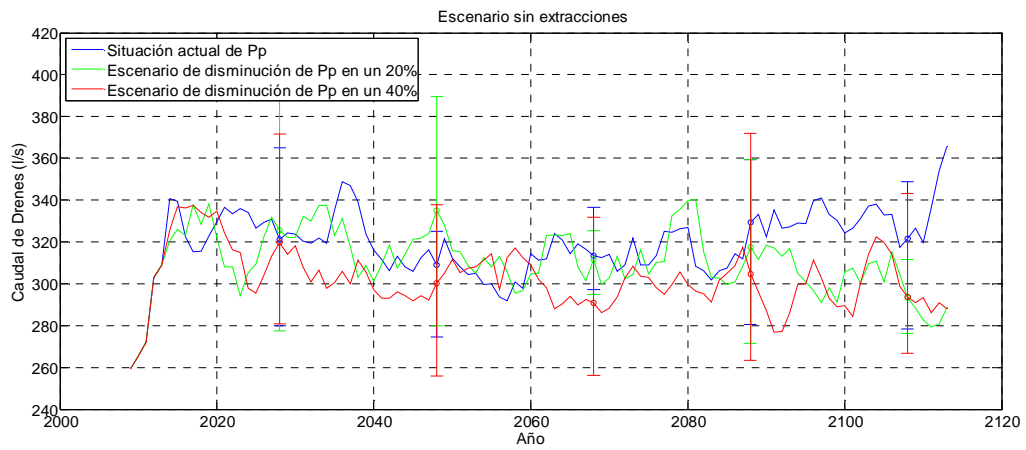
Anexo F. Gráficos de escenarios sin extracciones

A continuación se presentan los gráficos realizados para comparar el caudal de las vertientes, los drenes y la salida del acuífero a través de la condición de borde aguas abajo para un escenario sin extracciones. Este análisis permite tener una línea base de comparación con los distintos escenarios de extracciones.

1. Gráficos de vertientes, drenes y salida del acuífero

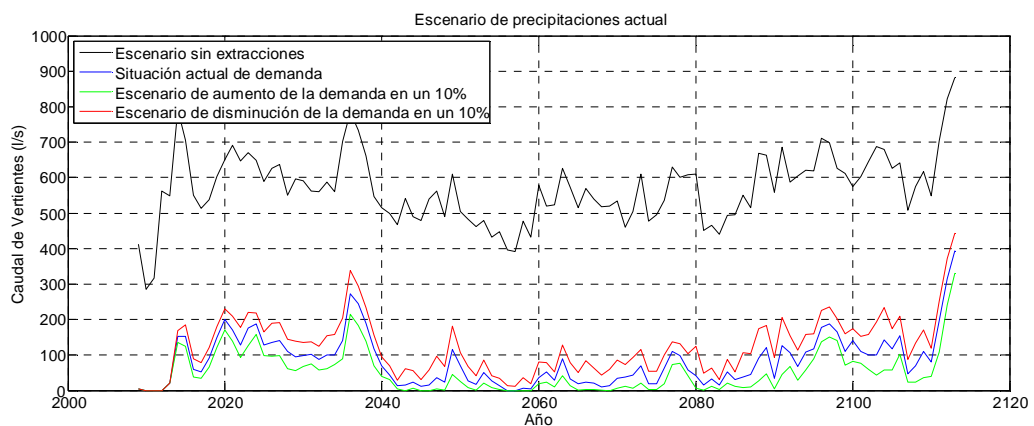
Estos gráficos comparan los tres escenarios climáticos propuestos bajo un escenario de extracciones iguales a cero.

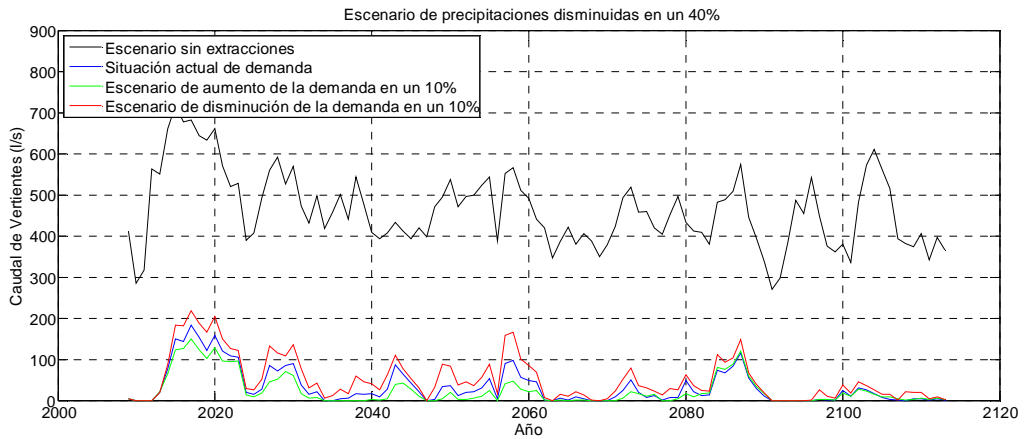
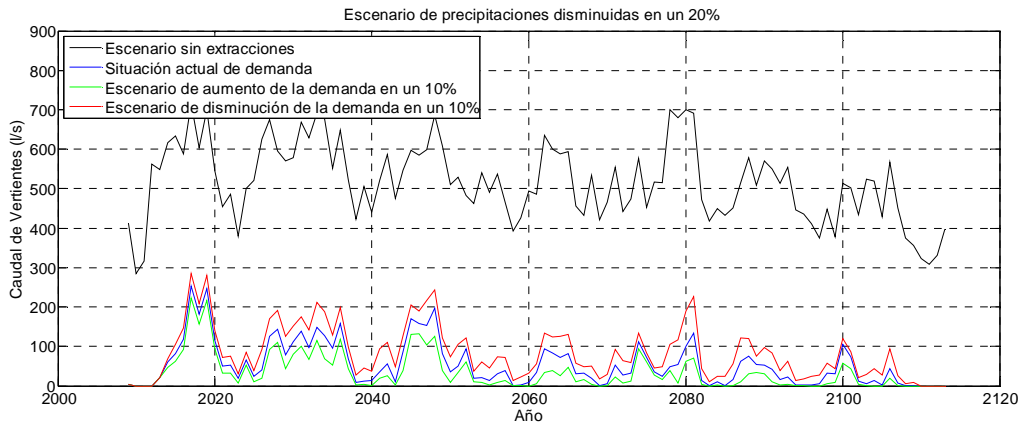




2. Gráficos comparativos para vertientes

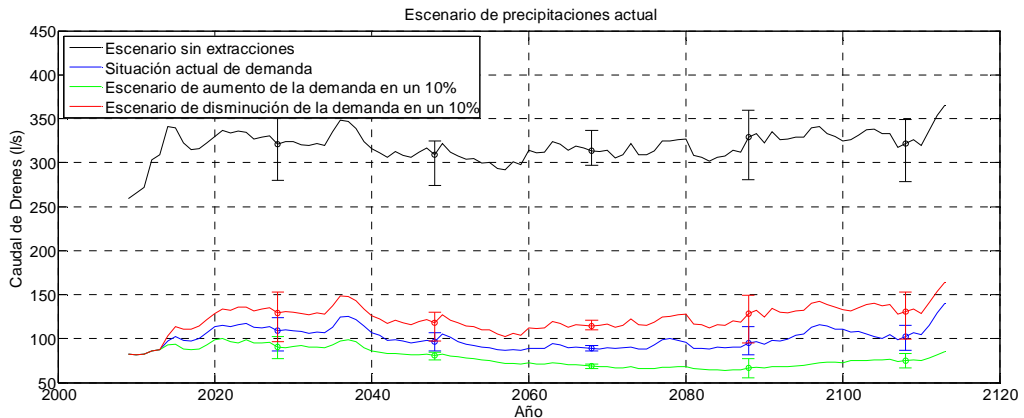
En las siguientes figuras se grafican los distintos escenarios de demanda para un mismo escenario climático. La línea negra representa el caudal que aflora si las extracciones fueran nulas.

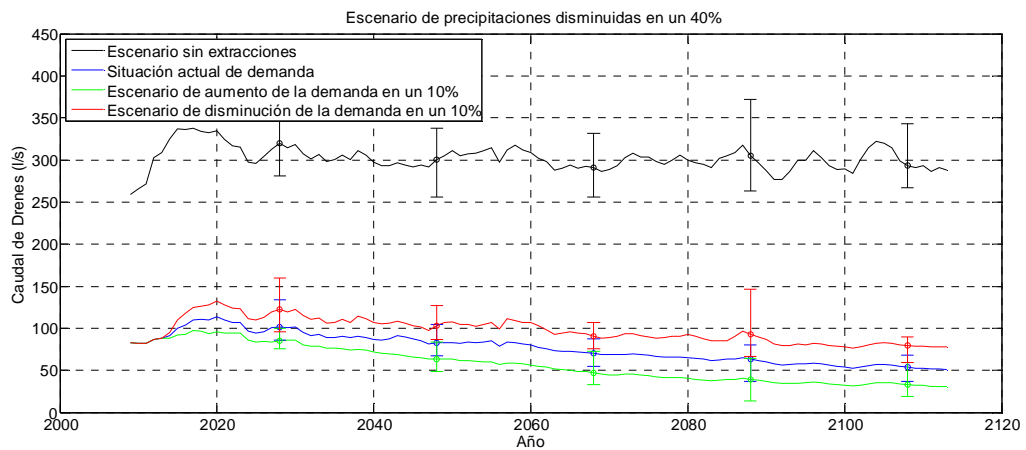
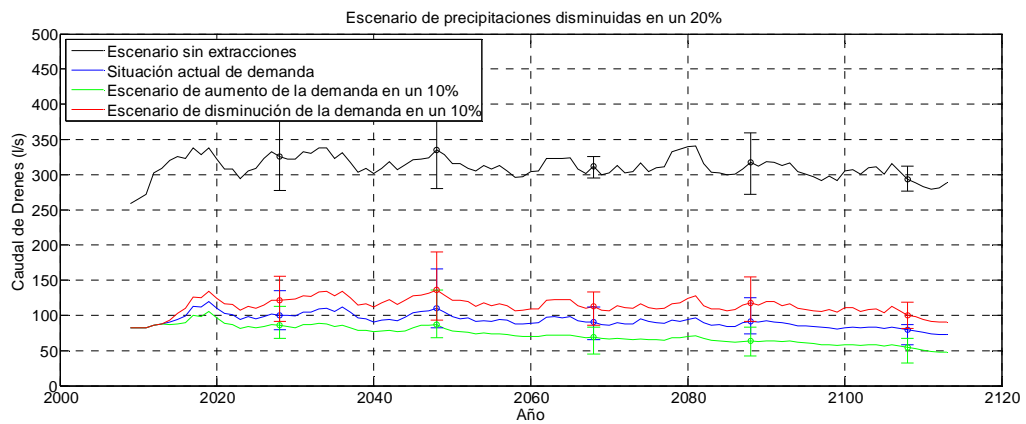




3. Gráficos comparativos para drenes

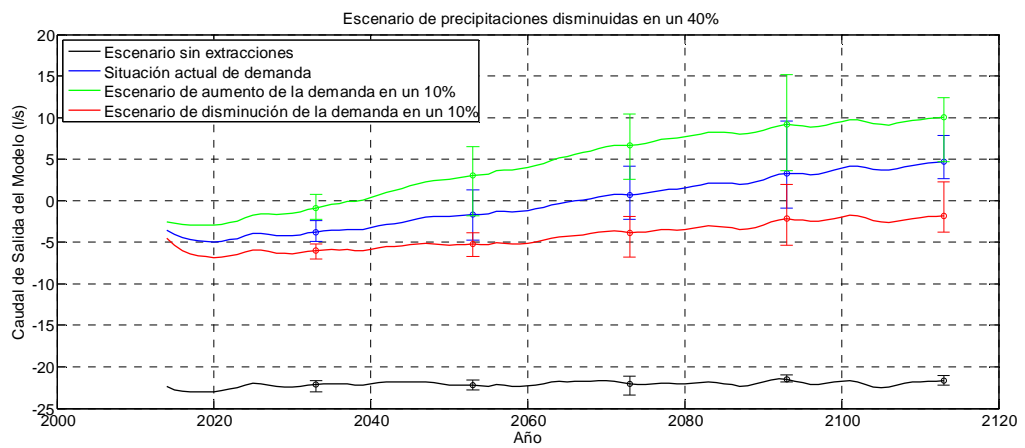
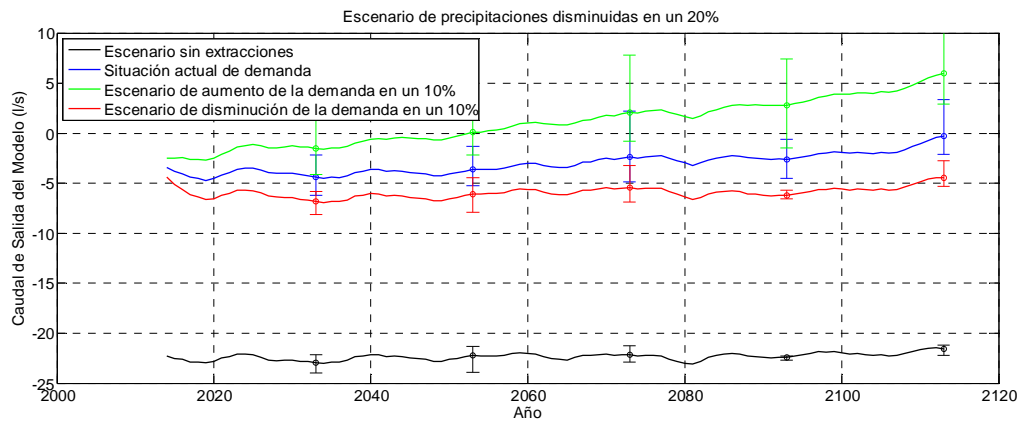
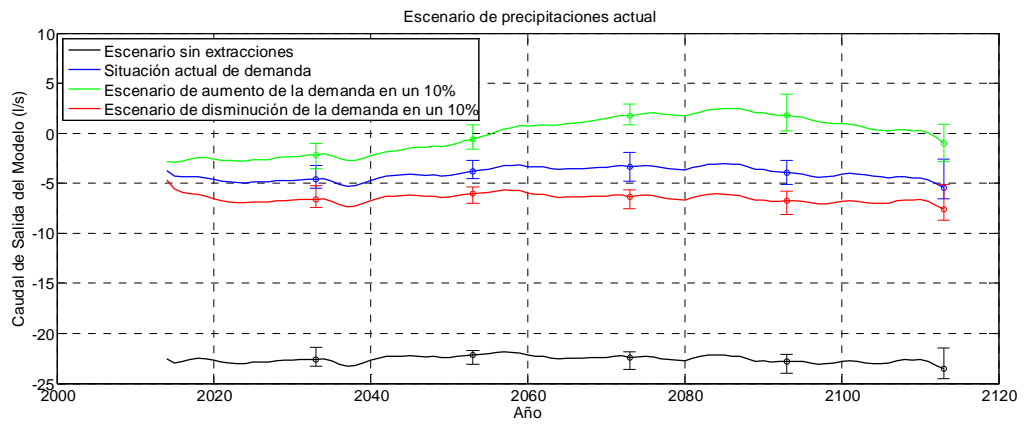
En las siguientes figuras se grafican los distintos escenarios de demanda para un mismo escenario climático. La línea negra representa el caudal que aflora si las extracciones fueran nulas.





4. Gráficos comparativos para salida del acuífero

En las siguientes figuras se grafican los distintos escenarios de demanda para un mismo escenario climático. La línea negra representa el caudal que fluye por la condición de borde si las extracciones fueran nulas. Valores positivos significan un caudal de salida mientras que valores negativos representan caudales de entrada al acuífero.

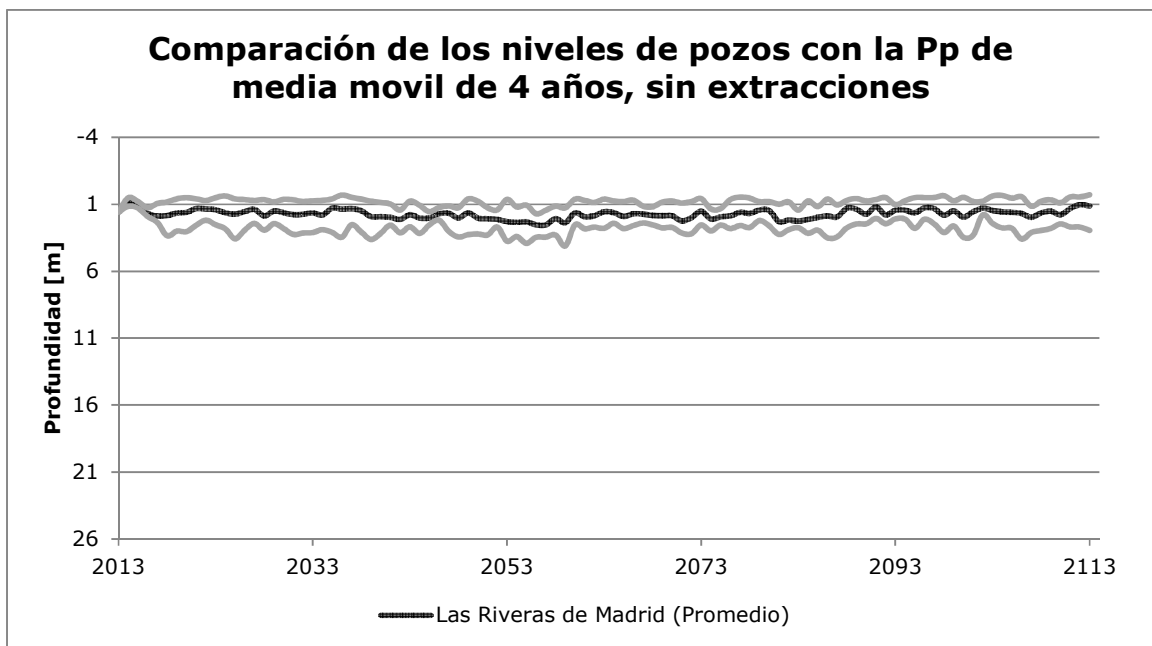


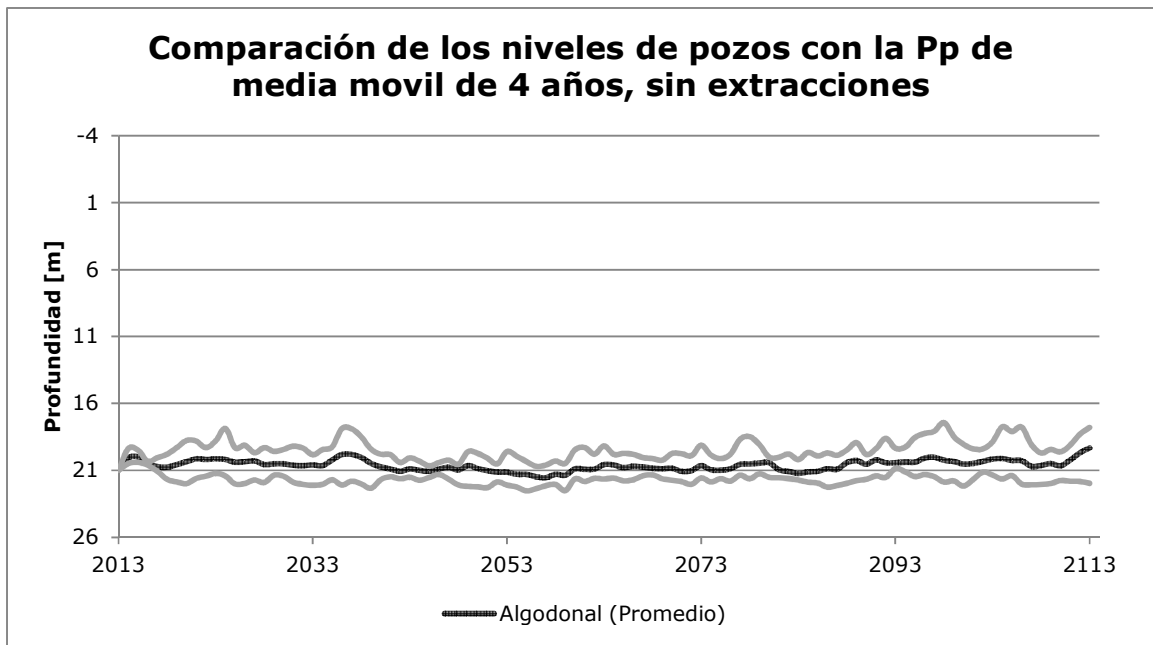
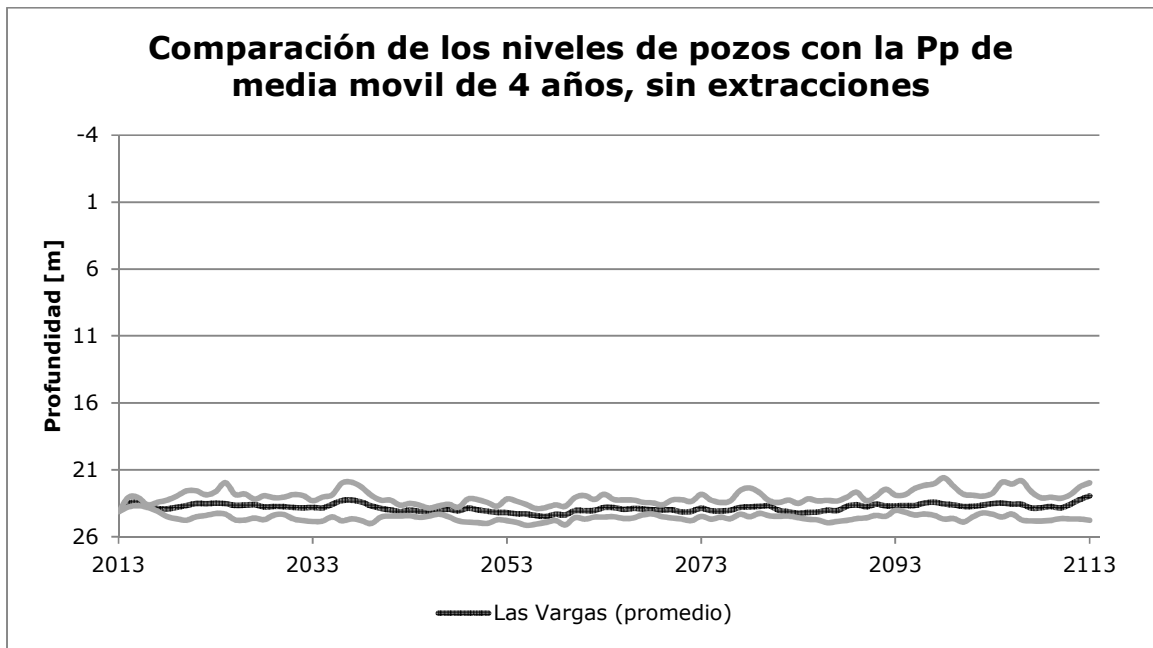
Anexo G. Gráficos de escenario sin extracciones

En este anexo se presentarán los gráficos correspondientes a los pozos Las Riveras de Madrid, Santa Irene Sur, Las Animas, Las Vargas y Algodonal. Estos gráficos se realizaron con los datos obtenidos de simular un escenario sin extracciones, con el fin de obtener un escenario base de comparación. Para cada escenario climático se simularon 5 series de precipitaciones y se graficó la respuesta promedio en una línea negra, junto con los valores mínimos y máximos, representados por líneas grises.

1. Escenario climático similar al actual.

En este escenario se puede observar que los niveles se mantienen constantes en promedio a excepción con los últimos periodos, que muestran una alza en los niveles producto de una alta recarga en uno de las simulaciones para este escenario climático.

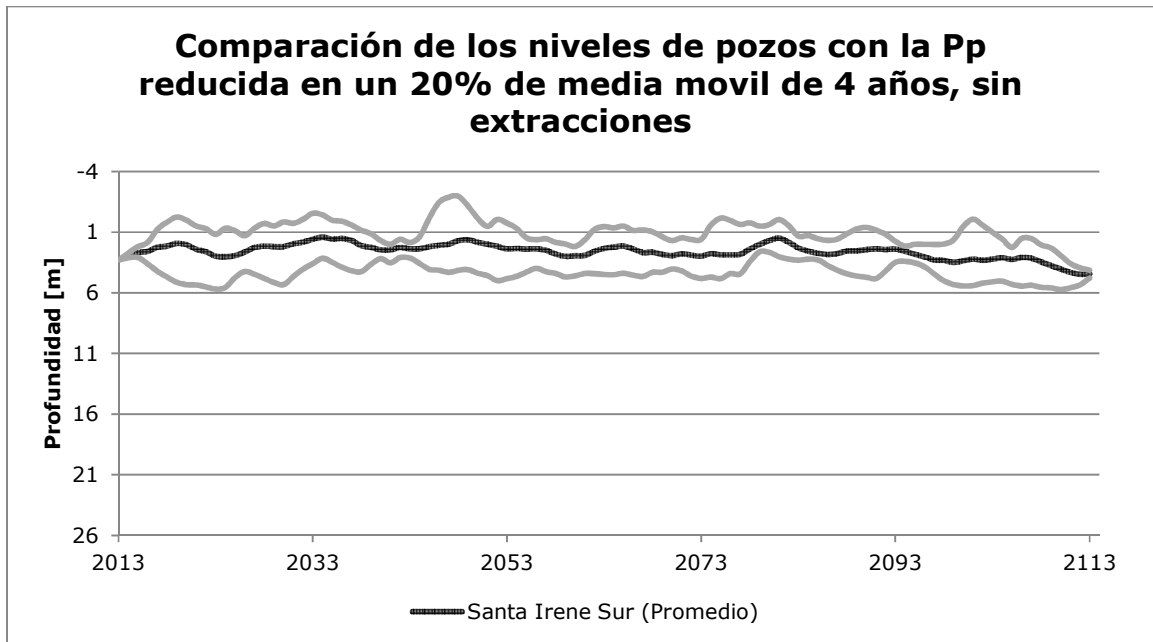
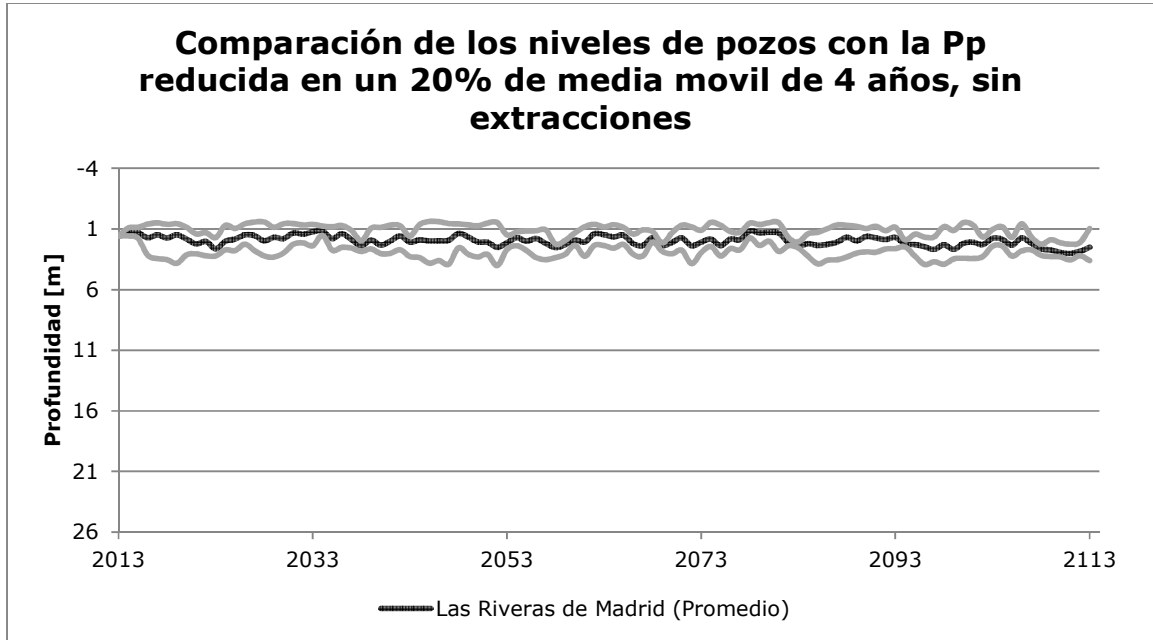




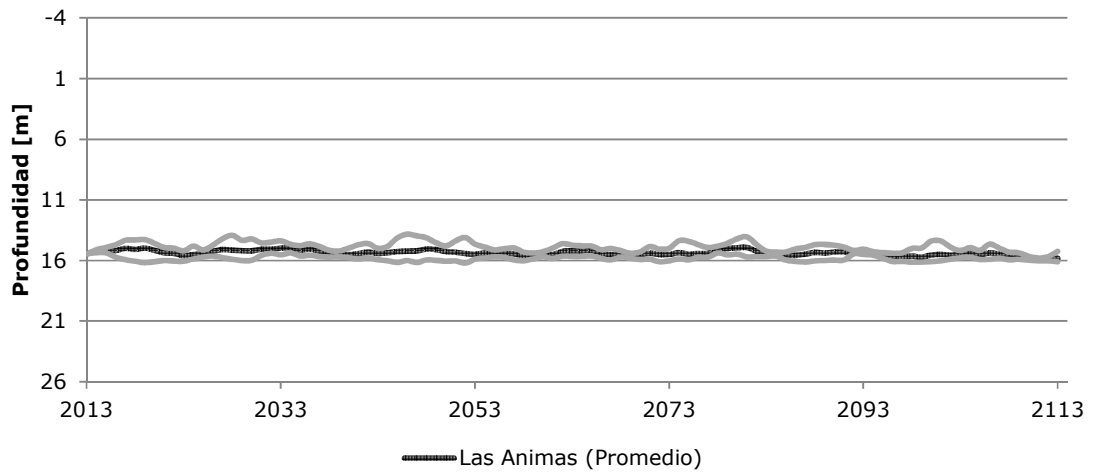
2. Escenario climático con precipitaciones promedio reducidas en un 20%.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el modelo para un escenario climático de media reducida linealmente hasta en un 20%, pero sin

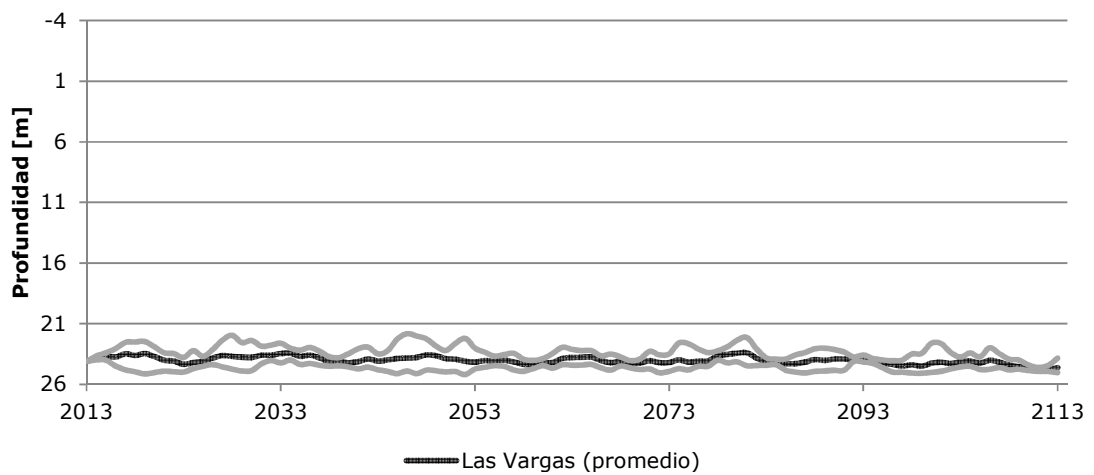
extracciones. La respuesta en el largo plazo muestra una tendencia a la disminución de los niveles, así como una reducción de la diferencia entre máximos y mínimos al ser comparada con el escenario climático sin reducciones de sus precipitaciones.

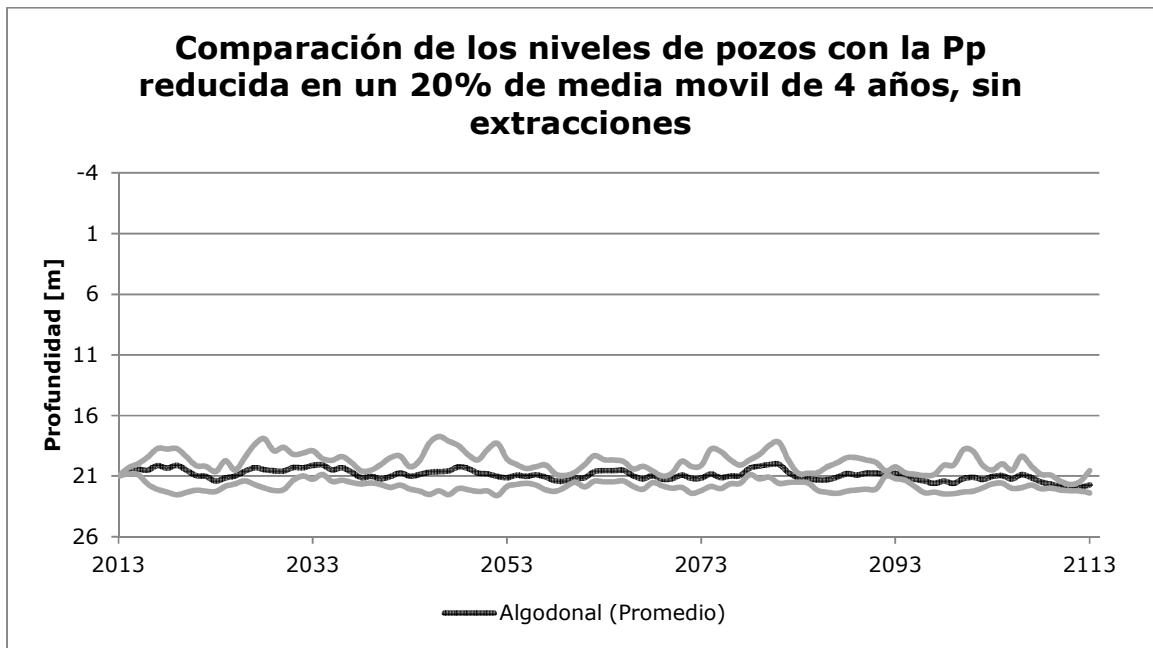


**Comparación de los niveles de pozos con la Pp
reducida en un 20% de media móvil de 4 años, sin
extracciones**



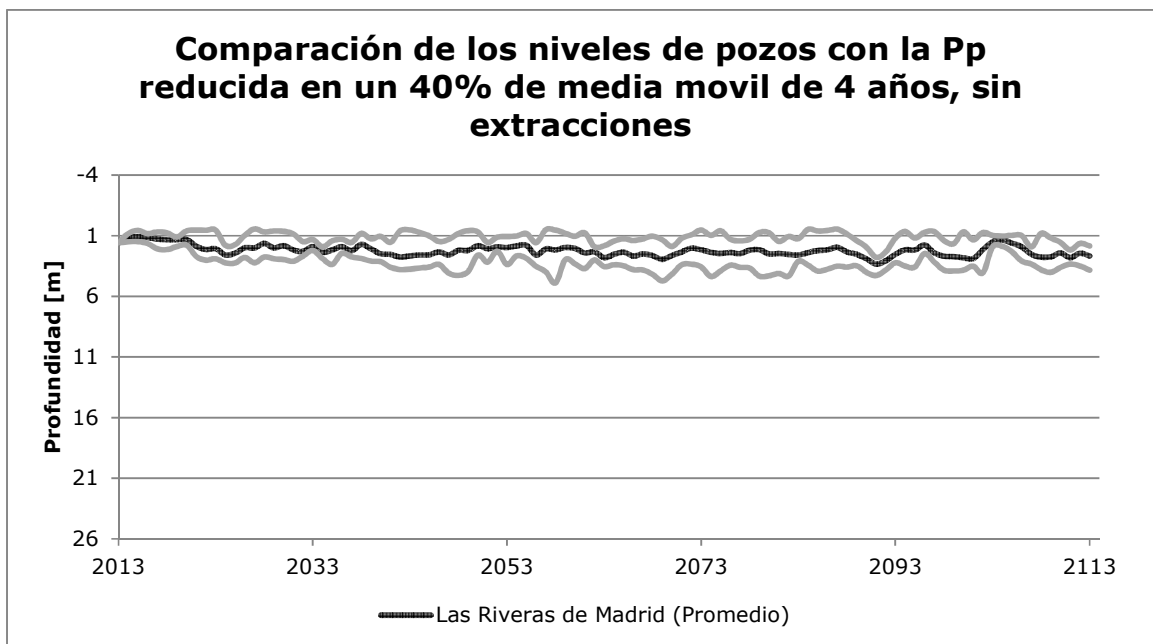
**Comparación de los niveles de pozos con la Pp
reducida en un 20% de media móvil de 4 años, sin
extracciones**



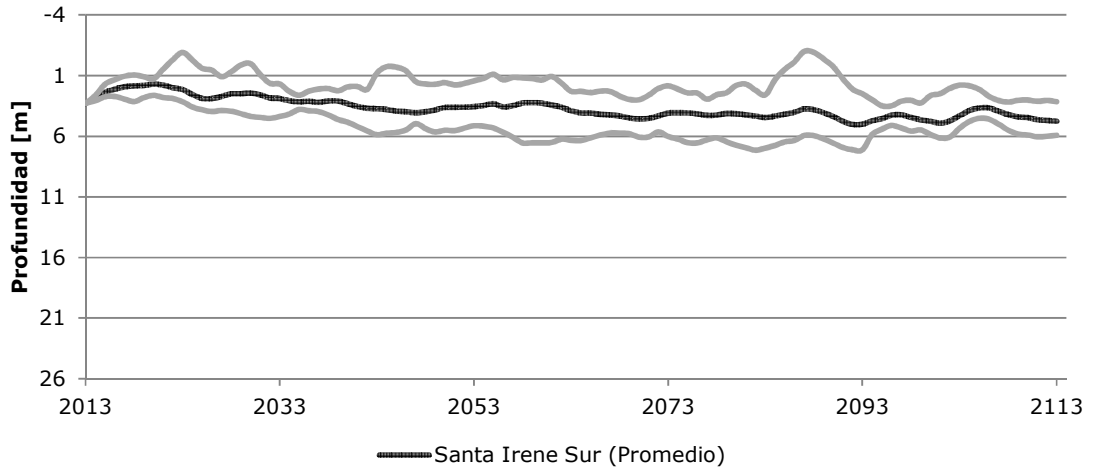


3. Escenario climático con precipitaciones promedio reducidas en un 40%.

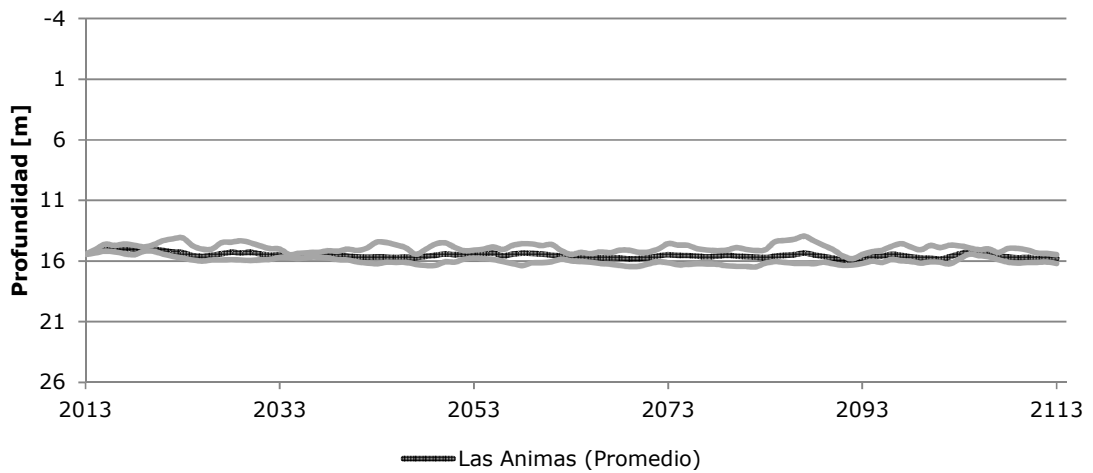
A continuación se presentan los resultados obtenidos por el modelo para un escenario climático de media reducida linealmente hasta en un 40%, pero sin extracciones. En estos gráficos la tendencia a la disminución de los niveles se ve más marcada que en los escenarios anteriores, sin embargo el descenso no supera los 5 metros por debajo del nivel inicial.



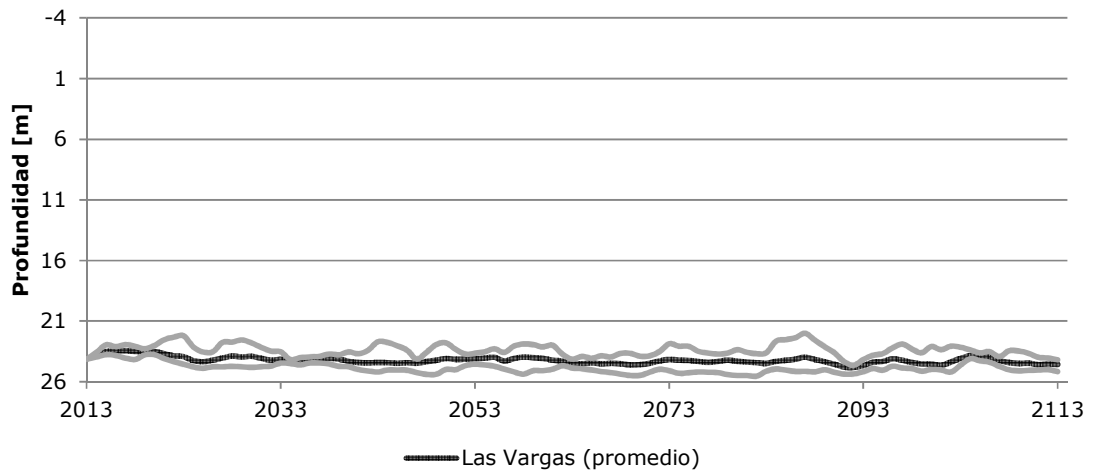
Comparación de los niveles de pozos con la Pp reducida en un 40% de media móvil de 4 años, sin extracciones



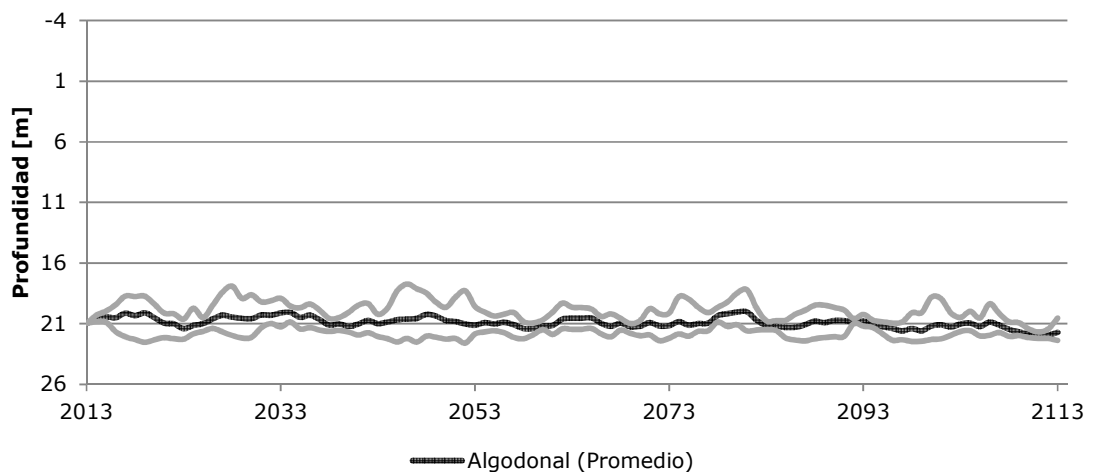
Comparación de los niveles de pozos con la Pp reducida en un 40% de media móvil de 4 años, sin extracciones



Comparación de los niveles de pozos con la Pp reducida en un 40% de media móvil de 4 años, sin extracciones



Comparación de los niveles de pozos con la Pp reducida en un 40% de media móvil de 4 años, sin extracciones



Anexo H. Tablas de resumen de series modeladas

A continuación se presentan las tablas que resumen la información del último periodo simulado para cada escenario climático. Se decidió presentar el último periodo en lugar del promedio de los datos pues esta última opción no permite observar el efecto acumulado sobre el almacenamiento, el cual repercute sobre el caudal de extracción de los pozos y la salida por la condición de borde constante.

Los valores presentados en la tabla se encuentran en [l/s] para una comparación más sencilla y corresponden al caudal asociado al volumen anual correspondiente a cada variable. La última columna consiste en la diferencia entre la recarga y la suma de las otras variables y representa el error numérico del modelo, también en [l/s].

		Escenario climático actual							
		Serie	Recarga	Drenes	Vertientes	Pozos	Salida	Almacenamiento	Diferencia
Extracciones actuales	Serie 1	1502	158	500	740	7	98	0.1	
	Serie 2	1458	154	450	740	6	108	0.3	
	Serie 3	2099	177	863	740	6	313	0.7	
	Serie 4	586	83	0	740	3	-238	-0.8	
	Serie 5	988	130	160	740	6	-48	0.9	
Demanda aumentada un 10%	Serie 1	1502	84	405	809	0	205	0.0	
	Serie 2	1458	96	377	809	3	172	0.8	
	Serie 3	2099	86	764	793	0	456	0.7	
	Serie 4	586	70	0	802	-1	-283	-1.0	
	Serie 5	988	91	113	802	3	-21	0.2	
Demanda disminuida un 10%	Serie 1	1502	190	564	666	9	74	0.0	
	Serie 2	1458	177	510	666	8	98	0.0	
	Serie 3	2099	210	936	666	8	279	0.1	
	Serie 4	586	93	0	666	5	-177	-0.3	
	Serie 5	988	153	212	666	8	-52	1.6	
Sin Extracciones	Serie 1	1502	396	1027	0	25	54	0.0	
	Serie 2	1458	380	977	0	24	76	0.1	
	Serie 3	2099	425	1428	0	24	222	-0.2	
	Serie 4	586	280	320	0	21	-35	0.1	
	Serie 5	988	347	658	0	24	-40	-0.3	

		Escenario climático con precipitaciones reducidas un 20%							
		Serie	Recarga	Drenes	Vertientes	Pozos	Salida	Almacenamiento	Diferencia
Extracciones actuales	Serie 1	1146	59	0	719	-3	371	0.3	
	Serie 2	695	81	0	735	2	-121	-1.8	
	Serie 3	587	79	0	723	2	-216	-0.7	
	Serie 4	466	74	0	728	1	-335	-1.2	
	Serie 5	710	72	0	735	0	-96	-1.0	
Demanda aumentada un 10%	Serie 1	1146	32	0	736	-10	388	0.2	
	Serie 2	695	61	0	793	-3	-153	-1.9	
	Serie 3	587	49	0	790	-6	-245	-0.9	
	Serie 4	466	43	0	790	-7	-358	-1.3	
	Serie 5	710	54	0	791	-4	-129	-1.1	
Demanda disminuida un 10%	Serie 1	1146	84	0	662	3	396	0.8	
	Serie 2	695	95	0	664	5	-68	-0.9	
	Serie 3	587	91	0	664	5	-173	-0.4	
	Serie 4	466	92	0	666	5	-295	-0.9	
	Serie 5	710	90	0	666	4	-49	0.2	
Sin Extracciones	Serie 1	1146	327	694	0	22	103	-0.1	
	Serie 2	695	288	385	0	22	0	-0.2	
	Serie 3	587	275	302	0	21	-11	-0.1	
	Serie 4	466	267	228	0	21	-50	-0.1	
	Serie 5	710	285	381	0	21	23	-0.1	
		Escenario climático con precipitaciones reducidas un 40%							
		Serie	Recarga	Drenes	Vertientes	Pozos	Salida	Almacenamiento	Diferencia
Extracciones actuales	Serie 1	652	52	0	719	-4	-115	-0.8	
	Serie 2	754	51	4	687	-5	19	-1.2	
	Serie 3	630	54	0	717	-4	-137	-0.1	
	Serie 4	630	54	0	717	-4	-137	-0.1	
	Serie 5	441	59	0	703	-3	-317	-0.9	
Demanda aumentada un 10%	Serie 1	652	22	0	736	-12	-94	-0.4	
	Serie 2	754	35	14	708	-9	8	-1.0	
	Serie 3	630	22	0	758	-12	-138	-0.2	
	Serie 4	630	22	0	758	-12	-138	-0.2	
	Serie 5	441	53	0	683	-5	-290	0.4	
Demanda disminuida un 10%	Serie 1	652	74	0	661	1	-83	-1.3	
	Serie 2	754	89	14	647	4	2	-1.5	
	Serie 3	630	85	0	651	4	-109	0.4	
	Serie 4	630	85	0	651	4	-109	0.4	
	Serie 5	441	81	0	648	3	-290	-0.9	
Sin Extracciones	Serie 1	652	280	341	0	21	8	0.0	
	Serie 2	754	304	448	0	22	-21	-0.2	
	Serie 3	630	289	348	0	22	-29	-0.1	
	Serie 4	630	289	348	0	22	-29	-0.1	
	Serie 5	441	263	200	0	21	-43	-0.1	