

Trabajo Fin de Máster

MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO DEL VALLE DEL MEDIO Y BAJO PIURA - PERÚ

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

ARTURO VELASCO ALVAREZ

Director:

DR. JOSE ESTEBAN CÁPILLA ROMÁ

MAYO, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Agradecimientos

En este proyecto final, he volcado todos los conocimientos adquiridos durante mi estancia en la Universidad de Politécnica de Valencia. Por lo cual, quiero agradecer a cada uno de los excelentes profesores del Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Especialmente quiero agradecer al Dr. José E. Capilla Romá por su buena disposición, apoyo y extraordinaria asesoría en mi proyecto final de master.

Quiero agradecer de manera muy especial a mis profesores de pregrado y actualmente mis amigos, Pedro Castillo y Walter Ramírez, quienes fueron los que despertaron en mí el interés por el apasionante mundo de la ingeniería de recursos hídricos.

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia y especialmente el de mi madre, que a pesar de la distancia siempre han estado presentes y orgullosos de mis logros.

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Modelo Numérico Hidrogeológico del Valle del Medio y Bajo Piura - Perú

Título del TFM en inglés: Hydrogeological Mathematical Model of the Valle Medio and Bajo Piura - Peru

Título del TFM en valenciano: Model Numèric Hidrogeològic del Valle del Medio y BAjo Piura - Perú

Alumno: Arturo Velasco Alvarez

Director: Dr. José E. Capilla Romá

Fecha de Lectura: Mayo, 2017

Resumen

En español

En este trabajo se analizó el flujo de aguas subterráneas del acuífero del Valle Medio y Bajo Piura, mediante modelamiento numérico de diferencias finitas MODFLOW en el departamento de Piura, Perú, con el software PMWIN. El objetivo principal del modelo numérico del acuífero es cuantificar y analizar los flujos del sistema, y en consecuencia mejorar el conocimiento y comprensión de la circulación de aguas subterráneas en el Valle Medio y Bajo Piura.

El acuífero del Valle Medio y Bajo Piura se divide en tres estratos, el acuífero superficial compuesto por formaciones cuaternarias, el semiacuitado y el acuífero confinado compuestos por formaciones terciarias. La explotación del acuífero confinado es varias veces superior a la explotación del acuífero superficial, esto se debe a la baja concentración de sales que hacen ideal el uso de sus aguas para el abastecimiento urbano. El acuífero está localizado en un área costera semiárida con recargas limitadas y se tiene registro de su explotación desde el año 1980, siendo los principales usos para el abastecimiento urbano y agropecuario. Siguiendo los reportes de las autoridades encargadas de la gestión del agua en esta zona, las extracciones por bombes se han duplicado entre el año 1980 y 2014, de 27.01 Hm³/año a 58.06 Hm³/año, respectivamente, produciendo el descenso de los niveles de altura hidráulica principalmente en el acuífero confinado, explotado por la buena calidad de sus aguas. A pesar que la explotación de las aguas subterráneas es regulada y monitoreada por la Autoridad Nacional del Agua del Perú, no existen estudios serios que cuantifiquen y caractericen los recursos hídricos subterráneos, haciendo imposible su gestión y en consecuencia se viene realizando una explotación descontrolada con altos riesgos de contaminación y sobreexplotación.

Una de las más demandantes actividades fue la recopilación de información hidrogeológica del área de estudio (hidrología, volúmenes de explotación, geología, hidrogeología, características de pozos, parámetros del acuífero, etc.). Posteriormente se realizó un análisis integral de los datos y se fijaron las hipótesis para la construcción del modelo conceptual del acuífero. Se construyó un modelo numérico en régimen transitorio que modela el acuífero entre octubre del 2004 y octubre del 2014, siendo un total de 10 años evaluados en periodos de tiempos mensuales. Previo a realizar el modelamiento en régimen transitorio, se construyó un modelo estacionario representativo de octubre 2004, que permitió evaluar y ajustar las hipótesis del modelo conceptual. Las alturas hidráulicas resultantes del modelo calibrado en régimen estacionario, se utilizaron como condiciones iniciales en el modelo en régimen transitorio. La calibración de los parámetros hidráulicos

se realizó con registros históricos (2004-2014) de alturas hidráulicas de 69 piezómetros y se obtuvo calibraciones aceptables tanto para el modelo en régimen estacionario como para el modelo en régimen transitorio con valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.97 y 0.96, respectivamente. Sin embargo, los buenos resultados de la calibración no indican que el modelo este reproduciendo el comportamiento del acuífero con mayor exactitud y precisión, por tanto los resultados del modelo se deben interpretar con cautela y sentido físico.

Los resultados del modelo presentados en este trabajo revelan que las principales recargas del acuífero superficial son los retornos de riego y la recarga lateral proveniente del acuífero del Alto Piura. Además, existen flujos que ingresan al acuífero desde los cuerpos de agua superficiales en la parte baja del modelo. Sin embargo, en el balance general los cuerpos de agua superficiales son ganadores, esto se debe principalmente a la transferencia de flujo del acuífero hacia el río Piura en la parte alta del modelo antes que el río cambie su dirección hacia el Sur. En el acuífero superficial el modelo no evidencia problemas de intrusión marina, el flujo sigue su curso natural con dirección Sur Oeste hasta el Océano Pacífico. El balance promedio de flujos de los años 2004-2014 del acuífero superficial revela la extracción continuada de aguas almacenadas. Sin embargo, debido a la rápida interacción que se ha observado entre el acuífero y las recargas superficiales es posible que este almacenamiento se recupere rápidamente con eventos extremos como el Fenómeno del Niño. La principal salida de flujo del acuífero superficial es la transferencia de flujo hacia el acuífero confinado.

El análisis de los flujos del acuífero confinado muestra que la principal fuente de recarga son las transferencias de flujo desde el acuífero superficial y en mucha menor magnitud las transferencias de flujo desde el acuífero del Alto Piura. Puesto que en el acuífero confinado se da la mayor explotación y la recarga no está cubriendo este volumen de explotación, se viene extrayendo aguas del almacenamiento, pudiéndose observar en los gráficos un incremento en la extracción de aguas almacenadas proporcional al incremento de las explotaciones. El acuífero confinado se encuentra aislado por el acuitardo y en consecuencia el proceso de recarga del mismo es mucho más lento, con lo cual la constante extracción de aguas de almacenamiento se ve reflejada en descensos de alturas hidráulicas que acarrea incremento de costes de explotación y posibles problemas de contaminación por intrusión marina al tratarse de un acuífero costero.

La modelación y análisis realizado en este trabajo busca establecer las primeras aproximaciones hacia un mejor conocimiento y comprensión del acuífero del Valle Medio y Bajo Piura, siendo necesario que las autoridades involucradas en la gestión de recursos hídricos, elaboren estudios que permitan reducir la incertidumbre asociada al modelo y de este modo se puedan elaborar modelos de mayor robustez que sean útiles para la toma de decisiones y gestión de recursos hídricos. No es posible gestionar un recurso subterráneo, si no se conoce sus fuentes de recarga, el régimen de circulación de los flujos y los límites de explotación que permitan un uso sostenible del mismo.

En valenciano

En este treball es va analitzar el flux d'aigües subterrànies de l'aquífer de la Valle Medio y Bajo Piura, per mitjà de modelamiento numèric de diferències finites MODFLOW en el departament de Piura, Perú, amb el programari PMWIN. L'objectiu principal del model numèric de l'aquífer és quantificar i analitzar els fluxos del sistema, i en conseqüència millorar el coneixement i comprensió de la circulació d'aigües subterrànies en la Valle Medio y Bajo Piura.

L'aquífer de la Valle Medio y Bajo Piura es dividix en tres estrats, l'aquífer superficial compost per formacions quaternàries, el semiacuitardo i l'aquífer confinat compostos per formacions terciàries. L'explotació de l'aquífer confinat és diverses vegades superior a l'explotació de l'aquífer superficial, açò es deu a la baixa concentració de sals que fan ideal l'ús de les seues aigües per a l'abastiment urbà. L'aquífer està localitzat en una àrea costanera semiàrida amb recarregues limitades i es té registre de la seua explotació des de l'any 1980, sent els principals usos per a l'abastiment urbà i agropecuari. Seguint els reports de les autoritats encarregades de la gestió de l'aigua en esta zona, les extraccions per bombaments s'han duplicat entre l'any 1980 i 2014, de 27.01 Hm³/año a 58.06 Hm³/año respectivament, produint el descens dels nivells d'altura hidràulica principalment en l'aquífer confinat, explotat per la bona qualitat de les seues aigües. A pesar que l'explotació de les aigües subterrànies és regulada i monitoreada per l'Autoritat Nacional de l'Aigua del Perú, no hi ha estudis seriosos que quantifiquen i caracteritzen els recursos hídrics subterranis, fent impossible la seua gestió i en conseqüència es realitza una explotació descontrolada amb alts riscos de contaminació i sobreexplotació.

Una de les més demandants activitats va ser la recopilació d'informació hidrogeològica de l'àrea d'estudi (hidrologia, volums d'explotació, geologia, hidrogeologia, característiques de pous, paràmetres de l'aquífer, etc.). Posteriorment es va realitzar una anàlisi integral de les dades i es van fixar les hipòtesis per a la construcció del model conceptual de l'aquífer. Es va construir un model numèric en règim transitori que modela l'aquífer entre octubre del 2004 i octubre del 2014, sent un total de 10 anys avaluats en períodes de temps mensuals. Previ a realitzar el modelamiento en règim transitori, es va construir un model estacionari representatiu d'octubre 2004, que va permetre avaluar i ajustar les hipòtesis del model conceptual. Les altures hidràuliques resultants del model calibrat en règim estacionari, es van utilitzar com a condicions inicials en el model en règim transitori. La calibratge dels paràmetres hidràulics es va realitzar amb registres històrics (2004-2014) d'altures hidràuliques de 69 piezòmetres i es va obtindre calibratges acceptables tant per al model en règim estacionari com per al model en règim transitori amb valors de l'eficiència de Nash-Sutcliffe de 0.97 i 0.96 respectivament. No obstant això, els bons resultats de la calibratge no indiquen que el model este reproduint el comportament de l'aquífer amb major exactitud i precisió, per tant els resultats del model s'han d'interpretar amb cautela i sentit físic.

Els resultats del model presentats en este treball revelen que les principals recarregues de l'aquífer superficial són les retorns de reg i la recarrega lateral provinent de l'aquífer de l'Alt Piura. A més, hi ha flux que ingressen a l'aquífer des dels cossos d'aigua superficials en la part baixa del model. No obstant això, en el balanç general els cossos d'aigua superficials són guanyadors, açò es deu principalment a la transferència de flux de l'aquífer cap al va riure Piura en la part alta del model abans que el va riure canvie la seua direcció cap al Sud. En l'aquífer superficial el model no evidència problemes d'intrusió marina, el flux segueix el seua curs natural amb direcció Sud Oest fins a l'Oceà Pacífic. El balanç mitjana de fluxos dels anys 2004-2014 de l'aquífer superficial revela l'extracció continuada d'aigües emmagatzemades. No obstant això, a causa de la ràpida interacció que s'ha observat entre l'aquífer i les recarregues superficials és possible que este emmagatzemament es recupere ràpidament amb esdeveniments extrems com el Fenomen del Xiquet. La principal eixida de flux de l'aquífer superficial és la transferència de flux cap a l'aquífer confinat.

L'anàlisi dels fluxos de l'aquífer confinat mostra que la principal font de recarrega són les transferències de flux des de l'aquífer superficial i en molta menor magnitud les transferències de flux des de l'aquífer de l'Alt Piura. Ja que en l'aquífer confinat es dona la major explotació i la recarrega no està cobrint este volum

d'exploració, s'extrau aigües de l'emmagatzemament, podent-se observar en els gràfics un increment en l'extracció d'aigües emmagatzemades proporcional a l'increment de les explotacions. L'aqüífer confinat es troba aïllat per l'acuitardo i en conseqüència el procés de recarrega del mateix és molt més lent, amb la qual cosa la constant extracció d'aigües d'emmagatzemament es veu reflectida en descensos d'altures hidràuliques que ocasiona increment de costos d'exploració i possibles problemes de contaminació per intrusió marina al tractar-se d'un aquífer costaner.

La modelació i anàlisi realitzat en este treball busca establir les primeres aproximacions cap a un millor coneixement i comprensió de l'aqüífer de la Valle Medio y Bajo Piura, sent necessari que les autoritats involucrades en la gestió de recursos hídrics, elaboren estudis que permeten reduir la incertesa associada al model i d'esta manera es puguen elaborar models de major robustesa que siguin útils per a la presa de decisions i gestió de recursos hídrics. No és possible gestionar un recurs subterrani, si no es coneix les seues fonts de recarrega, el règim de circulació dels fluxos i els límits d'exploració que permeten un ús sostenible del mateix.

En inglés

In this work, the groundwater flow of the Valle Medio and Bajo Piura aquifer was analyzed using the MODFLOW finite difference numerical modeling, with PMWIN software. The main aim of the numerical model of the aquifer is to quantify and analyze system flows, and consequently to improve the knowledge and understanding of groundwater in the aquifer.

The aquifer of the Valle Medio and Bajo Piura is divided into three strata, the surface aquifer composed of quaternary formations, the semiaquitard and the confined aquifer composed of tertiary formations. The pumping rate of the confined aquifer is higher than the superficial aquifer; this is due to the low electrical conductivity that makes ideal the use of its waters for the urban supply. The aquifer is located in a semi-arid coastal area with limited recharge and it has been exploited since 1980, being the main uses of urban and agricultural supply. Following the reports of the water management authorities, pumping withdrawals have doubled between 1980 and 2014, from 27.01 Hm³ / year to 58.06 Hm³ / year, respectively, resulting in a decline of hydraulics head levels mainly in the confined aquifer, exploited by the good quality of its waters. Although the exploitation of groundwater is regulated and monitored by the National Water Authority of Peru, there are no reliable studies that quantify and characterize the groundwater resources, making it impossible to manage and consequently, an uncontrolled exploitation with high risks of pollution and overexploitation.

One of the most demanding activities was the collection of hydrogeological information from the study area (hydrology, exploitation volumes, geology, hydrogeology, well characteristics, aquifer parameters, etc.). Subsequently a comprehensive analysis of the data was carried out and the hypotheses for the construction of the conceptual model of the aquifer were fixed. A numerical model was constructed under a transient regime that models the aquifer between October 2004 and October 2014, being a total of 10 years evaluated in monthly periods. Prior to transient modeling, a stationary model representative of October 2004 was constructed, which allowed to evaluate and adjust the hypotheses of the conceptual model. The hydraulic heads resulting from the steady state model were used as initial conditions in the transient model. The calibration of the hydraulic parameters was performed with historical records (2004-2014) of hydraulic

heads of 69 piezometers and acceptable calibrations were obtained for both the steady state model and the transient model by Nash-Sutcliffe efficiency values of 0.97 and 0.96, respectively. However, the best results of the calibration do not indicate that the model is reproducing the aquifer behavior with greater accuracy and precision, therefore the results of the model must be interpreted with caution and physical sense.

The results of the model presented in this work reveal that the main surface aquifer recharges are the irrigation returns and lateral recharge from the Alto Piura aquifer. In addition, there is flow entering the aquifer from the surface water bodies in the lower part of the model. However, in the general balance the surface water bodies are winners; this is mainly due to the flow transfer of the aquifer to the Piura River in the upper part of the model before the river changes its direction towards the South. In the surface aquifer the model does not show problems of marine intrusion, the flow follows its natural course from the South to the Pacific Ocean. The average flow balance of the years 2004-2014 of the surface aquifer reveals the continued extraction of stored water. However, due to the rapid interaction between the aquifer and the surface recharge, it is possible that this storage will recover quickly with extreme events such as El Niño–Southern Oscillation. The main flow outlet of the surface aquifer is the flow transfer to the confined aquifer.

The flow analysis of the confined aquifer shows that the main sources of recharge are the flow transfers from the surface aquifer and in less quantity the flow transfers from the Alto Piura aquifer. Since the confined aquifer has the greatest pumping rate and the recharge is not covering this volume of water extractions, water is being extracted from the storage, being able to observe in the graphs an increase in the extraction of stored water proportional to the increase of the exploitation. The confined aquifer is restricted by the aquitard and consequently the recharge process is much slower, so that the constant extraction of stored waters is reflected in hydraulic heights decreases that lead to an increase in operating costs and possible problems of pollution by marine intrusion due to the boundary with the ocean.

The modeling and analysis carried out in this work seeks to establish the first approximations towards a better knowledge and understanding of the aquifer of the Valle Medio y Bajo Piura, being necessary that the authorities involved in the water resources management elaborate studies that allow to reduce the uncertainty associated to the model and in this way can be developed models with greater robustness that are useful for decisions. It is not possible to manage an underground resource, if it is not known its sources of recharge, the flow regime of the water and the limits of exploitation that allow a sustainable use of it.

Palabras clave español: Aguas subterráneas, modflow, acuífero, hidrogeología

Palabras clave valenciano: Aigües subterrànies, modflow, Aqüífer, Hidrogeologia

Palabras clave inglés: Groundwater, modflow, aquifer, hydrogeology

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivo general	2
1.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Descripción del área en estudio	2
1.3.1.	Ubicación política	3
1.3.2.	Ubicación hidrográfica.....	5
2.	CARACTERIZACION DEL ÁREA EN ESTUDIO	6
2.1.	Características climáticas	6
2.2.	Hidrología Superficial	9
2.3.	Geomorfología.....	12
2.4.	Geología.....	13
2.4.1.	Rocas intrusivas	14
2.4.2.	Rocas metamórficas	15
2.4.3.	Rocas Volcano Sedimentarias.....	15
2.5.	Hidrogeología	18
2.6.	Explotación de las Aguas Subterráneas.....	21
2.7.	Calidad del Agua Subterránea	25
2.8.	Recargas potenciales del acuífero	27
2.9.	Superficie Piezométrica	30
3.	ESTADO DEL ARTE	32
3.1.	Modelación matemática del flujo subterráneo.....	32
3.1.1.	Ecuación del flujo de aguas subterráneas	33
3.1.2.	Modelo de flujo en diferencias finitas MODFLOW.....	37
3.1.3.	Métodos de calibración	42
3.2.	Antecedentes del área de estudio.....	43
3.2.1.	Modelo del Servicio Geológico Checo	44
3.2.2.	Modelo de la Autoridad Nacional del Agua	48
3.2.3.	Síntesis y Conclusiones	56
4.	PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO	58
4.1.	Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	58
4.2.	Modelo Hidrogeológico Numérico	60
4.2.1.	Discretización del modelo	61
4.2.2.	Condiciones iniciales	62
4.2.3.	Parámetros hidráulicos.....	62
4.2.4.	Red Piezométrica.....	66
4.2.5.	Condiciones de contorno	68
4.2.6.	Recarga	70
4.2.7.	Extracciones de Bombeos	71
5.	CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO	73
5.1.	Calibración en régimen estacionario.....	73
5.2.	Resultados del modelo en régimen estacionario	76
5.3.	Calibración en régimen transitorio.....	81
5.4.	Resultados del modelo en régimen transitorio.....	88
5.5.	Análisis de sensibilidad.....	97
5.6.	Incertidumbres y limitaciones del modelo	100
6.	CONCLUSIONES	102
7.	RECOMENDACIONES Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	105
8.	REFERENCIAS BILIOGRAFICAS.....	106

Relación de Tablas

Tabla 1. Temperatura media mensual °C (1972 – 2013).....	7
Tabla 2. Humedad relativa media mensual % (1972 – 2013).	7
Tabla 3. Precipitación mensual total mm (1972 – 2013).	9
Tabla 4. Evaporación mensual total mm (1972-2013).	9
Tabla 5. Caudales históricos medios mensuales.	11
Tabla 6. Clasificación de la geología de la zona de estudio.	18
Tabla 7. Valores teóricos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad de drenaje.	21
Tabla 8. Inventario de pozos de bombeo según distrito.	23
Tabla 9. Volúmenes históricos de explotación del acuífero (Hm ³ /año).....	23
Tabla 10. Valores iniciales de los parámetros hidráulicos del modelo.	64
Tabla 11. Registros de la red piezométrica de la ANA entre los años 2004 - 2014.	67
Tabla 12. Límites y resultados de calibración automática con PEST para conductividades hidráulicas.	74
Tabla 13. Balance de flujo del modelo estacionario.....	81
Tabla 14. Calibración prueba y error de rendimiento específico, almacenamiento específico y porosidad.	83
Tabla 15. Valores medios de flujos del modelo en régimen transitorio del periodo 2004 – 2014.	94
Tabla 16. Análisis de sensibilidad en régimen estacionario de parámetros y variables de entrada.	98

Relación de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación general del área de estudio.	3
Figura 2. Ubicación política de la zona de estudio delimitada con líneas rojas punteadas.	4
Figura 3. División hidrográfica de las cuencas de la Región Piura.	5
Figura 4. Límites y características hidrográficas de la zona de estudio.	6
Figura 5. Temperatura media mensual °C (1972 – 2013).	7
Figura 6. Humedad relativa media mensual % (1972 – 2013).	8
Figura 7. Precipitación mensual total mm (1972 – 2013).	8
Figura 8. Evaporación mensual total mm (1972 – 2013).	9
Figura 9. Hidrología superficial de la zona de estudio.	10
Figura 10. Esquema Estaciones Hidrométricas del Río Piura.	11
Figura 11. Geología del área de estudio.	14
Figura 12. Conceptualización de los estratos del acuífero Zapallal.	19
Figura 13. Extensión potencial del acuífero Zapallal, polígono sombreado azul.	20
Figura 14. Inventario de pozos de bombeo del acuífero superior al año 2014.	24
Figura 15. Inventario de pozos de bombeo del acuífero inferior al año 2014.	25
Figura 16. Conductividad eléctrica del acuífero libre (superior) y acuífero confinado (inferior).	27
Figura 17. Escenario de recarga probable según Servicio Geológico Checo.	28
Figura 18. Juntas de usuarios y tasas de aplicación de riego promedio.	29
Figura 19. Ubicación de los piezómetros del acuífero superior y profundo.	30
Figura 20. Superficie de altura hidráulica del acuífero libre (1967, 1967) y acuífero confinado (2005, 2008).	31
Figura 21. Superficie de altura hidráulica del acuífero libre y acuífero confinado (2004).....	32
Figura 22. Esquema de un volumen de control para acuífero confinado (izquierda) y libre (derecha).	34
Figura 23. Malla de diferencias finitas centrado en bloques (superior) y centrado en malla (inferior).	36
Figura 24. Malla de elementos finitos.	37
Figura 25. Discretización hipotética del sistema acuífero.	39
Figura 26. Representación de celdas adyacentes de la celda (i, j, k).	40
Figura 27. Esquema del flujo entre los nodos i, j, k y i, j-1, k.	40
Figura 28. Escenarios de las fuentes de agua subterránea del acuífero inferior (señalados con color violeta)...	46
Figura 29. Condiciones iniciales (izquierda) y condiciones de contorno (derecha). Modelo numérico ANA.	50

Figura 30. Distribución espacial de conductividad hidráulica en la Capa 1.	51
Figura 31. Gráfica de dispersión de los resultados de la calibración a régimen estacionario.....	52
Figura 32. Resultado del balance hídrico de masa—IN vs. OUT (m ³ /d).	52
Figura 33. Curvas hidroisohipsas y dirección de flujo – Set. 2004.	53
Figura 34. Resultados de altura hidráulica en régimen transitorio (Zona Alta, Media y Baja).	55
Figura 35. Modelo 3D del Acuífero del Medio y Bajo Piura.....	59
Figura 36. Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico del VMBP.	60
Figura 37. Discretización del modelo del VMBP.....	61
Figura 38. Condiciones iniciales en régimen estacionario para capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).	62
Figura 39. Zonificación de parámetros hidráulicos del modelo.	65
Figura 40. Distribución espacial de los parámetros iniciales del modelo.	65
Figura 41. Codificación de la red piezométrica del acuífero inferior y superior.	66
Figura 42. Condiciones de contorno del acuífero superior (izquierda) y acuífero inferior (derecha).	68
Figura 43. Caracterización del río y lagunas en el modelo.....	69
Figura 44. Distribución espacial de la recarga efectiva para el modelo en estado estacionario.	70
Figura 45. Variación anual de la recarga efectiva para el modelo en estado transitorio.	71
Figura 46. Volúmenes diarios de bombeo en acuífero superficial y confinado en el año 2004.....	72
Figura 47. Volúmenes diarios de bombeo en acuífero superficial y confinado en el año 2014.....	72
Figura 48. Conductividad hidráulica calibrada en el modelo en régimen estacionario.	75
Figura 49. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen estacionario.....	75
Figura 50. Análisis estadístico de alturas hidráulicas observadas vs calculadas en régimen estacionario.....	76
Figura 51. Alturas hidráulicas resultantes del modelo en régimen estacionario.	77
Figura 52. Representación esquemática de los flujos de capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).	78
Figura 53. Esquema de balance de flujos del modelo en régimen estacionario.....	79
Figura 54. Representación de los flujos de entrada y salida de la capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).	80
Figura 55. Representación de los flujos de entrada y salida total del modelo.	80
Figura 56. Variación anual de la recarga efectiva para el modelo en estado transitorio.	82
Figura 57. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen transitorio.....	84
Figura 58. Análisis estadístico de alturas hidráulicas observadas vs calculadas en régimen transitorio.....	85
Figura 59. Piezómetros representativos para la evaluación de la calibración en régimen transitorio.	85
Figura 60. Calibración en régimen transitorio de piezómetros representativos de la Capa1.	86
Figura 61. Calibración en régimen transitorio de piezómetros representativos de la Capa2.	87
Figura 62. Alturas hidráulicas resultantes del modelo en régimen transitorio de la capa1.....	88
Figura 63. Alturas hidráulicas (msnm) resultantes del modelo en régimen transitorio en la capa2.....	89
Figura 64. Representación esquemática de flujos de la capa1 en régimen transitorio.....	90
Figura 65. Representación esquemática de flujos de la capa2 en régimen transitorio.....	92
Figura 66. Esquema de balance de flujos del modelo en régimen transitorio.	93
Figura 67. Flujos de la capa1, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.....	95
Figura 68. Flujos de la capa2, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.....	96
Figura 69. Flujos totales, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.....	96

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas adquieren gran importancia en zonas donde los recursos hídricos superficiales son de difícil acceso o limitados, siendo un componente de vital importancia en el desarrollo socio económico de las regiones. Según la USGS, las aguas subterráneas representan un 30.1 % del agua dulce disponible en el planeta y las aguas superficiales apenas el 0.3% (U.S. Geological Survey, 2017). Esta gran diferencia en la disponibilidad del recurso hídrico, se ve reflejada en el incremento exponencial de las explotaciones de aguas subterráneas en las últimas décadas. En consecuencia, adquiere gran importancia comprender y analizar los recursos hídricos subterráneos, con el objetivo de caracterizarlos cuantitativa y cualitativamente, a fin de gestionar una explotación sostenible y sustentable del agua disponible en el subsuelo.

El área de estudio corresponde al Valle Medio y Bajo Piura VMBP, valle agrícola ubicado en la parte baja de la Cuenca Piura, departamento Piura - Perú. Se caracteriza por un clima tropical árido a semiárido, con temperaturas medias de 24 °C y precipitaciones promedio anuales inferiores a los 200 mm, pudiendo presentarse periodos lluviosos extraordinarios relacionados con la corriente cálida de El Niño/Southern Oscillation (ENSO) en los meses de verano (diciembre – marzo), alternando con periodos secos con una marcada influencia de la corriente Fría de Humboldt que abarca el resto del año, caracterizado por fuertes vientos y bajas temperaturas.

Se tiene registro de los volúmenes de explotación de aguas subterráneas en el VMBP desde el año 1980, dicha explotación ha ido incrementando con el desarrollo poblacional y agropecuario de la zona. El VMBP es un valle principalmente agrícola, siendo abastecido por las aguas del sistema hidráulico Chira-Piura, mediante una red de canales que nace en la Represa Los Ejidos. La demanda agropecuaria y poblacional es complementada con extracciones de aguas subterráneas, las cuales se duplicaron entre los años 1980 a 2014. Sin embargo, los estudios del acuífero realizados hasta la fecha, se limitan a presentar la evolución de volúmenes de explotación, niveles piezómetros y calidad del agua, presentando serias deficiencias en el análisis de su funcionamiento y circulación de flujo. Con este trabajo se busca sistematizar esta información y conceptualizar un modelo numérico que reproduzca el comportamiento observado del sistema mejor que los intentos de modelación llevados a cabo anteriormente.

1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es construir un modelo que represente mejor la realidad para analizar y simular el comportamiento del flujo de aguas subterráneas en el VMBP, en el departamento de Piura - Perú, mediante la construcción de un modelo numérico hidrogeológico de diferencias finitas.

1.2. Objetivos específicos

- Construcción de un modelo numérico hidrogeológico de diferencias finitas que reproduzca adecuadamente las observaciones de las que se dispone en el acuífero (fundamentalmente niveles piezómetros).
- Conocer el comportamiento hidráulico de las aguas subterráneas en el VMBP.
- Comparar los resultados obtenidos con modelos numéricos hidrogeológicos llevados a cabo anteriormente.

1.3. Descripción del área en estudio

El área de estudio corresponde al acuífero ubicado en el VMBP, que se extiende a lo largo de la margen izquierda y derecha de la parte media y baja del río Piura. Se considera la parte media y baja del río Piura aproximadamente desde la ciudad de Chulucanas hacia aguas abajo siguiendo el curso del Río Piura.

La **Figura 1** nos muestra las ciudades principales, ríos, lagunas, reservorios y el límite del departamento de Piura. Como se aprecia en la imagen, existen dos ríos principales que desembocan al Océano Pacífico. El río Chira ubicado al norte de la ciudad de Piura, y el río Piura que cruza la ciudad de Piura y todo el VMBP hasta llegar a la Laguna Ramón, Laguna Ñapique y Laguna La Niña. El Río Chira, es de régimen permanente con caudales medios anuales de $98,85 \text{ m}^3/\text{s}$, y el Río Piura es de régimen irregular, con caudales medios anuales de $27,85 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo los usos más significativos el agrícola, poblacional, acuícola e industrial (INCLAM, 2013).

Existen dos reservorios, el Reservorio Poechos y el Reservorio San Lorenzo, siendo el de mayor importancia el Reservorio Poechos, ya que regula la disponibilidad de los recursos hídricos del Valle del Chira y del VMBP, a través de un trasvase que lleva las aguas de la cuenca Chira a la cuenca Piura, por medio del canal Daniel Escobar.

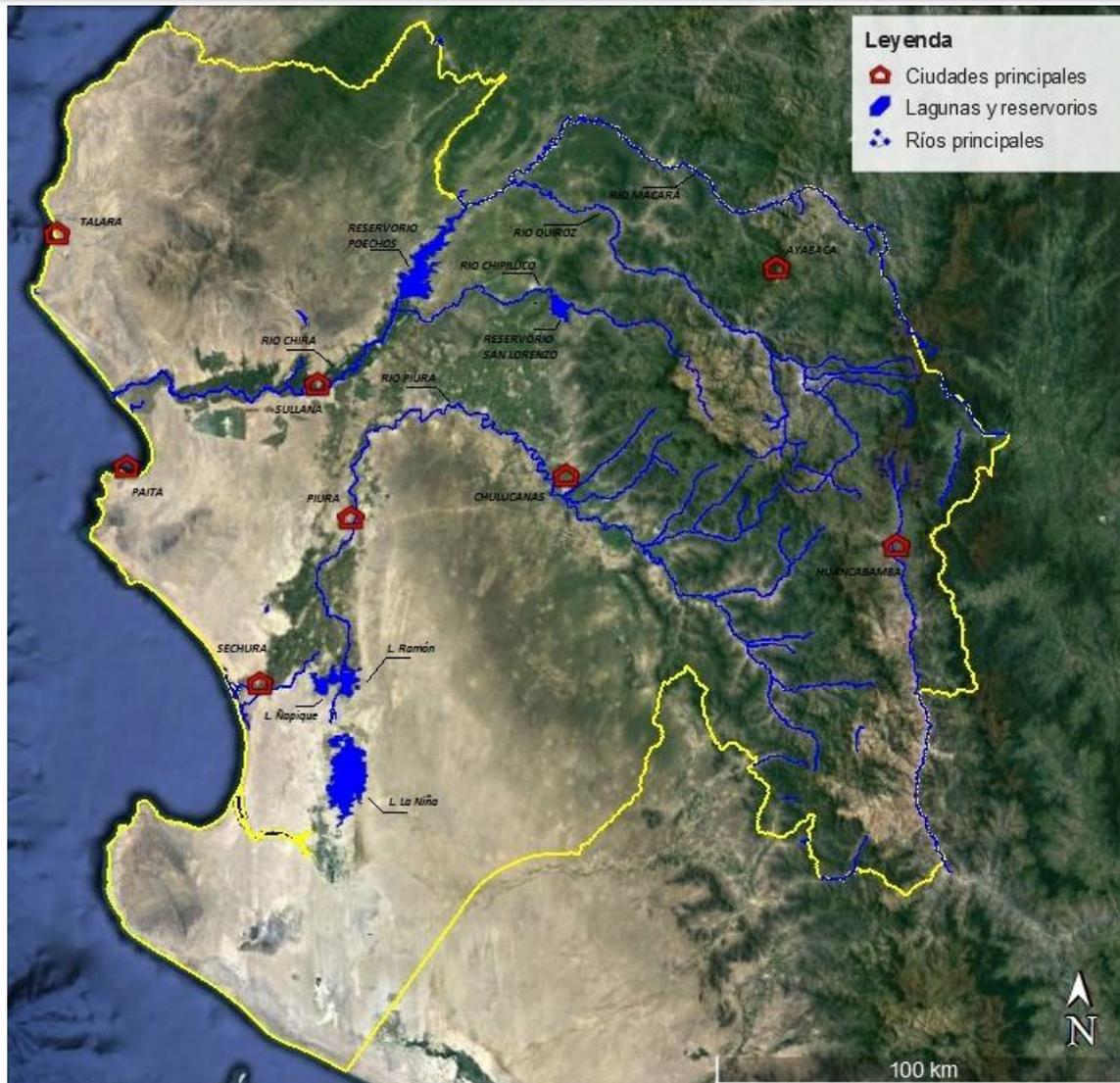


Figura 1. Mapa de ubicación general del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos (Geoservidor MINAM, 2017).

1.3.1. Ubicación política

El VMBP está ubicado en la costa norte del país, en el departamento de Piura, aproximadamente a 1027 km. al norte de la ciudad de Lima, capital del Perú. Políticamente pertenece a las provincias de Piura y Sechura, en el departamento de Piura, cubriendo 15 distritos: Bellavista de La Unión, Bernal, Castilla, Catacaos, Cristo Nos Valga, Cura Mori, El Tallan, La Arena, La Unión, Piura, Rinconada Llicuar, Sechura, Tambogrande, Las Lomas y Vice. Todos estos distritos comprenden el ámbito del VMBP (ver Figura 2).

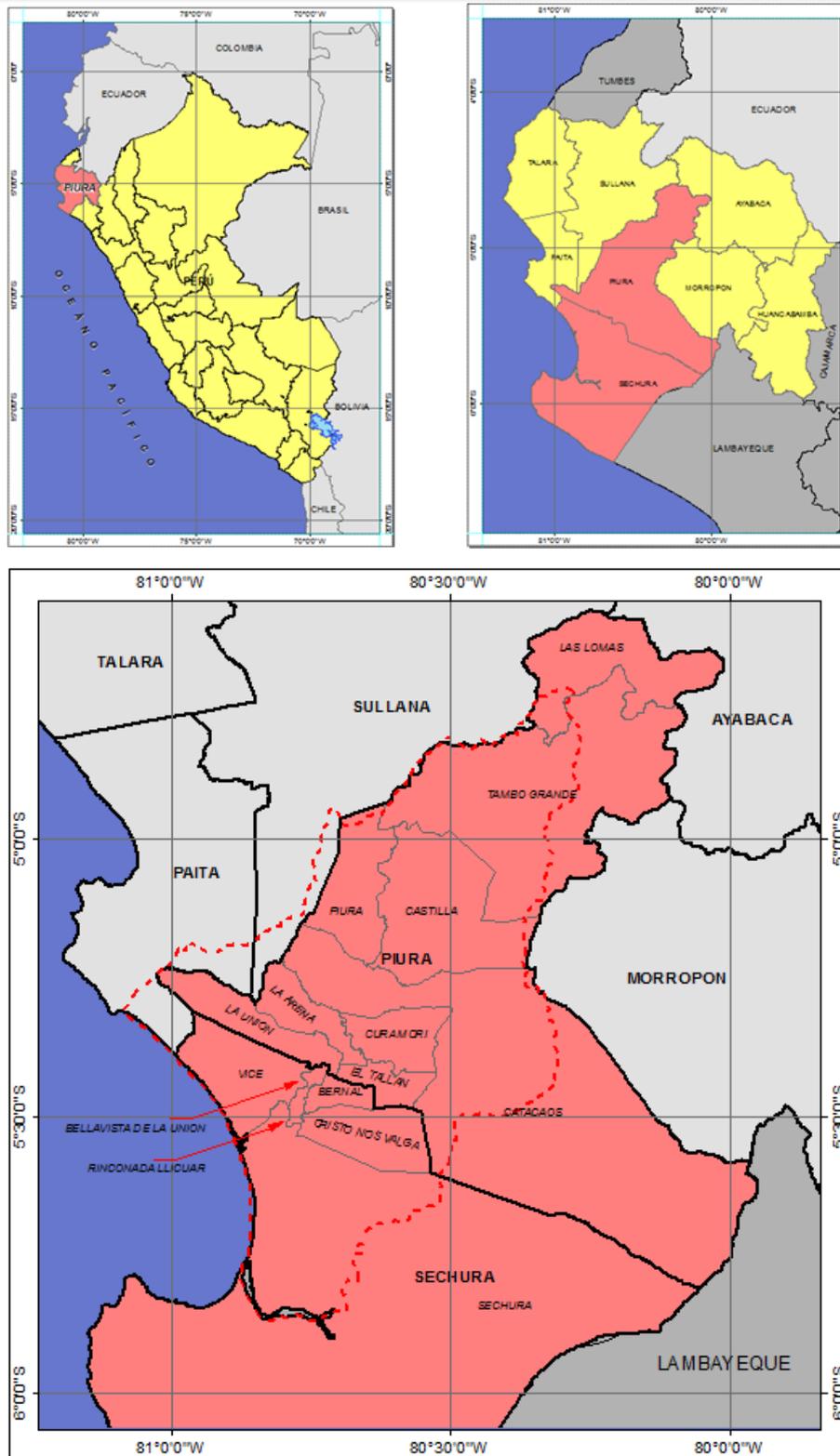


Figura 2. Ubicación política de la zona de estudio delimitada con líneas rojas punteadas.
Fuente: Elaboración propia con datos (Geoservidor MINAM, 2017).

1.3.2. Ubicación hidrográfica

Hidrológicamente el área de estudio pertenece a la parte media y baja de la Cuenca Piura. La zona de estudio se caracteriza por su baja producción hídrica, teniendo lugar la producción hídrica en la parte alta de la cuenca. Como se aprecia en la **Figura 3** y **Figura 4** el VMBP tiene baja a moderada pendiente, caracterizándose por sus extensas llanuras a los lados del Río Piura, que la atraviesa de norte a sur hasta las depresiones que forman las Lagunas Ñapíque, Ramón y La Niña.

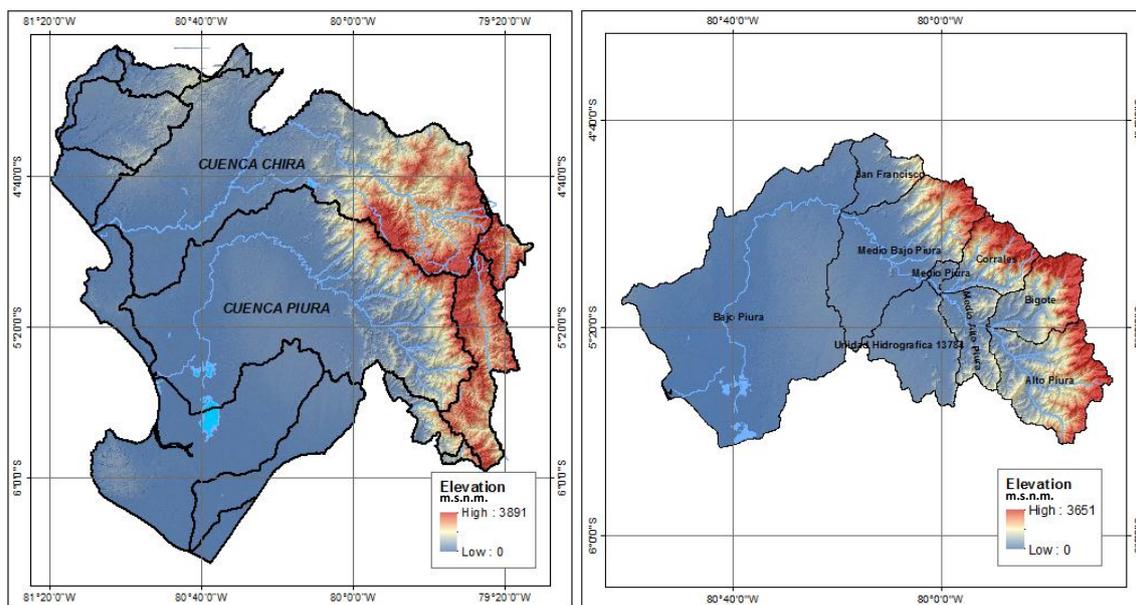


Figura 3. División hidrográfica de las cuencas de la Región Piura.
Fuente: Elaboración propia con datos (Geoservidor MINAM, 2017).

A continuación se presenta los límites de la zona de estudio, esta zona corresponde al área de la Subcuenca Bajo Piura de 5 544.1 km², hasta el límite con el Océano Pacífico, ver **Figura 4**.

El río Piura recorre el valle hasta desembocar en la Laguna Ramón, la cual se conecta con la Laguna Ñapíque y laguna La Niña en eventos extremos.

La quebrada Sechura es un curso de agua intermitente, actualmente desconectados del río Piura. El estuario Virrila es un valle de río que normalmente está inundado por el mar, pero en eventos como el ENSO desagua los flujos provenientes del Río Piura (Servicio Geológico Checo, 2010).

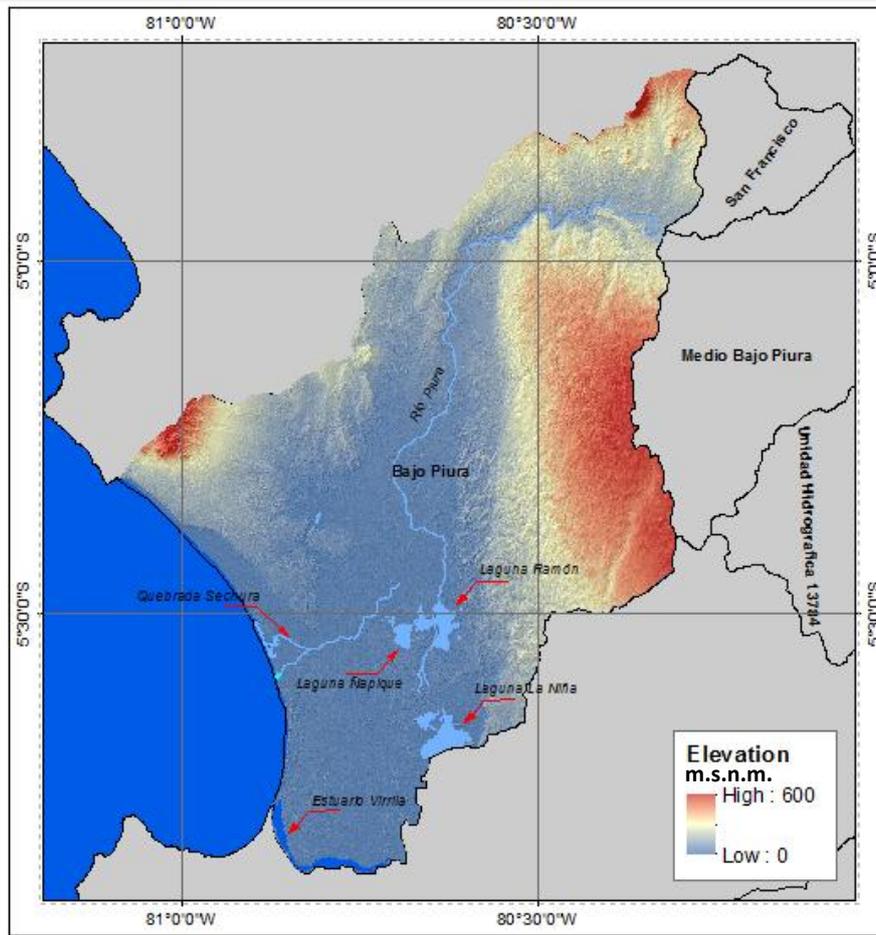


Figura 4. Límites y características hidrográficas de la zona de estudio.
 Fuente: Elaboración propia con datos (Geoservidor MINAM, 2017).

2. CARACTERIZACION DEL ÁREA EN ESTUDIO

2.1. Características climáticas

Para la caracterización climatológica del área de estudio se ha utilizado los datos históricos (1972 – 2013) de la Estación Meteorológica Miraflores ubicada en el distrito de Castilla en la ciudad de Piura. La estación se ubica en la parte central de la Subcuenca Bajo Piura, siendo representativa del clima del VMBP, está ubicada en las coordenadas de latitud $05^{\circ} 10' 00''$ y longitud $80^{\circ} 36' 51''$.

El área de estudio se caracteriza por tener un clima árido, tropical, cálido, húmedo y con bajas precipitaciones. Sin embargo, la presencia del ENSO altera estas condiciones produciendo precipitaciones anuales totales de hasta 2 273 mm en el año 1983 y 1 849 mm en el año 1998, años en los cuales se produjo este fenómeno. Estas precipitaciones extraordinarias producen caudales no tradicionales en los ríos con los consecuentes daños en las obras hidráulicas, áreas agrícolas y poblaciones.

Las temperaturas más altas se observan entre los meses de enero y abril (verano), oscilando entre 24 y 29 °C, el resto del año las temperaturas no presentan marcada variación manteniéndose alrededor de los 20 °C.

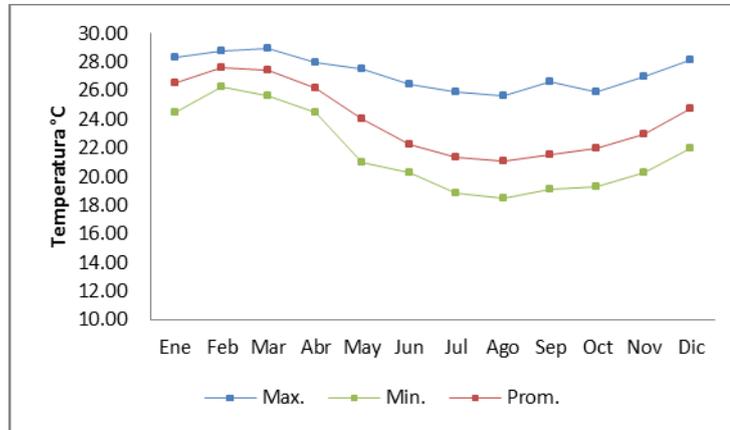


Figura 5. Temperatura media mensual °C (1972 – 2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Tabla 1. Temperatura media mensual °C (1972 – 2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max.	28.30	28.80	29.00	28.00	27.50	26.50	25.90	25.70	26.60	25.90	27.00	28.20
Prom.	26.59	27.62	27.47	26.17	24.04	22.30	21.33	21.12	21.50	21.99	22.95	24.74
Min.	24.50	26.30	25.70	24.50	21.00	20.30	18.90	18.50	19.10	19.30	20.30	22.00

La humedad relativa promedio anual oscila entre 65 % y 74 %. Durante los meses de verano se han registrado humedades relativas mínimas de hasta 57 % que corresponderían a años secos y máximas de hasta 83 % que correspondería a años húmedos. Estas humedades relativas altas son producto de la alta tasa de evaporación del área de estudio.

Tabla 2. Humedad relativa media mensual % (1972 – 2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max.	79.00	74.00	77.00	80.00	82.00	83.00	82.00	80.00	80.00	79.00	76.00	75.00
Prom.	65.93	66.06	67.03	68.13	71.54	74.25	74.16	73.52	71.83	71.35	70.08	68.24
Min.	57.00	56.00	57.00	60.00	60.00	61.00	62.00	65.00	64.00	61.00	61.00	60.00

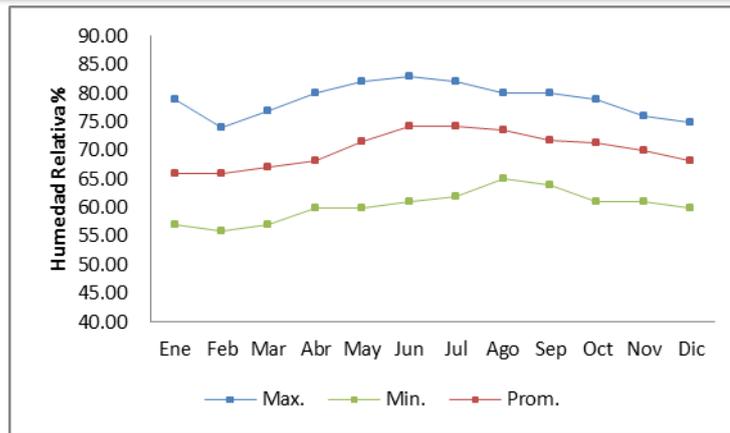


Figura 6. Humedad relativa media mensual % (1972 – 2013).
Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

El área corresponde a la parte baja de la Cuenca Piura, caracterizada por ser una zona semiárida con bajas tasas de precipitación. La precipitación promedio oscila entre 31 y 52 mm en los meses de verano, y entre 0.2 y 10 mm el resto del año. Estos datos corresponden a las medias obtenidas de la evaluación de los años 1972 al 2013, siendo necesario mencionar que existen años en los que la precipitación ha sido nula durante todo el año, como lo refleja la **Tabla 3**.

Las precipitaciones máximas que se presentan en la misma tabla corresponden a los eventos extraordinarios debido a la presencia del Fenómeno del Niño, que tuvieron lugar en los años 1983 y 1998. Por tanto, a excepción de los años con presencia de ENSO, se puede decir que la producción hídrica de la Subcuenca Bajo Piura es escasa o nula, siendo abastecido el valle por las aguas provenientes de las partes alta de las Cuencas Chira y Piura.

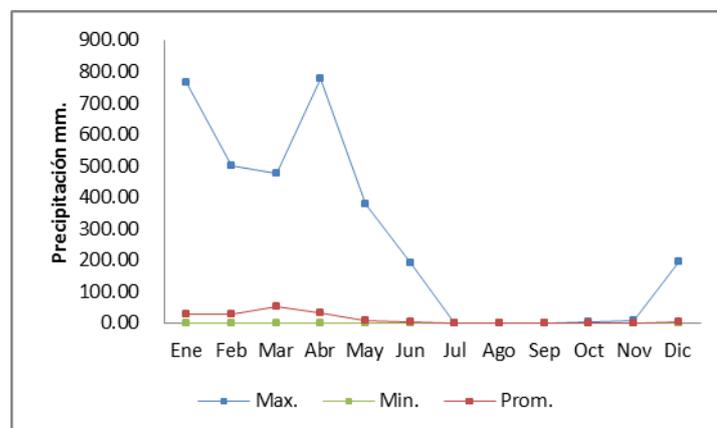


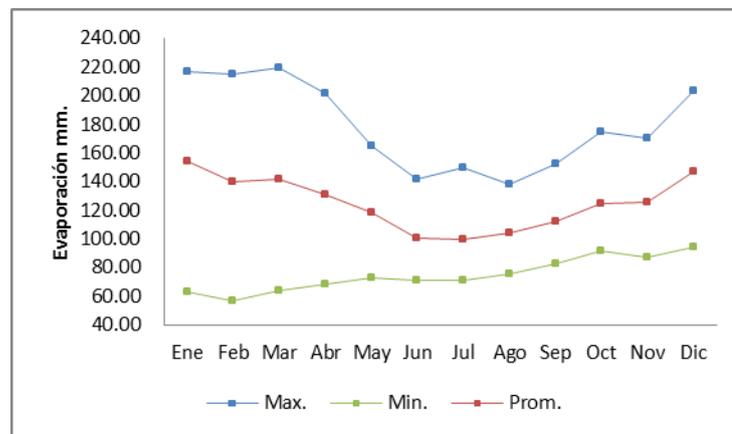
Figura 7. Precipitación mensual total mm (1972 – 2013).
Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Tabla 3. Precipitación mensual total mm (1972 – 2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max.	769.20	501.80	479.90	778.40	379.40	192.40	3.60	1.10	2.60	6.70	8.40	195.50
Prom.	31.29	32.05	52.66	34.47	10.63	4.78	0.20	0.06	0.14	0.69	1.27	7.19
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Las tasas de evaporación mensual total promedio oscilan entre 100 y 154 mm, presentando las evaporaciones más altas durante los meses de verano. Anualmente la evaporación máxima puede alcanzar valores de hasta 2150.5 mm/año, valor muy por encima de las precipitaciones promedio anuales.


Figura 8. Evaporación mensual total mm (1972 – 2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Tabla 4. Evaporación mensual total mm (1972-2013).

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max.	216.80	215.30	219.40	201.80	165.10	141.90	150.00	138.20	152.90	174.80	170.70	203.60
Prom.	154.51	140.31	142.47	131.23	118.82	100.52	100.28	104.11	112.30	124.93	125.95	147.03
Min.	63.00	56.90	64.50	68.30	73.60	71.50	71.00	75.80	83.10	91.90	87.70	94.90

2.2. Hidrología Superficial

El río Piura es el principal componente de la hidrología superficial del VMBP, nace como río Chalpa, de la confluencia de las quebradas Chalpa y Overall, en el distrito de Huarmaca (Huancabamba); luego toma los nombres de río Huarmaca y río Canchaque, adquiriendo el nombre de río Piura desde su confluencia con el río Bigote, hasta desembocar en la laguna Ramón, la cual en crecidas se conecta con las lagunas Ñapique y la Niña. Este recurso, constituye la principal fuente de supervivencia de muchas poblaciones ubicadas en las márgenes a lo largo de su recorrido.

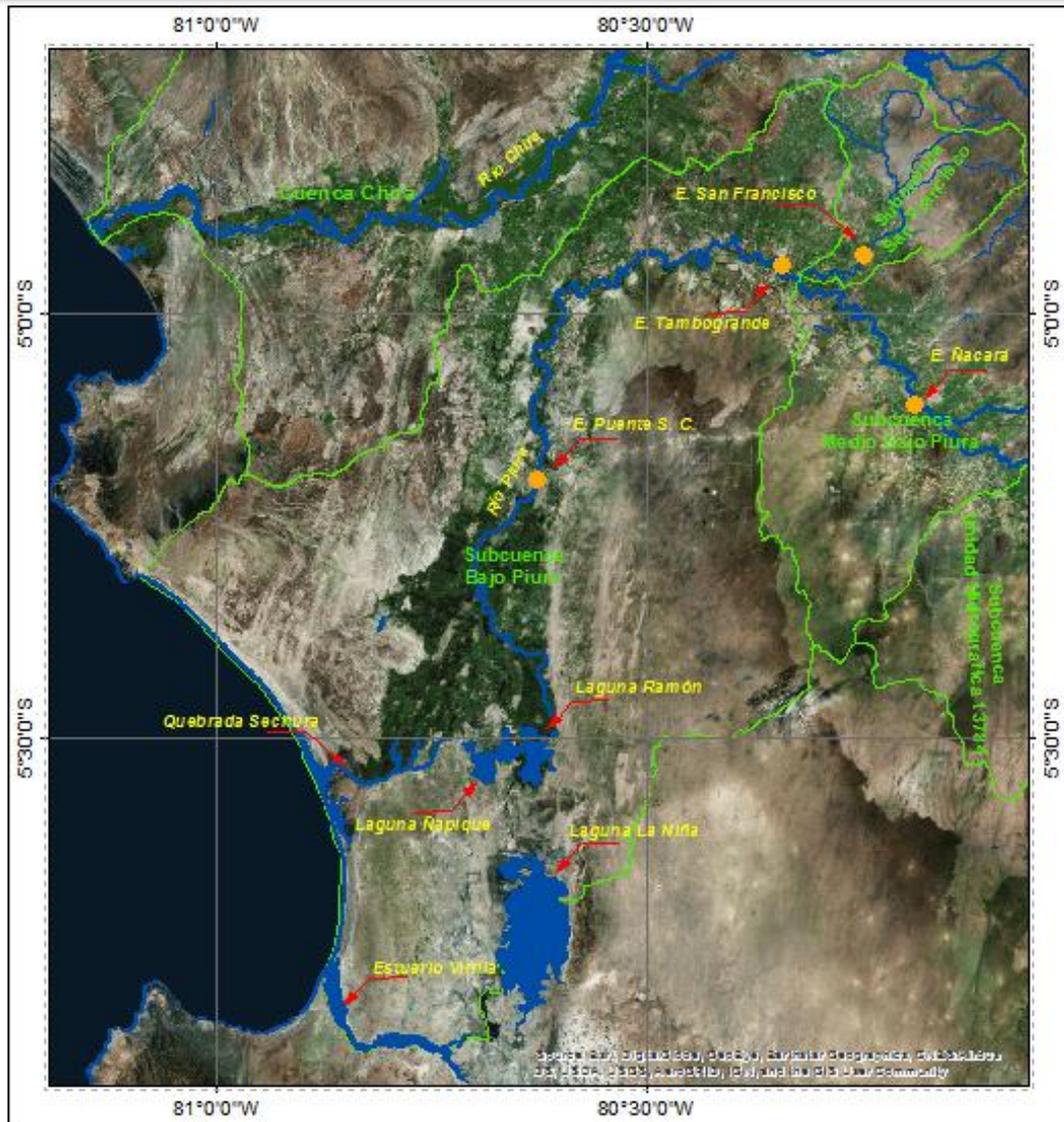


Figura 9. Hidrología superficial de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos (Geoservidor MINAM, 2017).

La configuración hidrológica de la zona de estudio se presenta en la **Figura 9**, como se observa el río Piura atraviesa toda la Subcuenca Bajo Piura con dirección Sur hasta llegar a las lagunas. La quebrada Sechura recibe las aguas de drenaje agrícola de la parte baja del valle. Las lagunas no son estables y llegan a secarse en años secos, dependiendo de las aguas del río Piura, ya que toda la zona pertenece a un clima árido con altas tasas de evaporación. Las lagunas alcanzan su máxima capacidad durante los eventos del Fenómeno del Niño (ENSO), donde el río Piura ha llegado a transportar hasta $4\,424\text{ m}^3/\text{s}$ en el año 1998, medido en la estación hidrométrica del puente Sánchez Cerro. Sin embargo, los años en los cuales no hay presencia del Fenómeno del Niño, los caudales medios mensuales oscilan entre 2.05 y $134.61\text{ m}^3/\text{s}$

entre los meses de noviembre y marzo respectivamente, habiéndose también registrado caudales nulos en años secos (Galecio Castillo, 2004; PNUD, 2000).

Es debido a esta condición intermitente del río Piura que es necesario el trasvase de aguas desde la cuenca del río Chira, de régimen fluvial constante, hacia el río Piura. Esto se hace a través del canal de derivación Daniel Escobar que transvasa un promedio anual de 34.78 m³/s hacia el río Piura. Este caudal se suma al caudal proveniente de la parte alta de la cuenca Piura hasta llegar a la represa Los Ejidos, la cual distribuye el caudal entre la parte baja del río Piura y el canal Biaggio Arbulú que irriga el valle Bajo Piura.

En la **Figura 10** se presenta un esquema de los afluentes y efluentes del río Piura en los tramos donde se cuenta con estaciones hidrométricas, y a continuación en la **Tabla 5** se presentan los caudales promedio mensuales de las estaciones hidrométricas del río y canales intermedios.

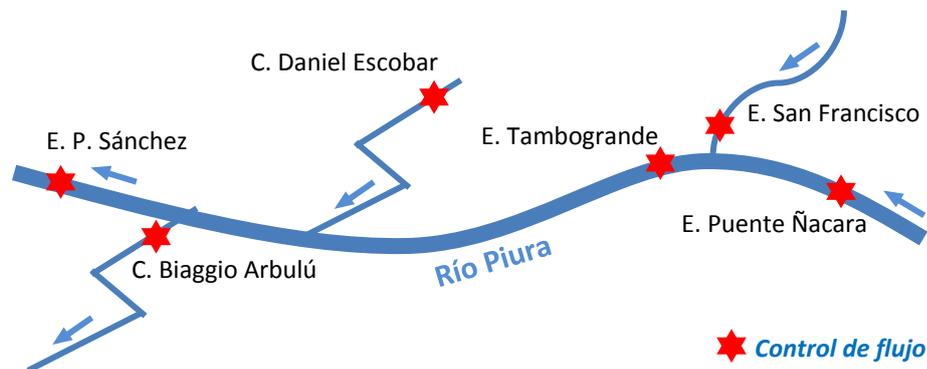


Figura 10. Esquema Estaciones Hidrométricas del Río Piura.

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Tabla 5. Caudales históricos medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Chira – Piura.

Estación de Aforo (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	\bar{x}
Ñacara	5.38	60.42	109.64	71.41	23.30	9.24	3.91	1.37	0.44	0.13	0.09	0.37	23.81
San Francisco	0.35	3.34	1.48	1.40	1.41	0.91	0.63	0.70	0.45	0.30	0.30	0.29	0.96
Tambogrande	5.35	51.93	142.12	106.54	33.41	15.32	8.44	3.88	1.83	1.21	1.31	1.06	31.03
Daniel Escobar	36.14	47.45	48.11	48.90	46.07	34.50	27.56	25.77	26.80	26.60	24.16	25.27	34.78
Biaggio Arbulú	20.57	30.29	32.07	30.93	25.87	12.40	7.70	10.75	14.48	12.99	10.05	10.59	18.23
Puente Sanchez Cerro	10.54	62.38	134.61	96.79	31.13	19.84	12.76	5.89	2.74	2.58	2.05	2.95	32.02

Se observa que entre la Estación Hidrométrica Ñacara y Tambogrande existe un incremento de caudal, que no se justifica solo con las aportaciones de la quebrada San Francisco, por tanto se podría decir que puede existir un flujo del acuífero hacia el río en este tramo. También podemos observar que entre las mediciones de las Estaciones Hidrométricas Tambogrande y Puente Sánchez Cerro existe una pérdida de caudal que podría deberse a que el río se está comportando como perdedor, esta conclusión

concuera con el estudio realizado por el Servicio Geológico Checo, donde se llega a la conclusión que exista una recarga del acuífero en este tramo del río Piura (Servicio Geológico Checo, 2010). Sin embargo, es complicado realizar un balance con fines hidrogeológicos entre los tramos del río donde se tiene datos de aforo, debido a la informalidad y escaso control que se tiene de los volúmenes extraídos y vertidos en el cauce del río Piura.

2.3. Geomorfología

La geomorfología del área de estudio está conformada principalmente de plataforma costanera, llanura costera y cordilleras. A continuación se hace una descripción de las mismas basándose en el boletín publicado en 1994 por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET, 1994).

- **Plataforma Costanera**

Denominada así a la parte de costa o borde litoral hasta los cerros de Amotape y hacia el norte hasta Talara, con ancho variable aproximado de 30 km. Tiene una estructura geológica sedimentaria del cretáceo-terciario, adosada a rocas del basamento Paleozoico. Esta geo forma se debe a eventos tectónicos del subsuelo con levantamientos verticales que han dado lugar a la conformación de terrazas marinas escalonadas conocidas como tablazos (Tablazos Máncora, Talara, Lobitos y Salinas).

- **Llanura Costanera**

Es la zona o superficie plana de carácter desértico que contiene al río Piura en la parte media y baja. Es parte de la cuenca antigua mesozoica rellena con sedimentos correspondientes a las formaciones Máncora, Montera, Zapallal, Miramar y depósitos recientes del cuaternario. Esta unidad está limitada hacia el oeste con la cordillera de la costa y hacia el este por la cordillera occidental andina.

- **Cordilleras**

Se pueden identificar dos cadenas de cordilleras, la cordillera de la costa y la cordillera occidental de los andes. Ambas son de naturaleza rocosa y corresponden a unidades metamórficas, intrusivas y volcánico sedimentarias. Tienen gran variedad de unidades de formación, así como gran diversidad de materiales que las componen. Estas dos unidades geomorfológicas encierran a la llanura costanera y en ella al acuífero del VMBP.

2.4. Geología

La base de la cuenca está formada por rocas metamórficas, esquistos, cuarcitas, filitas y en menor medida paragneis, ortogneis, entre otros. Estas rocas afloran a la superficie en el macizo de Paita, Bayóvar y en las laderas occidentales de los Andes. El relleno de la cuenca está formado por el manto Chira-Verden (Eoceno) que aflora a la superficie al norte de Chira; Montera (Mioceno), Zapallal (Mioceno) que abarca el VMBP, Miramar (Mioceno) en el valle de Chira y Piura; y el manto más alto Tambogrande (Plioceno) en la Subcuenca San Francisco (Servicio Geológico Checo, 2010). Es necesario reconocer la influencia hidro-climatológica que poseen las partes altas del valle del río Piura, San Lorenzo y Olmos, puesto que desde aquéllas zonas es de donde proceden las principales recargas para los cauces superficiales de los valles influentes y de los sistemas acuíferos en investigación, las mismas que se encuentran constituidas por afloramientos de rocas Intrusivas, volcánicas, sedimentarias deformadas y reacomodadas (en función al crecimiento de la Cordillera y el comportamiento plástico-elástico de los macizos rocosos), secuencia que se corta, con razones estructurales, en la zona de costa, que constituye la zona de recepción de todos aquellos cauces de aguas originados en las áreas de recarga de las partes altas de la cuenca, la misma que está cubierta por depósitos de espesores importantes, originados durante el cenozoico y se manifiestan por las Formaciones Montera, Zapallal y los recientes depósitos marinos y fluvio-lacustre-aluviales de bajas etapas de consolidación y evidentemente conformando los medios que por sus características hidráulicas constituyen los sistemas acuíferos de distribución regional en el VMBP (ANA-DCPRH, 2015).

El acuífero del VMBP se ubica entre el distrito de Tambogrande y la desembocadura del Río Piura en el mar, son sumamente escasos los afloramientos rocosos debido a la intensa cobertura de depósitos de origen eólico y fluvial. El acuífero está en las inmediaciones de la planicie del desierto Sechura, es parte de una cuenca antigua del mesozoico y entre los afloramientos rocosos de la cordillera de la costa y las estribaciones de la cordillera occidental de los andes del Noroeste peruano (ANA-DCPRH, 2015).

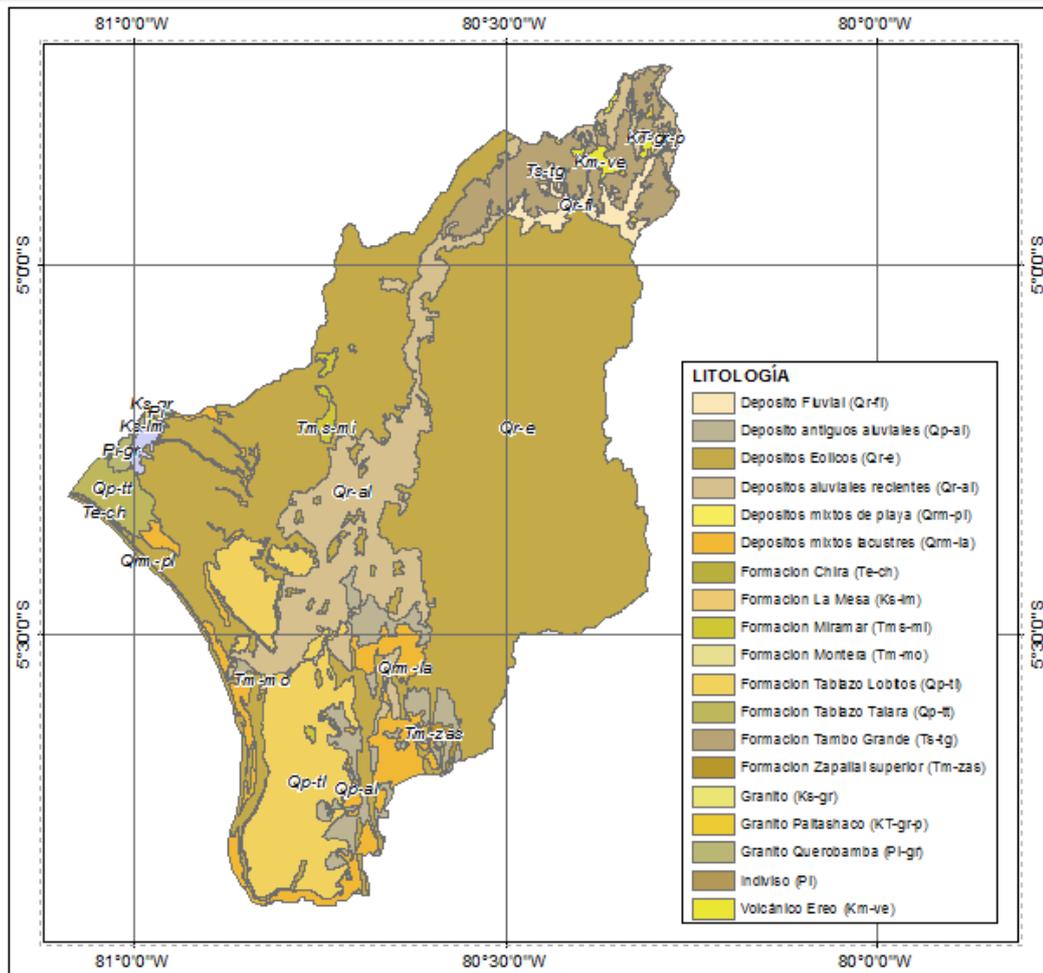


Figura 11. Geología del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos (GEOCATMIN, 2017).

En 1963 mediante el empleo de geofísica fue determinado que la cubierta cuaternaria entre Piura y Sechura (Bajo Piura) tenía potencias sólo de pocos metros (Helberg Arce, 2011). Los depósitos terciarios, con los cuales están relacionados los más importantes depósitos de agua, subyacen los materiales cuaternarios (Bolzicco et al., 2013). Sin embargo, la geometría y extensión de los depósitos terciarios no ha sido definida aun por la falta de información estratigráfica en el valle.

2.4.1. Rocas intrusivas

- **Granito Paltashaco (KT-gr-p)**

Es una roca de textura granular porfirítica constituido por cuarzo, ortosa, plagioclasas y biotita con epidota. En las zonas de mayor humedad se altera a suelos arcillosos con granos de cuarzo de colores crema amarillento y en las zonas secas es afectado por una disgregación granular cuarzo-feldespática

friable y de aspecto terroso que se aprecia en los cortes naturales y/o caminos de la sierra.

- **Granito Querobamba (Pi-gr) y Granito (Ks-gr)**

Son cuerpos plutónicos del paleozoico inferior, se les ubica en los cerros Amotape e Illescas. Se caracterizan por ser de grano medio a grueso y por acción de tectonismo presentan en algunas zonas una gneisificación incipiente. Por efecto de meteorización se disgregan en arenas gruesas cuarzo feldespáticas, son rocas gris rosadas a verduscas según la predominancia de los minerales que la componen y en forma particular de cada zona donde están expuestas. Son consideradas del paleozoico inferior y superior, están afectando a la serie metamórfica indivisa.

2.4.2. Rocas metamórficas

- **Indiviso (Pi)**

Son parte del zócalo pre-cambriano en el macizo de Illescas, son rocas de ortogneises tonalíticos de color grisáceo con característico bandeamiento compuestas por micas (biotitas) hornablendas principalmente, en conjunto es moteado con feldespatos, de aspecto plutónico, son de buena compacidad e impermeabilidad.

2.4.3. Rocas Volcano Sedimentarias

- **Volcánico Ereo (Km-ve)**

Son rocas volcánicas mesozoicas ubicadas en Tambogrande, la localidad típica es el cerro El Ereo al Norte de Tambogrande. Se compone de lavas andesitas, brechas, basaltos olivínicos. Suprayace al grupo San Pedro e subyace al volcánico la Bocana por lo que es considerada del Albiano inferior a medio.

- **Formación La Mesa (Ks-lm)**

Se le ubica al Sureste de Paita, en el límite entre Piura y Paita, compuesta por calizas masivas de color gris claro y gradan a areniscas gris verdosas, limolitas pardo amarillentas. Por la fauna encontrada se le considera de edad del cretáceo superior.

- **Formación Chira (Te-ch)**

Aflora a lo largo del río Chira, siendo las localidades típicas: Tamarindo, Amotape, Vichayal, hacia el norte se extienden hasta Talara. Está conformada por lutitas bentónicas laminadas de tonalidades oscuras, areniscas intercaladas con lutitas micáceas, la parte media está compuesta sólo por areniscas de grano grueso con horizontes conglomerados. El espesor de esta formación varía de 600 a 1300 m. La edad de acuerdo a la fauna es del Eoceno Superior.

- **Formación Miramar (Tms-mi)**

Aflora en el área de Bayóvar, su sección típica está debajo de los tablazos cerca de la localidad de Miramar entre Sechura y La Unión, también en Paita y el valle del río Chira. La base de la formación consiste de un conglomerado que está constituido por areniscas arcósicas, arenas sin cohesión y areniscas tobáceas abigarradas. La parte superior son areniscas coquinas de grano fino en matriz areno arcillosa. El espesor varía entre 400 y 800 m. La edad de acuerdo a la fauna es del Mioceno superior.

- **Formación Montera (Tm-mo)**

Aflora en la quebrada Montera, (macizo de Illescas), en los acantilados marinos del área de Bayóvar y en la ciudad de Sechura, está compuesta de bancos gruesos de areniscas amarillo grises a grises-beige. Son areniscas poco consolidadas y horizontes lenticulares de conglomerados, en la parte media está compuesta de alternancia de areniscas microconglomeradas, ocurren interposiciones de conglomerados conchíferos. La parte superior son paquetes gruesos de conglomerados rojizos, cuarcitas, areniscas tobáceas, así como por calizas descarbonatadas, en Sechura afloran areniscas calcáreas. El grosor es entre 60 y 218 m. La edad considerada es del Mioceno inferior.

- **Formación Zapallal Superior (Tm-zas)**

Es la secuencia de mayor grosor y extensión regional, se diferencian dos miembros: miembro inferior compuesto por diatomitas tobáceas, fosfatos entre 35 y 43 m. con diatomitas y paquetes de tobas diatomáceas blandas de tonos grises. El miembro superior se compone de diatomitas yesíferas en donde se han distinguido 5 horizontes: areniscas hueco de almejas, zona mineralizada cero, diatomita Inca, zona mineralizada Minerva, Diatomita Quechua, y diatomita Estéril. La edad de acuerdo a la flora fósil - clase diatomácea, se le

considera del mioceno inferior a medio y se le correlaciona con la formación Zorritos, Cardalitos, y formación Pisco.

- **Formación Tambo Grande (Ts-tg)**

Está expuesta en el sector de Tambogrande, está conformada por areniscas semi consolidadas blanco grisáceas, intercalados por cenizas dacíticas, areniscas tobáceas, lodolitas grises y microconglomerados. Su edad se le ubica tentativamente en el mio-plioceno y se puede correlacionar con la formación Hornillos del área de Bayóvar.

- **Formación Tablazo Talara (Qp-tt)**

Se exponen en forma de costra sedimentaria con 3 m. de espesor (entre Mórrope hasta la zona de Talara se compone de conglomerados lumaquelos poco consolidados, es de edad pleistocénica.

- **Formación Tablazo Lobitos (Qp-tl)**

Constituye la plataforma más baja y está expuesta en la bahía de Sechura, se extiende desde Paita hasta Lobitos. Es secuencia conglomerádica con rodados subangulosos y matriz arenosa. Es considerada del pleistoceno

- **Depósitos antiguos aluviales (Qp-al)**

Están formando terrazas y llanuras alejadas del curso actual, se componen de conglomerados, arenas, arcillas con espesores inclusive mayores a 10 metros con estratificación lenticular y/o laminados. Pertenecen al Pleistoceno.

- **Depósitos mixtos de Playa (Qrm-pl) y Depósitos mixtos Lacustres (Qrm-la)**

Son los depósitos en fajas angostas de arenas recientes en el litoral del mar y en lagunas, formando cordones litorales y/o marginales.

- **Depósitos eólicos (Qr-e)**

Son acumulaciones de arenas transportadas por el viento y que ocupan extensas áreas de superficie de las pampas entre Sechura y Piura son antiguas y recientes.

Los depósitos antiguos forman gruesos mantos de arena y morfología de colinas cortadas por red fluvial dendrítica, habiendo arbustos fijados e inclusive se han desarrollado árboles. Los depósitos eólicos recientes son erráticos y en ellos no se han desarrollado plantas.

- **Depósitos fluviales (Qr-fl) y Depósitos aluviales recientes (Qr-al)**

Son depósitos compuestos de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas, los cuales son acarreados por las aguas de los ríos y quebradas, depositados por pérdida del poder de transporte de las mismas. Ocupan valles de ríos y quebradas.

Tabla 6. Clasificación de la geología de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos (GEOCATMIN, 2017).

ERA	SISTEMA	SERIE	LITOLOGIA	SÍMBOLO	TIPO ROCA
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Deposito antiguos aluviales	Qp-al	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Formación Tablazo Lobitos	Qp-tl	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Formación Tablazo Talara	Qp-tt	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Deposito Fluvial	Qr-fl	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Depositos aluviales recientes	Qr-al	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Depositos Eólicos	Qr-e	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Depositos mixtos de playa	Qrm-pl	Sedimentaria
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Depositos mixtos lacustres	Qrm-la	Sedimentaria
CENOZOICO	TERCIARIO	EOCENO	Formación Chira	Te-ch	Sedimentaria
CENOZOICO	TERCIARIO	MIOCENO	Formación Miramar	Tms-mi	Sedimentaria
CENOZOICO	TERCIARIO	MIOCENO	Formación Montera	Tm-mo	Sedimentaria
CENOZOICO	TERCIARIO	MIOCENO	Formación Zapallal superior	Tm-zas	Sedimentaria
CENOZOICO	TERCIARIO	SUPERIOR	Formación Tambo Grande	Ts-tg	Sedimentaria
MESOZOICO	CRETACEO	MEDIO	Volcánico Ereo	Km-ve	Sedimentaria
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Formación La Mesa	Ks-lm	Sedimentaria
PALEOZOICO	ORDOVICIANO		Indiviso	Pi	Metamorfica
-	-	-	Granito	Ks-gr	Intrusiva
-	-	-	Granito Querobamba	Pi-gr	Intrusiva
-	-	-	Granito Paltashaco	KT-gr-p	Intrusiva

2.5. Hidrogeología

Desde el punto de vista hidráulico la formación más importante en el VMBP es el acuífero Zapallal, que según Bolzicco se encuentra a más de 100 m. de profundidad y con potencias superiores a los 100 m., con una extensión mayor a 10,000 km² (Bolzicco et al., 2013).

La presencia y espesor del acuífero Zapallal están comprobados por los sondajes eléctricos solamente en el Valle de Piura asumiéndose que termina hacia los bordes de la cuenca, ya que las formaciones terciarias están cubiertas por sedimentos cuaternarios eólicos y fluviales.

El estudio realizado por el Servicio Geológico Checo caracteriza y divide el acuífero Zapallal en 03 estratos:

- **Zona Superior** correspondiente al acuífero libre de espesor aproximado entre 30 y 70 m. Conformado de arenas con intercalaciones de gravas y areniscas. Se puede suponer que la conductividad hidráulica fluctúa entre 8.64 hasta 432 m/d. Se considera que existe una difícil interacción río-acuífero. Presenta valores de conductividad eléctrica altos entre 2 a 8 mS/cm.
- **Zona intermedio**, correspondiente al semi acuitardo de espesor aproximado entre 30 y 70 m. Conformado sobre todo por arcillas y posiciones arenosas de alto contenido de bentonita. Es una formación semi-impermeable.
- **Zona inferior**, correspondiente al acuífero confinado de espesor desconocido. Conformado principalmente de arenas de grano grueso. La conductividad hidráulica fluctúa entre 0.86 hasta 7.78 m/d. Presenta valores de conductividad bajos inferiores a 2 mS/cm.

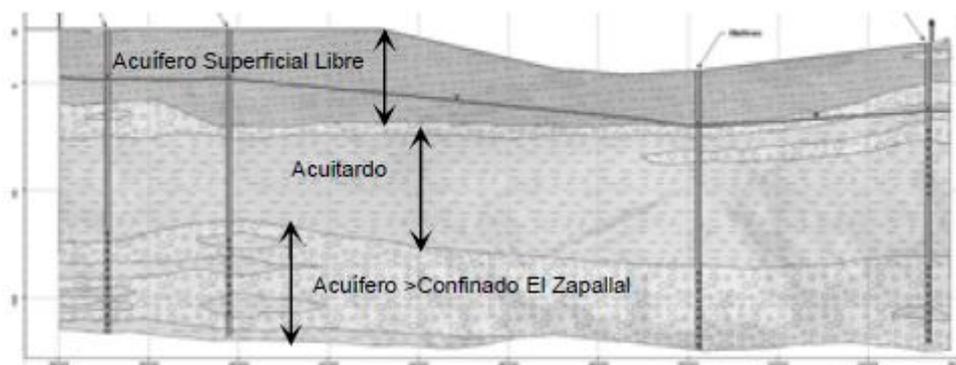


Figura 12. Conceptualización de los estratos del acuífero Zapallal.

Fuente: (Bolzicco et al., 2013)

La Autoridad Nacional del Agua Perú mediante el estudio “*Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del río Piura (VMBP) Estudio Hidrogeológico*”, realizó en el año 2014 sondeos geofísicos que permitieron corroborar los estratos del acuífero en el ámbito de la Subcuenca Bajo Piura. Con el análisis geofísico de estos sondeos se obtuvieron espesores de los estratos similares a los mencionados en el estudio del Servicio Geológico Checo y Bolzicco. Sin embargo no se logró alcanzar el basamento, siendo la potencia del acuífero confinado aún desconocido.

La extensión potencial estimada del acuífero Zapallal, según Arce se presenta en la **Figura 13**, a la actualidad no se tiene constancia de estudios o publicaciones que caractericen consistentemente los límites del acuífero (Helberg Arce, 2011).

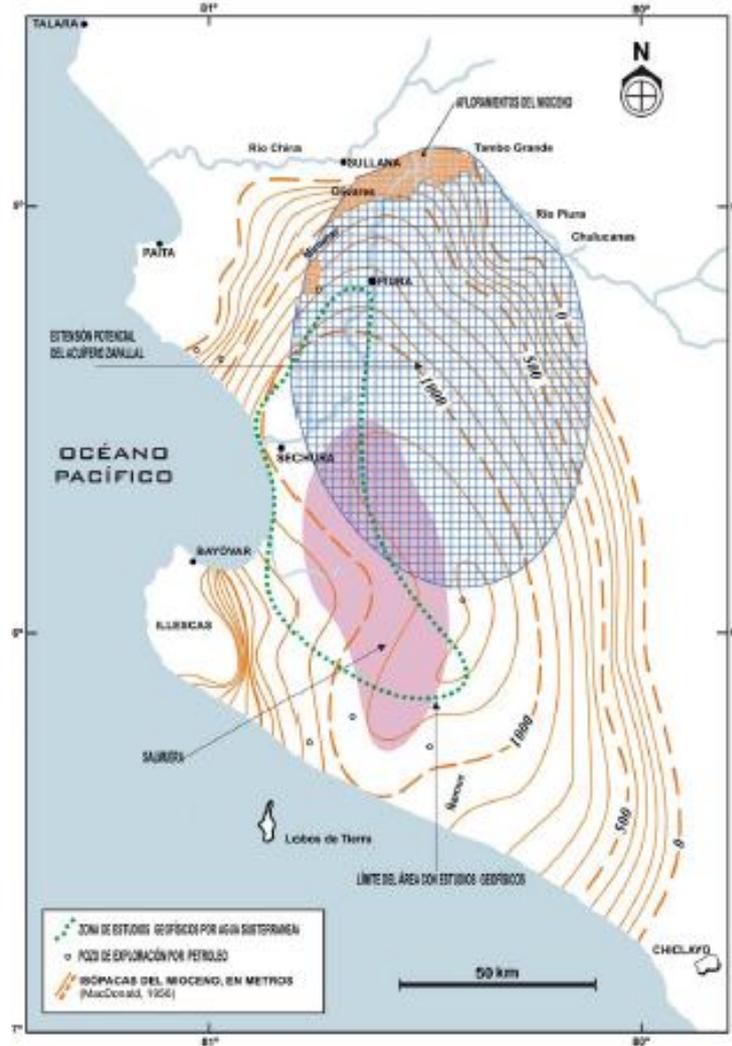


Figura 13. Extensión potencial del acuífero Zapallal, polígono sombreado azul.
Fuente: (Helberg Arce, 2011)

Los flujos del acuífero confinado circulan desde los bordes de la sub cuenca Bajo Piura hacia la parte central de ésta, lo cual se debe al cono de depresión producido por los constantes bombeos principalmente en la ciudad de Piura. En el acuífero superior los flujos circulan de NE a SO hasta el límite con el Océano Pacífico.

En estado sin influencia (sin extracción de agua subterránea), es muy probable que el agua fluyera del acuífero inferior hacia acuífero superior, pero debido al bombeo continuo que ha provocado conos de depresión en el acuífero inferior, puede estar sucediendo lo contrario (Servicio Geológico Checo, 2010).

Finalmente en la **Tabla 7** se presenta los valores teóricos para los parámetros hidráulicos de la geología de la zona de estudio. Estos valores servirán como punto de partida para la construcción del modelo hidrogeológico.

Tabla 7. Valores teóricos de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad de drenaje.

Fuente: Elaboración propia con datos (SEA, 2012).

LITOLOGIA	SIMBOLO	TIPO ROCA	CARÁCTER	K_{min} (m/d)	K_{max} (m/d)	S_{max}	S_{min}	n_d
Depósito antiguos aluviales	Qp-al	Sedimentaria	Acuífero	0.00000001	100.00	0.0001	0.1500	0.15
Depósito Fluvial	Qr-fl	Sedimentaria	Acuífero	0.00000001	1000.00	0.0001	0.1500	0.15
Depósitos aluviales recientes	Qr-al	Sedimentaria	Acuífero	0.00000001	1000.00	0.0001	0.1500	0.15
Formación Chira	Te-ch	Sedimentaria	Acuífero	0.00100000	1.00	0.0001	0.0200	0.21
Formación Miramar	Tms-mi	Sedimentaria	Acuífero	0.00100000	1.00	0.0001	0.0200	0.21
Formación Montera	Tm-mo	Sedimentaria	Acuífero	0.00100000	1.00	0.0001	0.0200	0.21
Formación Tablazo Lobitos	Qp-tl	Sedimentaria	Acuífero	1.00000000	100.00	0.0001	0.1500	0.32
Formación Tablazo Talara	Qp-tt	Sedimentaria	Acuífero	1.00000000	5.00	0.0001	0.1500	0.33
Formación Tambo Grande	Ts-tg	Sedimentaria	Acuífero	0.00100000	1.00	0.0001	0.0200	0.32
Formación Zapallal superior	Tm-zas	Sedimentaria	Acuífero	0.00001000	1.00	0.0001	0.0200	0.14
Depósitos Eólicos	Qr-e	Sedimentaria	Cobertura	1.00000000	100.00	0.0001	0.1500	0.32
Depósitos mixtos de playa	Qrm-pl	Sedimentaria	Cobertura	0.01000000	100.00	0.0001	0.1500	0.25
Depósitos mixtos lacustres	Qrm-la	Sedimentaria	Cobertura	0.01000000	100.00	0.0001	0.1500	0.25
Formación La Mesa	Ks-lm	Sedimentaria	Semi-Impermeable	0.00001000	1.00	0.0001	0.0200	0.21
Indiviso	Pi	Metamorfica	Impermeable	0.00030000	0.03	0.0001	0.0200	0.26
Granito	Ks-gr	Ignea	Impermeable	0.00030000	0.03	0.0001	0.0200	0.26
Granito Paltashaco	KT-gr-p	Ignea	Impermeable	0.00000001	0.03	0.0001	0.0200	0.26
Granito Querobamba	Pi-gr	Ignea	Impermeable	0.00030000	0.03	0.0001	0.0200	0.26
Volcánico Ereo	Km-ve	Ignea	Impermeable	0.00030000	0.03	0.0001	0.0200	0.26

2.6. Explotación de las Aguas Subterráneas

Se tiene registro de las explotaciones del acuífero del VMBP desde el año 1980, mediante inventarios que buscan cuantificar la explotación del acuífero y conocer sus características. Además, desde el año 2004 la Autoridad Nacional del Agua registra los datos de una red piezométrica e hidrogeoquímica, ésta red de monitoreo está compuesta por pozos de bombeo, no siendo piezómetros propiamente dicho.

No se ha encontrado en la bibliografía una clasificación que diferencie qué pozos representan las características del acuífero libre y cuáles del acuífero confinado. Por tanto, basándose en la información bibliográfica que caracteriza a los acuíferos superior e inferior, se ha realizado una clasificación que permita diferenciar entre los pozos correspondientes a cada acuífero, tomando como referencia los datos del último inventario realizado en el año 2014, donde fueron registrados 398 pozos con sus respectivas características hidrogeológicas. Los pozos se clasificaron bajo los siguientes criterios:

Pozos del Acuífero libre (superior)

- Conductividad eléctrica > 2 mS/cm.
- Profundidad del pozo < 80 m.
- Tipo de pozo (Tajo abierto): Los pozos a tajo abierto por lo general corresponden a pozos de poca profundidad y no cuentan con equipos de bombeo.
- Piezometría: Verificación de la relación espacial con la superficie de altura hidráulica de pozos cercanos adyacentes.

Pozos del Acuífero confinado (inferior)

- Conductividad eléctrica ≤ 2 mS/cm.
- Profundidad de pozo ≥ 80 m.
- Tipo de pozo (Tubular): Los pozos de tubulares por lo general tienen profundidades superiores a los 80 m. y cuentan con equipos de bombeo.
- Piezometría: Verificación de relación espacial con la superficie de altura hidráulica de pozos adyacentes.

El análisis consistió en realizar una clasificación tabular en base al cumplimiento de las primeras 03 condiciones. Posteriormente, se evaluó espacialmente la superficie de altura hidráulica generada por los datos seleccionados y se realizaron correcciones en base a la concordancia de la distribución espacial de alturas hidráulicas. Finalmente, se logró clasificar los pozos de bombeo pertenecientes al acuífero superior e inferior. Es necesario mencionar que los 04 criterios en conjunto sirvieron para el análisis y clasificación de los pozos de bombeo, no siendo condicionales estrictos cada uno de ellos por separado.

Se tiene registro del número de pozos de bombeo desde el año 1980 hasta el último inventario realizado en el año 2014. Sin embargo, para la construcción del modelo numérico hidrogeológico se utilizaron los registros tomados desde el 2004 al 2014, debido a que no se pudo acceder a bases de datos de mayor antigüedad.

El estudio de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) realizado en el año 2014 y publicado en el 2015, registró un total de 398 pozos de bombeo con un volumen de explotación total de $58.06 \text{ Hm}^3/\text{año}$, de los cuales se ha podido determinar que un total de 197 pozos estarían explotando el acuífero inferior y 168 el acuífero superior. Los 33 pozos restantes no cuentan con datos que permitan caracterizarlos y en algunos casos ya no se encuentran en funcionamiento (pozos clausurados o enterrados).

En las **Tabla 8** podemos observar que el número de pozos de bombeo que explotan el acuífero se ha duplicado desde el año 1980 al 2014, siguiendo una tendencia ascendente. El incremento de los pozos de bombeo se ve reflejado en los registros de volúmenes de explotación, que también se ha duplicado. Sin embargo, en el inventario realizado en el año 2011 se interrumpe la tendencia ascendente, presentándose una disminución del volumen de explotación, a pesar que el número de pozos incrementó, lo cual podría deberse a deficiencias en la realización del inventario, ya que no se justifica esta variación en el informe correspondiente.

Tabla 8. Inventario de pozos de bombeo según distrito.

Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

Distrito	N° de pozos 1980	N° pozos 2004	N° pozos 2011	N° Pozos 2014
Piura	26	26	40	48
Castilla	30	30	52	71
Catacaos	43	52	62	73
Cura morí	15	19	21	23
El Tallán	5	7	9	11
La Arena	20	27	36	53
La Unión	11	23	29	30
Sechura	10	12	14	52
Bellavista	4	4	7	8
Bernal	6	9	10	9
Cristo Nos Valga		2	6	7
Více	4	4	4	7
Rinconada de Llicuar	4	4	5	6
Total	170	219	295	398

Tabla 9. Volúmenes históricos de explotación del acuífero (Hm³/año).

Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2011, 2012, 2015; INRENA, 2004)

Acuífero	1980 (Hm ³ /año)	2004 (Hm ³ /año)	2011 (Hm ³ /año)	2014 (Hm ³ /año)
Superior	-	1.67	1.54	3.36
Inferior	-	41.6	34.5	54.7
Total	27.01	43.27	36.04	58.06

La explotación del acuífero es principalmente para uso urbano representando un 67.1 % de la explotación total, el uso agropecuario representa el 28.3 % y el uso industrial 4.6 %. La mayor explotación se da en el acuífero inferior por la buena calidad del agua, siendo utilizada para abastecer de agua potable a la población en los centros urbanos. La explotación del acuífero superior se da en menor magnitud en zonas alejadas de los cascos urbanos, estos pozos son de poca profundidad y por lo general no cuentan con equipo de bombeo, siendo usados para uso doméstico o agropecuario en zonas rurales.

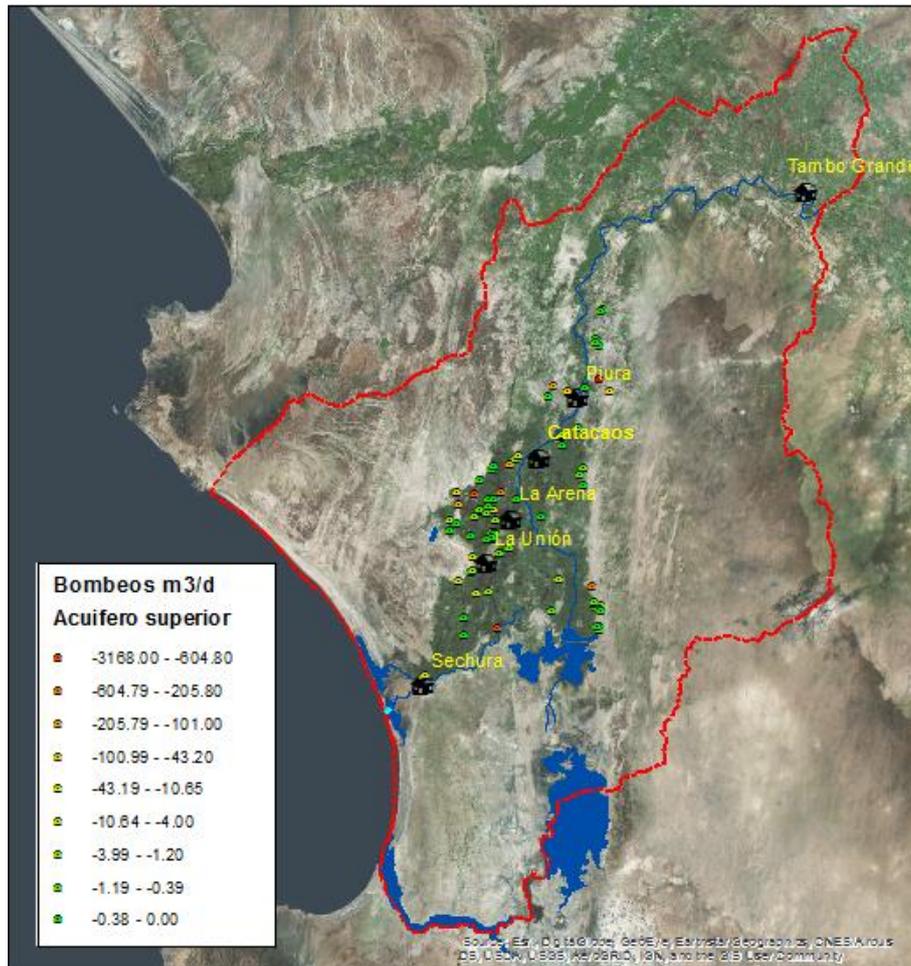


Figura 14. Inventario de pozos de bombeo del acuífero superior al año 2014.
 Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015).

La Figura 14 presenta la distribución espacial de los pozos de bombeo del inventario 2014 en el acuífero superior, las explotaciones varían entre 0 y 3,168 m³/d. Los valores de 0 corresponden a pozos que ya no se encuentran en explotación por estar fuera de servicio. Como se observa, los pozos están distribuidos abarcando la totalidad del valle agrícola del bajo Piura (área verde de la imagen satelital).

En la Figura 15 se presentan los pozos del acuífero inferior, del mismo modo que los pozos del acuífero superior, cubren el área agrícola. Sin embargo, la mayor concentración de pozos se encuentra en la ciudad de Piura. Como ya se mencionó antes esto se debe a que el acuífero profundo es principalmente explotado para abastecimiento de agua potable en zonas urbanas. Los volúmenes de explotación varían entre 0 y 42,336 m³/d.

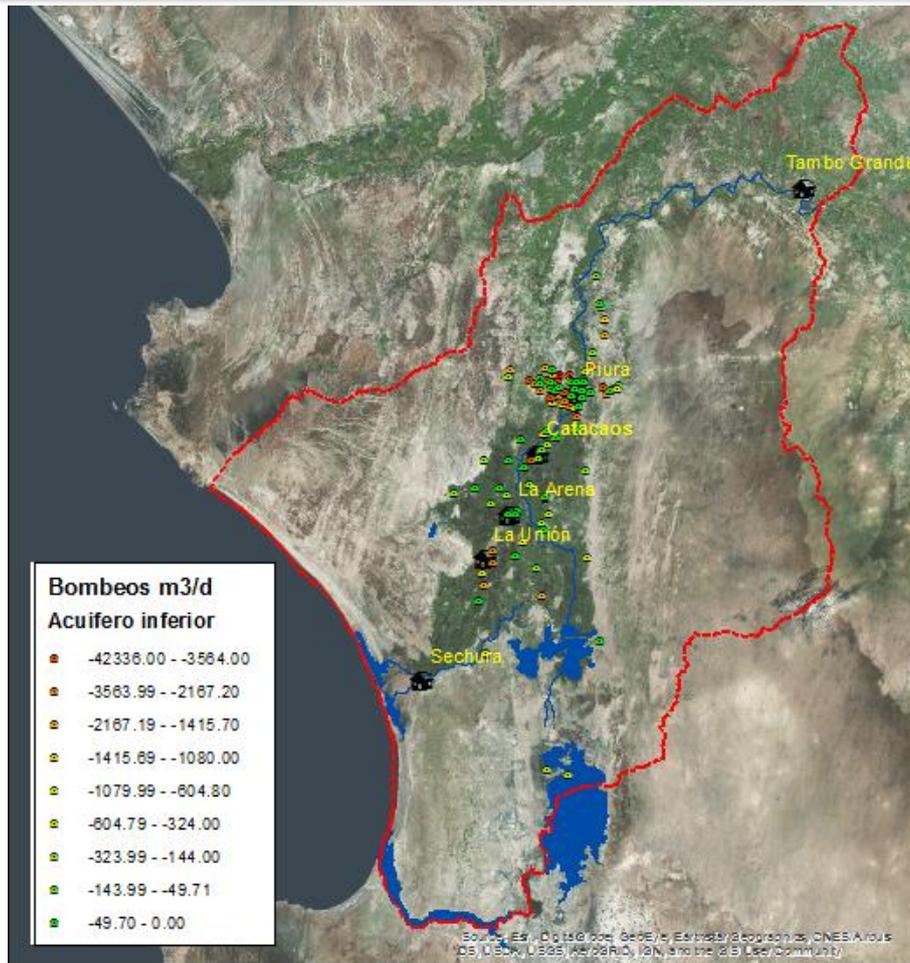


Figura 15. Inventario de pozos de bombeo del acuífero inferior al año 2014.

Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015).

2.7. Calidad del Agua Subterránea

Según Bolzicco el acuífero inferior tendría conductividades eléctricas inferiores a 1.5 mS/cm. Sin embargo, el acuífero superior se caracterizaría por sus aguas de mediocre o mala calidad con conductividades eléctricas entre 1.5 y 8 mS/cm (Bolzicco et al., 2013). El estudio del Servicio Geológico Checo menciona que el acuífero inferior tiene aguas de buena calidad, presentando valores de conductividad eléctrica inferiores a 2 mS/cm (Servicio Geológico Checo, 2010).

La pobre calidad del agua en el acuífero superior podría deberse a las prácticas agrícolas de la zona (riego por inundación) y deficiencia o inexistencia de sistemas de drenaje, lo cual sumado a las altas tasas de evaporación produce la concentración de sales. Esta situación está comprobada por la presencia de suelos degradados en la zona.

El estudio del Servicio Geológico Checo menciona que la alta mineralización del acuífero superior también podría ser causada por la estructura tectónica del valle,

estando el acuífero superior tectónicamente limitado por el banco elevado al norte de las Lagunas Ñapique y Ramón, que se comportaría como una barrera hidráulica impidiendo la circulación del agua y consecuentemente el lavado del acuífero superior (Servicio Geológico Checo, 2010).

Por el contrario, la buena calidad del acuífero inferior podría deberse a un proceso de lavado con agua de mucho menor salinidad, este flujo que recarga al acuífero inferior es probablemente proveniente de la zona del Alto Piura (Helberg Arce, 2011).

En la **Figura 16** se presenta la distribución espacial de las conductividades eléctricas del acuífero en el área donde se cuenta con datos. Podemos observar que los valores en el acuífero superior oscilan entre 0.09 y 11.76 mS/cm., la mineralización se incrementa de este a oeste, observándose conductividades muy altas en pozos específicos, lo cual podría ser indicativo de contaminación puntual del acuífero libre. Por otro lado los valores del acuífero inferior oscilan entre 0.20 y 2.32 mS/cm. y se puede observar una distribución más uniforme del parámetro. En la ciudad de Piura donde se realiza un bombeo intensivo del acuífero inferior para uso urbano se puede observar que las conductividades eléctricas son inferiores a 1 mS/cm. posiblemente por la continua circulación de flujo en el área. Sin embargo, al oeste cerca del centro urbano de La Unión se pueden observar que los valores se encuentran alrededor de 2 mS/cm. Según Bolzicco, esto podría deberse a la calidad deficiente en la construcción y diseño de los pozos de explotación, habiéndose identificado sitios en los que se ha puesto en comunicación el acuífero superior e inferior (Bolzicco et al., 2013). Además, esta zona es parte del área agrícola irrigada con riegos por inundación que podría estar influyendo en la mineralización del acuífero inferior, a través del acuífero superior.

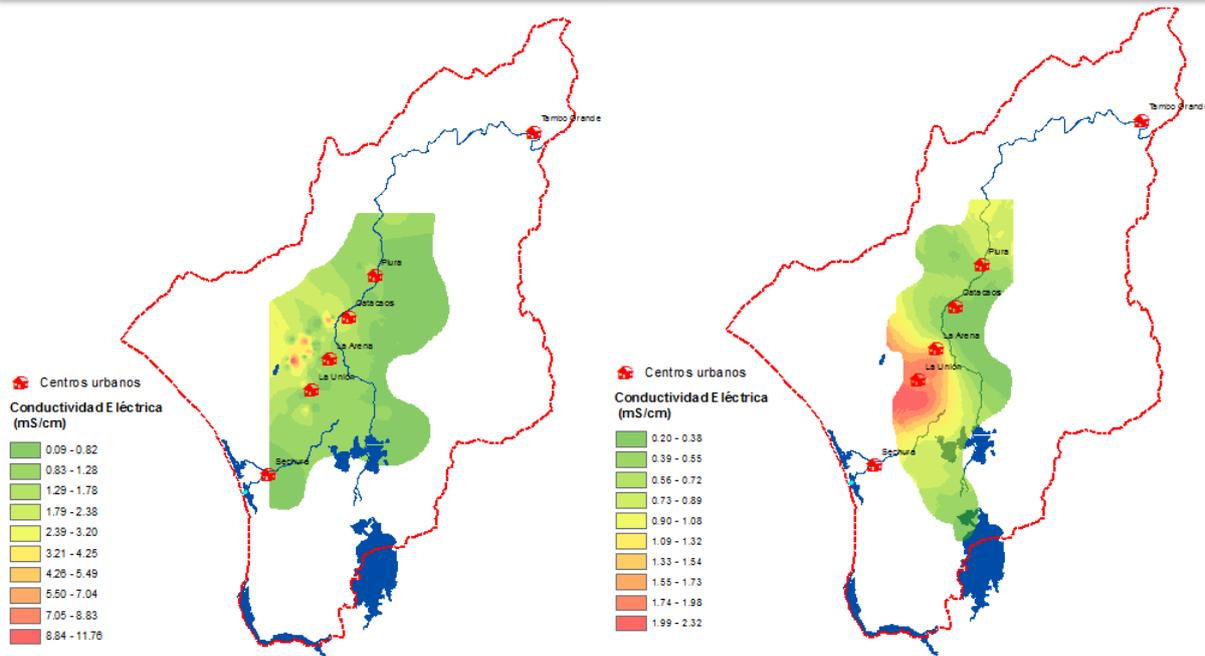


Figura 16. Conductividad eléctrica del acuífero libre (superior) y acuífero confinado (inferior).

Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015).

2.8. Recargas potenciales del acuífero

El acuífero superior estaría siendo recargado por infiltración de riego, cuerpos de agua superficiales, recargas de la parte alta de la Cuenca Piura y transferencias de flujo desde el acuífero inferior hacia el acuífero superior. Las infiltraciones por precipitación en el área de estudio, no tendrían significativa influencia en el acuífero, ya que se trata de una zona semiárida con altas tasas de evaporación de hasta 1500 mm/año y precipitaciones promedio que no superan los 200 mm/año.

Según Arce y Bolzicco la recarga del acuífero inferior del VMBP se daría desde la zona media y alta de la cuenca Piura, es en esta zona donde afloran a la superficie las formaciones terciarias que constituyen el acuífero del VMBP (Helberg Arce, 2011), existiendo probablemente una recarga directa desde el Río Piura (Bolzicco et al., 2013).

Por otro lado, el Servicio Geológico Checo evaluó 06 escenarios de recargas mediante modelación hidrogeológica, concluyendo que un escenario de recarga probable tendría lugar en el tramo del río Piura donde el curso cambia de dirección NO a SO hasta llegar a la ciudad de Piura. En la **Figura 17** se encierra con violeta la zona de recarga mencionada, donde se estaría produciendo una recarga indirecta del río hacia el acuífero inferior a través del acuífero superior, o podría tratarse de una recarga directa a través de fallas tectónicas (Servicio Geológico Checo, 2010).

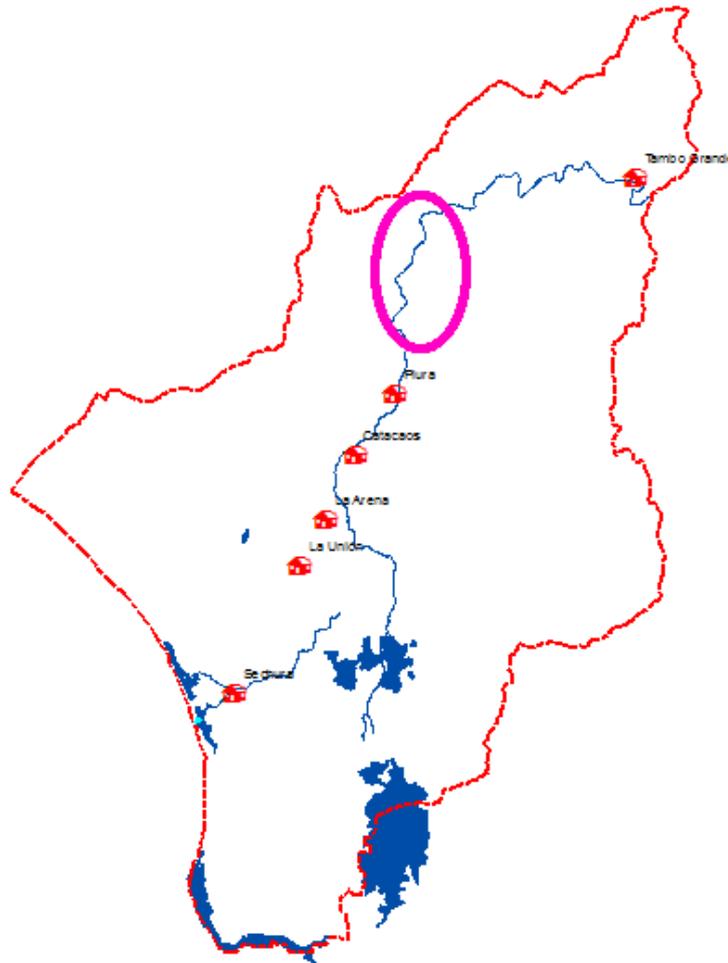


Figura 17. Escenario de recarga probable según Servicio Geológico Checo.
Fuente: Elaboración propia con datos (Servicio Geológico Checo, 2010).

La Autoridad Nacional del Agua elaboró un balance de la parte alta de la Cuenca Piura con fines de estimación de recarga del acuífero, a través de un modelo hidrológico. De este análisis se obtuvo que la recarga del acuífero sería de 90.78 $\text{Hm}^3/\text{año}$, este valor sería el volumen de recarga anual para los acuíferos del VMBP, y el acuífero del Alto Piura (ANA-DCPRH, 2015). La explotación del acuífero del Alto Piura registrada en el año 2009 es de 49.25 $\text{Hm}^3/\text{año}$ (ANA-DCPRH, 2009). El volumen de explotación del acuífero del Alto Piura dejaría una diferencia de 41.53 $\text{Hm}^3/\text{año}$, con lo cual se podría considerar como una aproximación, que un volumen igual o inferior a 41.53 $\text{Hm}^3/\text{año}$ podría estar recargando el acuífero del VMBP proveniente de la zona húmeda de la Cuenca Piura.

Los retornos de riego suponen una parte sustancial de la recarga a los acuíferos en zonas semiáridas con agricultura intensiva (Jiménez-Martínez, Molinero, & Candela, 2009) y más aún si se consideran los volúmenes de agua aplicados y las técnicas de

riego de la zona (inundación y surcos). Dentro del área de estudio se encuentran 04 Juntas de Usuarios de Riego, quienes se encargan de gestionar el riego de sus respectivas jurisdicciones. En la **Figura 18** se muestra el área que cubre cada Junta de Usuarios y sus tasas de riego promedio anuales.

Dentro del área de estudio, la JU Chira cubre un área de 46.2 km², la JU Medio y Bajo Piura 438.8 km², la JU San Lorenzo 305.8 km² y la JU Sechura 122.4 km². Considerando las tasas de riego anuales presentadas en la **Figura 18**, se tendría un volumen total promedio de 1406.5 Hm³/año de agua de riego aplicada en el VMBP.

Según la Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, entre el 5 y el 30% del agua aplicada se puede considerar como recarga del acuífero, a falta de datos que permitan hacer un análisis más detallado (SEA, 2012). Por lo expuesto y considerando que en el VMBP la eficiencia de riego es como mucho del 60 % (ANA PROFODUA, 2009; INCLAM, 2013), se podría aproximar la recarga efectiva como el 10 % de las pérdidas. Lo que daría como resultado una recarga efectiva de 56.26 Hm³/año, que podrían estar recargando el acuífero del VMBP.

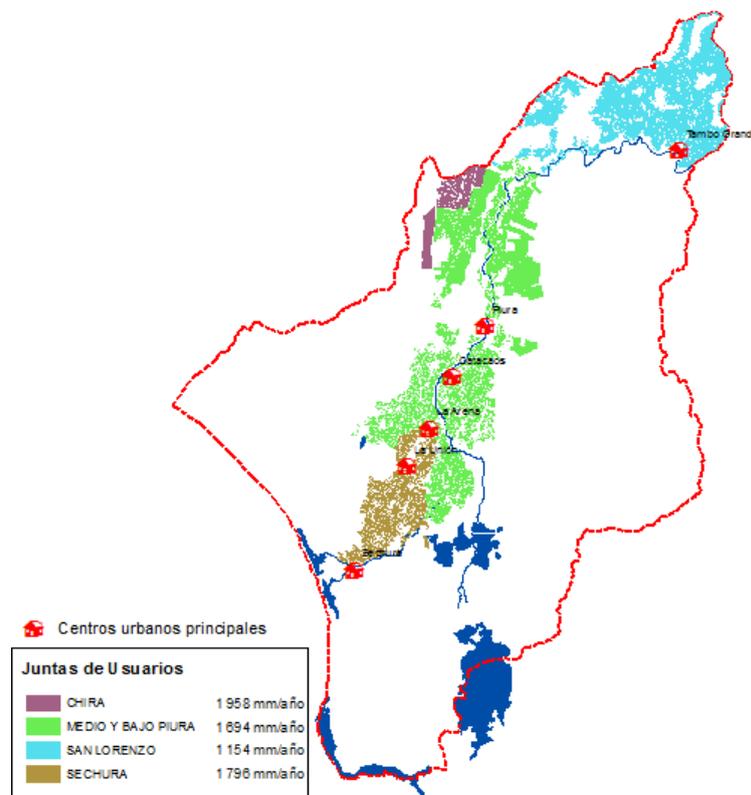


Figura 18. Juntas de usuarios y tasas de aplicación de riego promedio.

Fuente: Elaboración propia con datos de la Autoridad Nacional del Agua y Proyecto Especial Chira – Piura.

2.9. Superficie Piezométrica

La superficie piezométrica de los acuíferos superior e inferior nos indica la dirección del flujo en función de la diferencia de potencial o el gradiente hidráulico. El estudio del Servicio Geológico Checo elaboró mapas de la superficie piezométrica de los años 1967 y 1968 para el acuífero superior, y del año 2005 y 2008 para el acuífero confinado. Además, han sido elaborados mapas de la superficie piezométrica del acuífero superior e inferior correspondiente a los años 2004, en base a los datos registrados en los piezómetros de la ANA. La interpolación se realizó por el método de Kriging Ordinario, en la **Figura 19** se presenta la ubicación de los piezómetros interpolados. Como se puede observar los datos no cubren la extensión total de la cuenca. Por lo cual, los datos fueron extrapolados en base a las tendencias de distribución espacial de altura hidráulica.

Las aguas del acuífero libre (superior) fluyen con dirección SO hasta el límite con el Océano Pacífico, este comportamiento hidráulico se ha registrado desde los años 1967 y 1968, como se observa en el mapa presentado en el estudio del Servicio Geológico Checo en la **Figura 20**. En la **Figura 21** se presenta la superficie de altura hidráulica construida con los datos recopilados por los piezómetros de la ANA para el año 2004, donde se aprecia que el comportamiento hidráulico del acuífero superior no presenta cambios, manteniendo la misma dirección de flujo. Las alturas hidráulicas oscilan entre 5.23 m. y 31.1 m. con respecto al nivel del mar. El nivel freático se encontraría en promedio a unos 30 m. de profundidad por debajo del terreno al norte de la ciudad de Piura, llegando a encontrarse a menos de 5 m. de profundidad al sur. No se visualiza una notoria influencia del río o de las lagunas en el acuífero superficial, sin embargo esto se evaluará más adelante con los resultados obtenidos por el modelo.

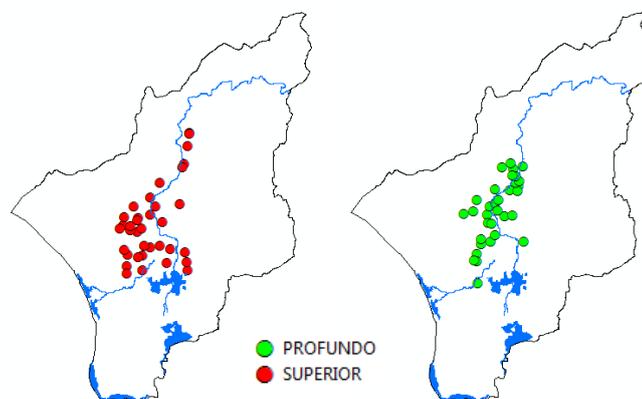


Figura 19. Ubicación de los piezómetros del acuífero superior y profundo.
Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015).

Si comparamos las alturas hidráulicas de los años 1967 y 2004 del acuífero superficial, podemos decir que no existen variaciones significativas, a pesar de ser un periodo de tiempo considerable. Esto puede deberse a la poca explotación del acuífero libre, debido a la mayor concentración de sales en sus aguas, que imposibilitan el uso para abastecimiento urbano o actividades agropecuarias.

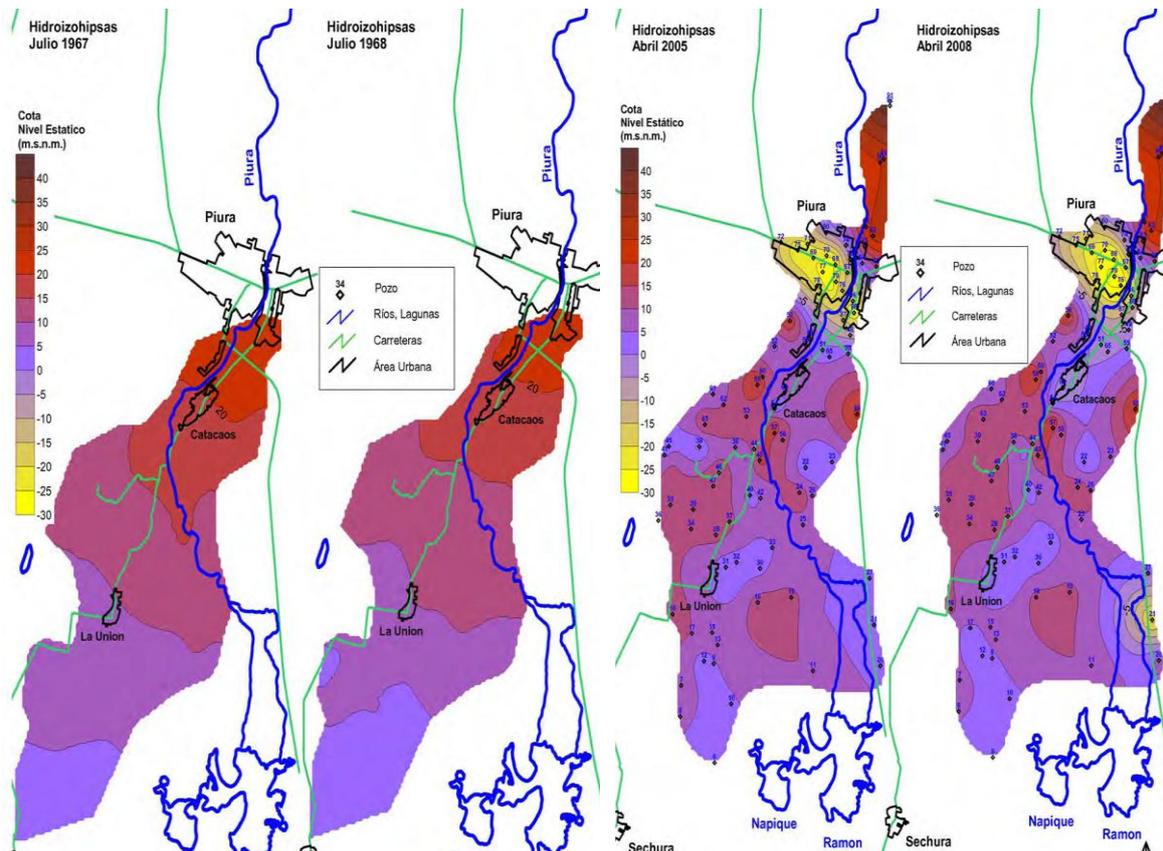


Figura 20. Superficie de altura hidráulica del acuífero libre (1967, 1967) y acuífero confinado (2005, 2008).
 Fuente: (Servicio Geológico Checo, 2010)

El acuífero confinado presenta un notable abatimiento en la ciudad de Piura, donde se encuentra la mayor concentración de pozos de bombeo, esto se observa en los mapas realizados por el Servicio Geológico Checo para los años 2005 y 2008, y también en el mapa realizado para el año 2004 con datos de los piezómetros de la ANA. Se han registrado alturas hidráulicas de entre -45.2 m. y 1.7 m. tomando como referencia el nivel del mar. El abatimiento se produce en la ciudad de Piura, lo cual produce un gradiente hidráulico que genera la circulación del flujo desde los bordes de la subcuenca hacia la zona central. La bibliografía menciona que en estado sin explotación es muy probable que el acuífero inferior circuló hacia el SO y además, sus aguas fluían hacia el acuífero superior, recargándolo. Sin embargo, actualmente

bajo la explotación continua esto se puede haber invertido y el acuífero superior estaría recargando al acuífero inferior a través del semi-acuitardo (Servicio Geológico Checo, 2010).

Si comparamos las superficies de altura hidráulica del acuífero confinado de la **Figura 20** y **Figura 21** el abatimiento producido en la ciudad de Piura para el año 2004 es 15 m. mayor que el abatimiento mostrado en los mapas elaborados por el Servicio Geológico Checo para el año 2005 y 2008. Como se menciona en el apartado de calidad del agua, el acuífero inferior se caracteriza por aguas de baja salinidad, ideales para abastecimiento urbano, actividades agropecuarias e industriales. Debido a esto, ha existido una explotación constante del acuífero confinado que está produciendo el descenso de la altura hidráulica y alteraciones en la circulación natural del flujo.

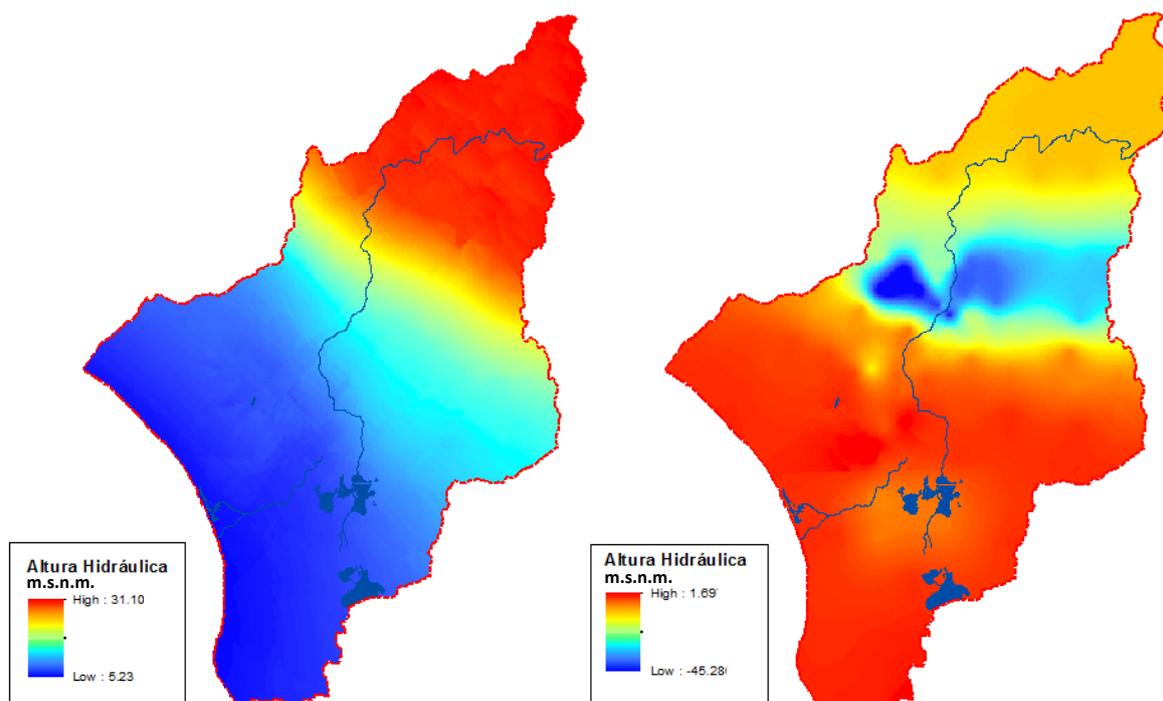


Figura 21. Superficie de altura hidráulica del acuífero libre y acuífero confinado (2004).
Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015).

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Modelación matemática del flujo subterráneo

Se entiende por modelo de un acuífero, el procedimiento analítico o matemático que nos permita realizar la simulación de su comportamiento. Para poder definir la circulación del agua mediante un modelo en un acuífero, es necesario definir la geometría del acuífero, sus propiedades hidráulicas, las leyes que rigen el movimiento

del flujo, sus condiciones de borde, las condiciones iniciales y las entradas-salidas del sistema acuífero.

A inicios de los 70 los principios del flujo de aguas subterráneas fueron establecidos y eran resueltos con métodos analíticos. La poca potencia de cálculo de los computadores de la época limitaba la aplicación de modelos numéricos, a pesar que ya habían sido desarrollados (Rushton, 2004).

En la actualidad, existen avances substanciales en la solución de modelos numéricos de aguas subterráneas, mediante plataformas de cómputo capaces de resolver miles de ecuaciones en poco tiempo. Además, se están investigando métodos y técnicas sofisticadas de modelamiento inverso y análisis de la incertidumbre (Langevin & Panday, 2012). No obstante, los problemas reales del flujo de aguas subterráneas son bastantes complejos y sólo pueden ser analizados mediante simplificaciones de la realidad.

3.1.1. Ecuación del flujo de aguas subterráneas

El flujo de un fluido en medio poroso se rige por leyes físicas y puede ser descrito por ecuaciones diferenciales parciales si se considera un medio continuo equivalente. En estas ecuaciones diferenciales, las coordenadas espaciales (X, Y, Z) y el tiempo (t) son las variables independientes y la altura hidráulica (h) es la variable dependiente. Las ecuaciones en derivadas parciales del flujo de agua subterránea se obtienen a partir de la Ley de Darcy y la ecuación de balance de masas (Fetter, 2001).

La Ley de Darcy

A mediados de los 1800s, un ingeniero Francés, Henry Darcy, realizó el primer estudio sistemático del movimiento del agua en medios porosos. Estudió el movimiento del agua a través de capas de arena usadas para filtración de agua. Darcy descubrió que la relación del flujo circulante a través de la arena era proporcional a la diferencia de alturas entre la entrada y salida del flujo, e inversamente proporcional a la longitud que el flujo debía recorrer hasta su salida. También determinó que la cantidad de flujo circulante es proporcional a un coeficiente (K), que está en función de la naturaleza del medio poroso (Fetter, 2001).

Esta ley fue experimentada en cilindros rellenos de material poroso y ha sido repetidamente confirmada por numerosos investigadores. La ley de Darcy es también una ley macroscópica que representa el comportamiento de un número elevado de poros. No representa en modo alguno el comportamiento del agua dentro de cada poro y permite tratar el flujo subterráneo como un flujo no viscoso. La ley de Darcy es válida para valores de Reynolds $Re < 1$ a 10 , siendo preciso en general $Re < 4$ (Emilio & Manuel, 2001).

$$Q = -K A \frac{\Delta h}{L} = -K A i \quad (1)$$

- Q : Caudal (L^3/T).
 K : Conductividad hidráulica (L/T).
 A : Área que atraviesa el fluido (L^2).
 Δh : Diferencial de altura hidráulica (L).
 L : Distancia recorrida por el flujo (L)
 I : Gradiente hidráulico (adimensional)

La Ecuación de Balance

La ecuación de balance establece que el balance total de la masa del fluido dentro de un volumen de control es cero. La ley de conservación de la masa o el principio de continuidad establece que no debe haber cambios en la masa de un fluido contenido en un pequeño volumen del acuífero (volumen de control). Cualquier cambio en la masa del fluido dentro del volumen de control debe ser contrarrestado por una correspondiente salida, un cambio en el almacenamiento o ambos (Fetter, 2001).

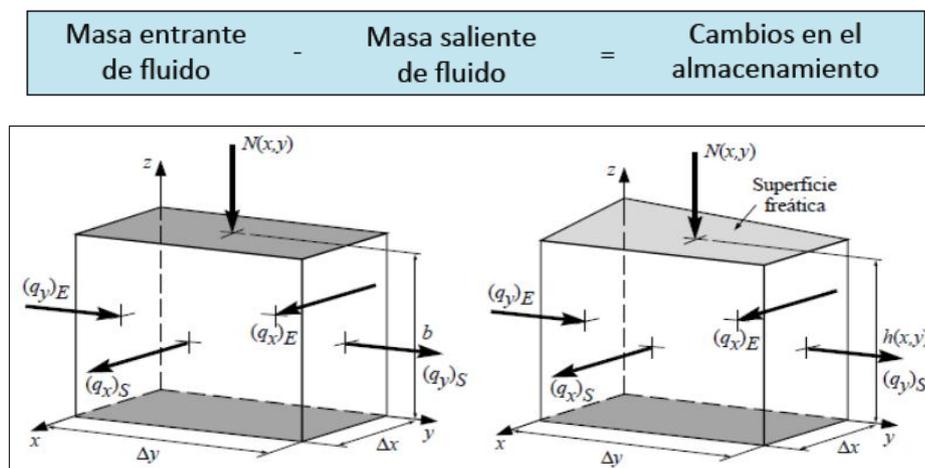


Figura 22. Esquema de un volumen de control para acuífero confinado (izquierda) y libre (derecha).

A continuación se presenta la Ecuación del flujo 2D en medio poroso saturado, anisótropo y heterogéneo (Fetter, 2001):

Acuífero Confinado

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S}{b} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{N}{b} \quad (2)$$

Acuífero libre

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - N \quad (3)$$

K_x, K_y : Componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones X e Y (L/T).

h : Altura hidráulica (L).

S : Coeficiente de almacenamiento (adimensional).

S_y : Rendimiento específico (adimensional).

N : Fuente o Sumidero (L/T).

b : Espesor saturado del acuífero (L).

t : Tiempo (T)

Un modelo de un acuífero es un procedimiento que permite describir el acuífero mediante ecuaciones matemáticas y resolver la ecuación diferencial del flujo de forma suficiente aproximada de acuerdo a las necesidades del problema planteado (Emilio & Manuel, 2001). Para resolver estas ecuaciones existen diferentes metodologías, tales como:

Soluciones analíticas: Son las que dan la solución exacta de la ecuación diferencial por medio de funciones analíticas o tabuladas. Sólo se han resuelto para casos particulares y relativamente simples (Emilio & Manuel, 2001). Debido a esto su aplicación está muy limitada.

Diferencias finitas: Se utilizan desde los años 60 y existen varios códigos muy extendidos que hacen uso de esta metodología. Consiste en reemplazar el modelo

conceptual continuo de un acuífero, por un conjunto de nudos discretos ordenados en una malla rectangular, se pueden resolver por método centrado en malla o centrado en bloques. Se basa en aproximar las ecuaciones diferenciales por diferencias, transformando así el problema en un sistema de ecuaciones algebraicas (Fetter, 2001).

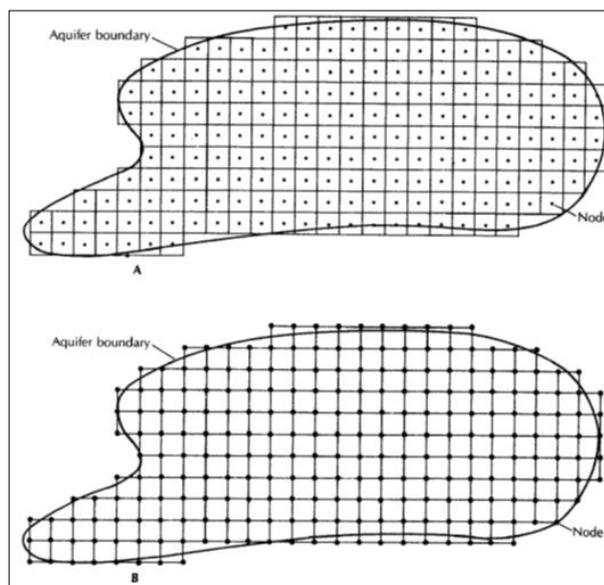


Figura 23. Malla de diferencias finitas centrado en bloques (superior) y centrado en malla (inferior).
Fuente: (Fetter, 2001)

El principal código que utiliza el método de las diferencias finitas es MODFLOW, que puede ser ejecutado bajo distintas plataformas de software (PMWIN, ModelMuse, Visual MODFLOW, etc.). Fue desarrollado por la U.S. Geological Survey (USGS) entre 1981 y 1983 (McDonald & Harbaugh, 2003).

Elementos finitos: Los elementos finitos ofrecen un enfoque alternativo para el modelamiento numérico del flujo de aguas subterráneas. A diferencia del método de diferencias finitas que usa una red rectangular de nodos, en el método de elementos finitos el acuífero es dividido en celdas poligonales, usualmente triangulares, pero no necesariamente. Los polígonos se unen en nodos que representan los puntos en que los valores desconocidos, tal como altura hidráulica, van a ser calculados. El valor de la altura hidráulica en el interior de cada celda es determinado por interpolación entre los nodos circundantes. El método de elementos finitos tiene mayor flexibilidad y requiere menor cantidad de nudos para representar la complejidad de la geometría de un sistema acuífero (Fetter,

2001). Sin embargo, las bases matemáticas para el método de elementos finitos son mucho más complejas que el método de diferencias finitas.

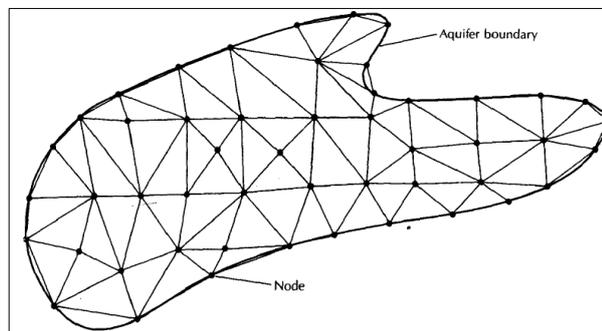


Figura 24. Malla de elementos finitos.
Fuente: (Fetter, 2001)

El principal software basado en el método de elementos finitos es FEFLOW, que viene siendo continuamente perfeccionado, desde su creación en 1979 por el Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc. en Berlín, Alemania (Trefry & Muffels, 2007).

Elementos de contorno: Es un método muy utilizado en mecánica de sólidos conocido por su simplicidad en la discretización y alta eficiencia computacional. Éste método ha sido utilizado también en pruebas de pozos en la industria del Petróleo, modelamiento de fracturas en medios porosos y otras aplicaciones en aguas subterráneas (Fang, Cheng, & Ayala, 2017). El método consiste en obtener una ecuación integral del contorno que expresa de forma explícita el valor de la función incógnita en cualquier punto del dominio, que permite construir un sistema de ecuaciones algebraicas. Su uso es muy ventajoso con respecto al método de elementos finitos, si el dominio del problema se puede dividir en trozos homogéneos de gran tamaño.

3.1.2. Modelo de flujo en diferencias finitas MODFLOW

MODFLOW es un programa modular escrito en Fortran 90 basado en el método de diferencias finitas desarrollado por la U.S. Geological Survey (USGS) y permite abordar problemas de flujo y de transporte en aguas subterráneas para acuíferos confinados y no confinados. Además, es posible introducir en el modelo elementos como pozos, recargas, evapotranspiración, drenaje y ríos.

La versión más reciente es MODFLOW-2005. La estructura modular consiste de un programa principal y una serie de subrutinas independientes. Las subrutinas son agrupadas en paquetes, cada paquete trata con una característica específica del sistema hidrológico, como el flujo desde ríos o el flujo hacia drenes, o un método específico para la solución de un conjunto de ecuaciones resultantes del método de diferencias finitas. La división del programa en paquetes le permite al usuario examinar características hidrológicas específicas del modelo de modo independiente. Esto también facilita el desarrollo de capacidades adicionales, ya que nuevos paquetes pueden ser agregados al programa sin modificar los paquetes existentes (Harbaugh, Arlen, 2005).

Modelo matemático

MODFLOW describe el movimiento tridimensional de aguas subterráneas de densidad constante en medios porosos con la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Conductividad hidráulica en los ejes x, y, z (L/T).

h : Altura hidráulica (L).

W : Flujo volumétrico por unidad de volumen, fuentes o sumideros (T^{-1}).

S_s : Almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}).

t : Tiempo (T).

Donde K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} y S_s están en función del espacio (x, y, z) y W está en función del espacio y el tiempo (x, y, z, t). La ecuación describe el flujo de aguas subterráneas en condiciones de no equilibrio para un medio heterogéneo y anisótropo. Las condiciones de borde, condiciones iniciales y la ecuación (4) constituyen la representación matemática del sistema de flujo subterráneo en MODFLOW (Harbaugh, Arlen, 2005).

Es posible resolver la ecuación (4) analíticamente derivando h con respecto al espacio y tiempo. Sin embargo, esto sólo es posible para sistemas muy simples siendo necesario el uso de métodos numéricos para obtener una aproximación de la solución. El método empleado por MODFLOW es el de diferencias finitas,

donde el sistema continuo del acuífero es reemplazado por una conjunto finito de puntos discretos en el espacio y tiempo. Estos valores constituyen una aproximación de la variación temporal de la distribución de alturas hidráulicas, que podría ser obtenida por soluciones analíticas de la ecuación del flujo en derivadas parciales.

Discretización

MODFLOW discretiza el sistema acuífero en un conjunto de celdas ordenadas en filas, columnas y capas. En cada celda hay un punto llamada “nodo” en donde la altura hidráulica será calculada.

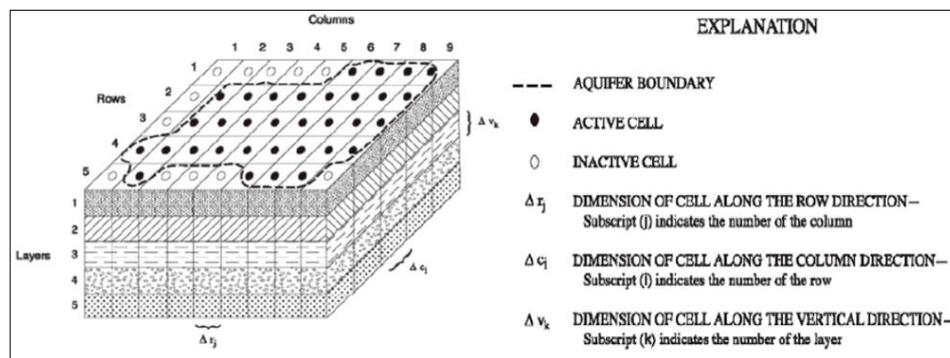


Figura 25. Discretización hipotética del sistema acuífero.

Fuente: (Harbaugh, Arlen, 2005)

La altura hidráulica está en función del tiempo y del espacio, por tanto en la formulación de diferencias finitas también se requiere discretizar el tiempo. El tiempo es discretizado en pasos de tiempo y la altura hidráulica es calculada en cada paso (McDonald & Harbaugh, 2003).

Ecuación de diferencias finitas

El modo de resolver la ecuación del flujo en diferencias finitas proviene de la aplicación de la ecuación de continuidad. Donde la suma de los flujos de entrada y salida de cada celda debe ser igual al cambio en almacenamiento dentro de la celda (Harbaugh, Arlen, 2005). Asumiendo densidad constante, la ecuación de continuidad que representa el balance de flujos para cada celda es:

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \tag{5}$$

- Q_i : Caudal en la celda (L^3T^{-1}).
- SS : Almacenamiento específico (L^{-1}).
- ΔV : Volumen de la celda (L^3).
- Δh : Variación de altura hidráulica en un intervalo de tiempo Δt (L).

El primer término representa la sumatoria de flujos de entrada y salida de cada celda. El segundo término es equivalente al volumen de agua almacenado en la celda en un intervalo de tiempo Δt , dado un cambio en la altura hidráulica Δh .

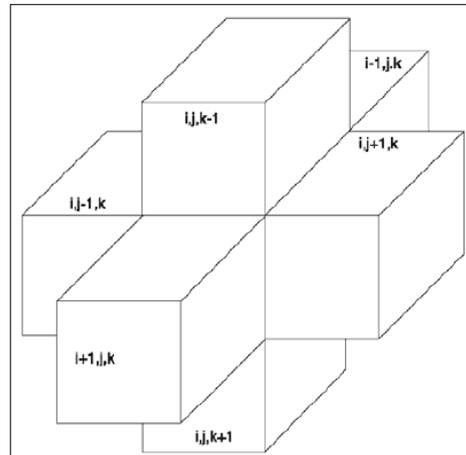


Figura 26. Representación de celdas adyacentes de la celda (i, j, k).
Fuente: (Harbaugh, Arlen, 2005)

La Figura 26 representa seis celdas adyacentes a una celda (i, j, k). Los flujos son considerados positivos si ellos están ingresando a la celda (i, j, k) y el flujo será negativo si sale de la celda (i, j, k). De este modo se evalúa cada celda del acuífero para todas las capas.

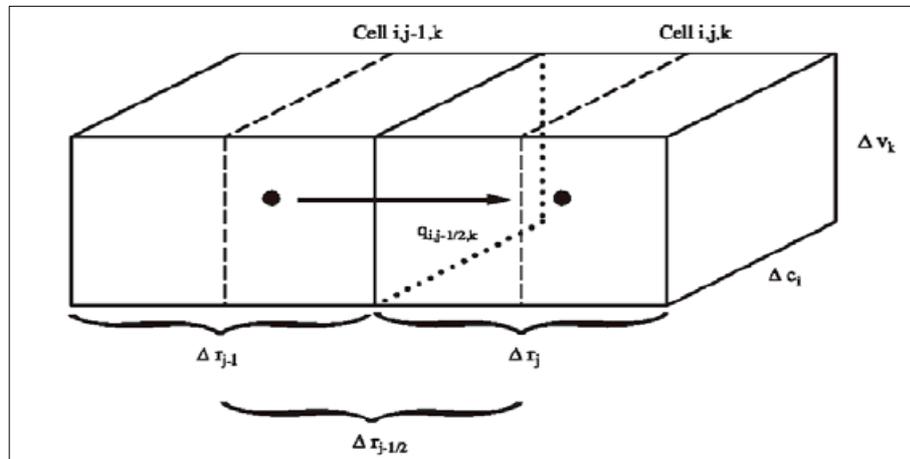


Figura 27. Esquema del flujo entre los nodos i, j, k e i, j-1, k.
Fuente: (Harbaugh, Arlen, 2005)

La ecuación (6) representa el flujo exacto en una dimensión 1D y estado estacionario de un nodo $i, j-1, k$ hacia el nodo i, j, k . El flujo circula a través de una sección transversal $\Delta c_i \Delta v_k$, la conductividad hidráulica entre nodos sería $KR_{i,j-1/2,k}$ (ver **Figura 27**). Expresiones similares se desarrollan para el resto de caras de la celda y sus respectivas celdas adyacentes.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (6)$$

$h_{i,j,k}$: Altura hidráulica en el nodo i, j, k (L).

$h_{i,j-1,k}$: Altura hidráulica en el nodo $i, j-1, k$ (L).

$q_{i,j-1/2,k}$: Flujo que circula entre las caras de las celdas en contacto (L³T⁻¹)

$KR_{i,j-1/2,k}$: Conductividad hidráulica (LT⁻¹).

$\Delta c_i \Delta v_k$: Es el área de la cara de la celda perpendicular al flujo (L²).

$\Delta r_{j-1/2}$: Es la distancia entre nodos i, j, k e $i, j-1, k$ (L).

Paquetes de MODFLOW

MODFLOW utiliza paquetes para simular los estresores hidrológicos en los sistemas de aguas subterráneas. Estos paquetes son agregados como términos en la ecuación del flujo representando entradas o salidas de fluido. Matemáticamente, son consideradas condiciones de contorno.

- **Well Package:** Simula características como la extracción o inyección de agua en el acuífero, a una tasa de flujo constante para cada Stress period.
- **Recharge Package:** Este paquete está diseñado para simular una recarga distribuida del sistema acuífero. Comúnmente una recarga distribuida ocurre como resultado de la percolación de las precipitaciones o aguas de riego.
- **General-Head Boundary Package:** Su función es simular el flujo de entrada o salida de una celda (i, j, k) desde una fuente externa en proporción de la diferencia de altura hidráulica entre la celda y altura hidráulica de la fuente externa.

- **River Package:** Simula los efectos de flujo entre el agua superficial de ríos y las aguas subterráneas. Los ríos y arroyos ingresan o drenan fluido del acuífero, dependiendo del gradiente hidráulico entre río y nivel freático.
- **Drain Package:** Está diseñado para simular las características de drenes agrícolas, los cuales drenan el agua del acuífero a una tasa proporcional a la diferencia entre la altura hidráulica del acuífero y la profundidad del dren, siempre que la altura hidráulica esté por encima de esta última. En caso la altura hidráulica esté por debajo del acuífero, el dren no tiene efecto alguno sobre el acuífero.
- **Evapotranspiration Package:** Simula los efectos de la transpiración de las plantas y evaporación directa extrayendo agua del acuífero en régimen saturado. El enfoque está basado en establecer un límite del nivel freático para el cual se va producir evapotranspiración (nivel freático cercano a la superficie) y otro para el cual dejaría de producirse (nivel freático profundo).

3.1.3. Métodos de calibración

La calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir las variables observadas, que corresponden usualmente a los niveles piezométricos. Si bien en algunos casos los resultados de este proceso permiten acotar mejor los datos de entrada del modelo (por ejemplo, la distribución espacial y temporal de la recarga y la evaporación), lo anterior corresponde, en realidad, a una modificación en el modelo conceptual y dichas modificaciones se considera que no forman parte de los parámetros de la calibración (SEA, 2012).

Existe consenso respecto a que no existe una metodología universal para calibrar un modelo, ya que la alta complejidad inherente a los sistemas hidrogeológicos obliga a analizar cada problema en forma particular, dejando gran parte del trabajo al juicio y a la experiencia del modelador. Sin perjuicio de lo anterior, se reconocen dos enfoques de calibración: calibración manual o calibración mediante prueba y error, y calibración automática mediante algoritmos de modelación inversa (SEA, 2012). La calibración mediante prueba y error es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje pero

es lento y subjetivo. La calibración automática se realiza mediante algoritmos implementados en códigos computacionales, los cuales comparan los valores observados y calculados, para luego modificar los parámetros buscando un mejor ajuste del modelo. Los códigos más utilizados en modelos de aguas subterráneas son MODFLOW (Harbaugh, Arlen, 2005), PEST (J. Doherty, 2016) y UCODE (Poeter, Hill, Banta, Mehl, & Christensen, 2008).

3.2. Antecedentes del área de estudio

La primera aproximación hacia la construcción de un modelo hidrogeológico del VMBP fue realizada en el año 2010 como parte del estudio, *“Evaluación de las condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas de las Cuencas bajas del Río Piura y Río Chira para mitigar factores ambientales que restringen el desarrollo social y económico de las regiones”*, elaborado por el Servicio Geológico Checo - República Checa, mediante un proyecto de cooperación internacional y con apoyo del Gobierno Regional Piura - Perú.

Posteriormente, en el año 2015 fue publicado el estudio *“Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Piura (VMBP) Estudio Hidrogeológico”*, elaborado por la Autoridad Nacional de Agua del Perú. Donde se hace un inventario de los pozos de bombeo, prospecciones geofísicas, pruebas hidrodinámicas y de calidad de agua, para finalmente construir un modelo numérico hidrogeológico.

Adicionalmente, se han realizado estudios del VMBP con fines hidrogeológicos, donde se recopiló información del volumen de explotación de las aguas subterráneas y su calidad a través de inventarios, dentro de los cuales citaremos los siguientes:

- En 1977, el Organismo Nacional de Evaluación de Recursos Naturales ONERN y el Organismo de Desarrollo del Complejo Bayovar ODECOB–Lima, realizó el estudio denominado *“Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales del Complejo Bayovar - Piura”*, dentro del cual se abarcó el ámbito de la provincia de Sechura hasta Bayóvar.
- En 1980, el Ministerio de Agricultura a través de la Dirección General de Aguas y Suelos –Lima, realizó el estudio denominado *“Inventario y Evaluación Nacional de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Río Piura”*.

- En 2004, el Ministerio de Agricultura a través de la Intendencia de Recursos Hídricos –Lima, realizó el estudio denominado “*Inventario de Fuentes de Agua Subterránea en el VMBP*”.
- En 2011, la Autoridad Nacional del Agua desarrolló el “*Inventario de Fuentes de Agua Subterránea en el VMBP*”.
- En 2012, la Autoridad Nacional del Agua elaboró la “*Caracterización Hidrogeológica del Acuífero del VMBP*”.

3.2.1. Modelo del Servicio Geológico Checo

El estudio se denominó “*Evaluación de las condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas de las Cuencas bajas del Río Piura y Río Chira para mitigar factores ambientales que restringen el desarrollo social y económico de las regiones*”, estuvo orientado al estudio de las condiciones hidrogeológicas de la cuenca del río Piura con el objetivo de ayudar a eliminar el impacto de los principales factores naturales, los cuales limitan el desarrollo económico y social de la región. El principal objetivo del proyecto fue caracterizar los procesos exodinámicos que causan riesgos naturales en la cuenca de los ríos Piura y Chira, y contribuir de esta manera a la reducción del impacto de las catástrofes naturales ayudando al gobierno de la región Piura a encontrar nuevos recursos de agua potable y utilitaria (Servicio Geológico Checo, 2010).

El análisis hidrogeológico desarrollado en el estudio, se basó en la recopilación de información tal como geología, hidrogeología, hidrología, volúmenes de explotación del acuífero, posibles recargas y calidad de agua. El principal aporte de este estudio fue la evaluación de diferentes escenarios, con el fin de determinar el origen de las recargas de agua subterránea, mediante un modelamiento hidrogeológico realizado con MODFLOW.

El acuífero superior está alimentado por infiltraciones, intercambio de flujo de los ríos y flujos provenientes del acuífero inferior. Los cursos superficiales y las lagunas aseguran el drenaje principal de agua subterránea del acuífero superior. El agua subterránea fluye hacia el suroeste. Localmente el agua subterránea desagua en depresiones de terreno, donde se evapora bajo la influencia de alta evaporación potencial de hasta 1500 mm/año. Sin embargo, el origen de las fuentes de recarga del acuífero inferior no están claramente definidas, por tanto el objetivo del modelo que realizó el Servicio Geológico Checo fue mejorar el

conocimiento del origen de las fuentes de aguas subterráneas del acuífero inferior.

Para tal fin, se elaboraron 06 escenarios de modelación, para determinar las posibles fuentes de recarga.

- **Escenario 1:** Se considera que no existe recarga del acuífero inferior, no existiendo la renovación de las reservas de agua. Considerando el semi-acuitardo totalmente impermeable.
- **Escenario 2:** Recarga del acuífero inferior proveniente de la subcuenca San Francisco, esta subcuenca se encuentra aguas arriba del modelo siguiendo el curso del río Piura.
- **Escenario 3:** Recarga de las depresiones sin descarga, cuerpos de agua formados por eventos extremos, como el fenómeno de El Niño que crea hasta 7 m. de columna de agua en las depresiones sin salida.
- **Escenario 4:** Recarga desde los cursos superficiales en la parte baja del río Chira, tomando en consideración el afloramiento del acuífero inferior en los tramos deficitarios del río.
- **Escenario 5:** Recarga desde los cursos superficiales en la parte media del río Piura, tomando en consideración el afloramiento del acuífero inferior en los tramos deficitarios del río.
- **Escenario 6:** Recarga desde los cursos superficiales en la parte baja del río Piura, tomando en consideración el afloramiento del acuífero inferior en los tramos deficitarios del río.

A continuación en la **Figura 28** se presenta gráficamente los 06 escenarios que fueron evaluados, el perímetro rojo encierra al área del modelo y el color violeta indica el origen de la fuente de agua subterránea para cada escenario. El objetivo del modelo fue evaluar qué escenario reproduce mejor la altura hidráulica de -33 m.s.n.m. observada en el cono de abatimiento en la ciudad de Piura.

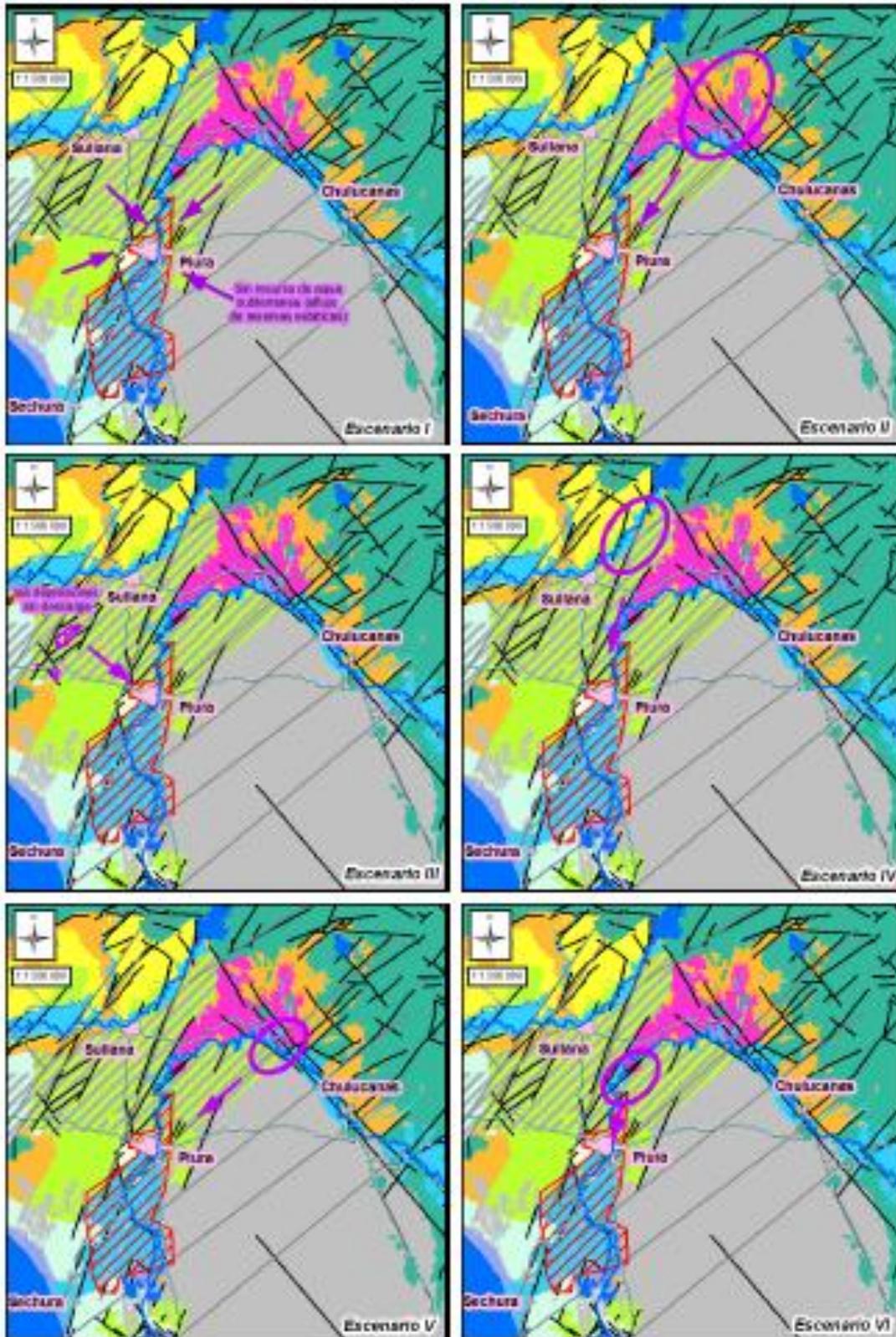


Figura 28. Escenarios de las fuentes de agua subterránea del acuífero inferior (señalados con color violeta).
Fuente: (Servicio Geológico Checo, 2010)

A continuación se describen las presunciones generales tomadas para el modelamiento de los 06 escenarios descritos anteriormente y las conclusiones a las que se llegó con esta evaluación.

- El modelo está limitado al norte y noreste con la curva de nivel 200 m., al este por río Piura, al sur por una línea de flujo supuesta y al oeste el Océano Pacífico.
- Modelo de 03 capas, acuífero inferior, semi-acuitardo y acuífero superior.
- La base de la capa superior es -30 m.s.n.m., la base de la capa intermedia -80 m.s.n.m. y la base de la capa inferior -180 msnm. Hacia los bordes los espesores disminuyen y los niveles de las bases suben.
- El semi-acuitardo se considera 100% impermeable.
- Para el acuífero inferior y en todos los escenarios se inicia la modelación con conductividad hidráulica 4.32 m/d, coeficiente de almacenamiento 0.0002 para el acuífero confinado y 0.2 para el acuífero libre.
- La condición inicial se obtiene del modelo estacionario en condiciones naturales (sin bombeos). Luego se modelan 77 años con un bombeo de 138,240 m³/d (50.4 Hm³/año) y finalmente se corre un modelo transitorio desde el año 1983 hasta el año 2010 y se comparan los resultados con los valores observados del 2010, cuando el nivel observado en el cono de depresión de la ciudad de Piura fluctuaba alrededor de -33 m.s.n.m.
- En los 06 escenarios se fueron variando los parámetros hidráulicos del modelo, para determinar su influencia en la altura hidráulica, especialmente en el cono de depresión de la ciudad de Piura.

En el informe no se presentan mayores detalles del modelo numérico. Esto se debe a que el objetivo del proyecto no era específicamente realizar un modelamiento del acuífero, sino que se utilizó como herramienta para mejorar el conocimiento del origen de las fuentes de recarga del acuífero inferior.

Finalmente, del modelo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Escenario 1 y 2: Se logró modelar un cono de depresión similar al observado en el acuífero inferior, estableciendo parámetros hidráulicos muy favorables incluso irreales. No se apreció diferencia importante entre escenario 1 y 2.

Escenario 3: Se concluye que los cuerpos de agua formados por eventos extremos como el fenómeno de El Niño no tienen influencia importante en la recarga del acuífero inferior.

Escenario 4: La recarga a través del río Chira tiene probablemente una menor influencia en la recarga del acuífero inferior que los escenarios anteriores.

Escenario 5: Los resultados son iguales que el escenario 2.

Escenario 6: Los resultados de este escenario fueron los más probables, obteniéndose una altura hidráulica simulada de -35 m.s.n.m. frente al valor observado en el cono de presión del acuífero inferior de -33 m.s.n.m.

Como conclusión final el informe menciona que la recarga desde la parte baja del río Piura (escenario 06) es la fuente de recarga del acuífero inferior más favorable. Sin embargo, debido a las incertidumbres del modelo, tales como la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, geometría y extensión del acuífero; esto no puede ser aseverado, pero debe ser considerado para estudios posteriores del acuífero del VMBP.

3.2.2. Modelo de la Autoridad Nacional del Agua

En el año 2014 la Autoridad Nacional del Agua – Perú, realizó el estudio “*Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Piura (VMBP) Estudio Hidrogeológico*”, el cual fue publicado en el año 2015. El principal aporte del estudio fueron las prospecciones geofísicas realizadas, para un mejor entendimiento de la configuración de los estratos y la posterior construcción de un modelo numérico hidrogeológico del acuífero. Adicionalmente, se realizó un inventario de los pozos de bombeo, análisis geológico, muestreos de calidad del agua subterránea y pruebas hidrodinámicas para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero; como ya se venía realizando en años anteriores, a través de los Inventarios de Fuentes de Agua Subterránea del VMBP, realizados por la Autoridad Nacional del Agua.

Para caracterizar la geometría vertical del acuífero se realizaron un total 570 sondajes, siendo 450 por el método de las resistividades eléctricas (SEV) y 120 por el método de dominio del tiempo de inducción electromagnética (TDEM). Con la información procesada de estos sondajes se construyó un modelo de 03 capas, acuífero libre, semi-acuitardo y el acuífero confinado.

Del análisis de las pruebas hidrodinámicas en los pozos de bombeo se obtuvo conductividades hidráulicas que oscilan entre 1.18 a 247.10 m/d y coeficientes de almacenamiento entre 0.0164 a 0.107. En los análisis de calidad de agua se obtuvieron valores de pH que oscilan entre 6.2 y 8.37, y conductividades eléctricas entre 0.89 y 3.52 mS/cm. No se sabe si estos valores corresponden al acuífero inferior o superior ya que el estudio no define tal clasificación para las muestras de los pozos analizados.

Geometría del modelo

El estudio modela un acuífero de tres capas que busca representar el acuífero inferior, una capa intermedia semi-impermeable y el acuífero superior. Los límites del acuífero son los mismos para el acuífero superior e inferior, siendo estos los límites de la subcuenca Bajo Piura.

La discretización espacial del modelo está compuesta por 400 celdas en el eje X y 400 celdas en el eje Y. Cada celda tiene una dimensión de 233 m. x 317 m, con el lado más corto orientado en el eje de las abscisas, repitiéndose en las 03 capas. La discretización temporal del modelo es un día, para la simulación en régimen transitorio se utilizan periodos de 30 días. La simulación inicia el día 01 de setiembre del 2004 y se modela un periodo de 10 años.

Condiciones iniciales

Se utilizó como condición inicial los niveles observados de altura hidráulica del año 2004 interpolándolos con el programa de cómputo Visual Modflow. No especifica si el mapa mostrado en la **Figura 29** corresponde al acuífero superficial o profundo.

Condiciones de contorno

Como se aprecia en la **Figura 29**, se estableció en las Lagunas Ñapique, Ramón y La Niña condición de borde de carga constante, el borde con el Océano Pacífico carga constante, para el río Piura una condición de tipo río y el resto de los bordes del modelo se consideraron como de no flujo. Es necesario mencionar que debido a que las lagunas dependen totalmente de las aguas del río Piura y no son estables (Servicio Geológico Checo, 2010), es más adecuado establecer una condición de contorno tipo río.

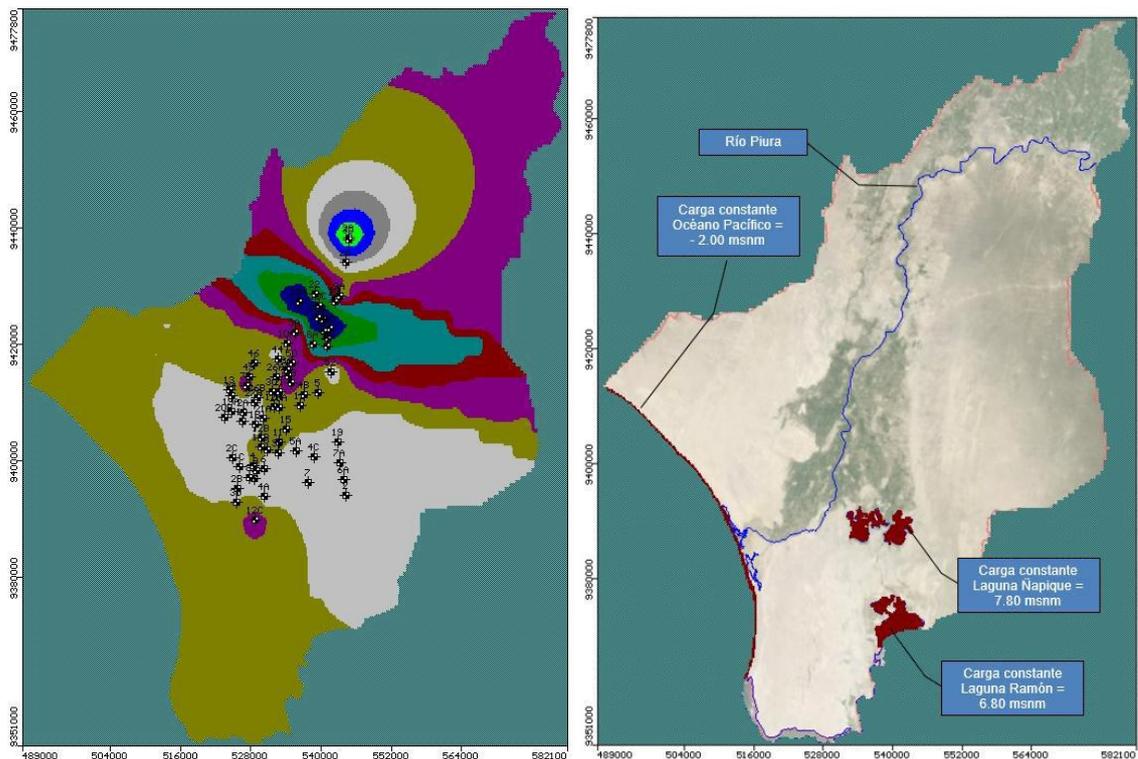


Figura 29. Condiciones iniciales (izquierda) y condiciones de contorno (derecha). Modelo numérico ANA.
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

Recarga

Para la recarga del modelo solo se considera las entradas de agua por infiltración de aguas de riego, considerando que el riego aplicado en el valle tiene una eficiencia de riego del 40%, las pérdidas ascienden al 60% y asumiendo que el 20% de las pérdidas se convierte en recarga efectiva, se tiene una recarga efectiva de 69 Hm^3 anuales que equivalen a $189,041 \text{ m}^3/\text{d}$. Para el modelo en estado transitorio se repite este valor desde el año 2004 al 2014. No se consideran recargas por precipitación o recargas desde la parte alta de la Cuenca Piura

Pozos de bombeo

Los volúmenes de bombeo considerados dentro del modelo son los de los inventarios realizados en los años 2004, 2011 y 2014, con volúmenes de $43 \text{ Hm}^3/\text{año}$, $36 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y $56.5 \text{ Hm}^3/\text{año}$, equivalente a $117,808 \text{ m}^3/\text{d}$, $98,630 \text{ m}^3/\text{d}$ y $154,794 \text{ m}^3/\text{d}$ respectivamente. Dentro del estudio no se especifica cómo se distribuyen estos volúmenes de explotación entre el acuífero inferior y superior.

Parámetros hidráulicos

La **Figura 30** muestra las permeabilidades utilizadas en el modelo para el acuífero superior (capa1) que oscilan entre 1.01 y 72 m/d. Aparentemente estas mismas permeabilidades fueron utilizadas para el acuífero inferior, ya que dentro del estudio no especifica cuáles fueron las permeabilidades para la capa2, tampoco se especifica en base a qué criterio se hace la distribución espacial de permeabilidades que se muestra en el mapa.

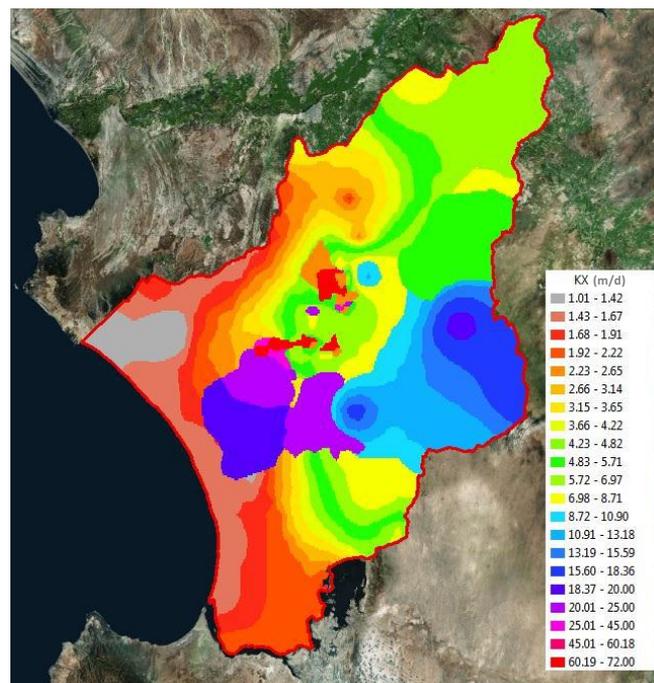


Figura 30. Distribución espacial de conductividad hidráulica en la Capa 1.
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

Resultados del modelo

Para la evaluación y calibración de los resultados del modelo se utilizó una red piezométrica de 68 pozos de bombeo los cuales se vienen monitoreando desde el año 2004. La **Figura 31** muestra el gráfico de alturas hidráulicas observadas y calculadas del modelo estacionario. El estudio indica un error RMS normalizado de 4.63% lo cual se asume como aceptable por estar debajo del 10%. Sin embargo, en el gráfico los valores calculados y observados presentan alineamientos horizontales (puntos azules). Además, los puntos azules que corresponden al Layer3 (acuífero inferior), se encuentran en cotas superiores a los puntos rojos del Layer1 (acuífero superficial). El estudio no explica la razón de esto aunque puede considerarse como un error de simbología.

El estudio menciona que no se realizó calibración alguna, ya que el resultado obtenido es el mejor indicador de que las asunciones efectuadas son las correctas y apropiadas para el objetivo del modelo.

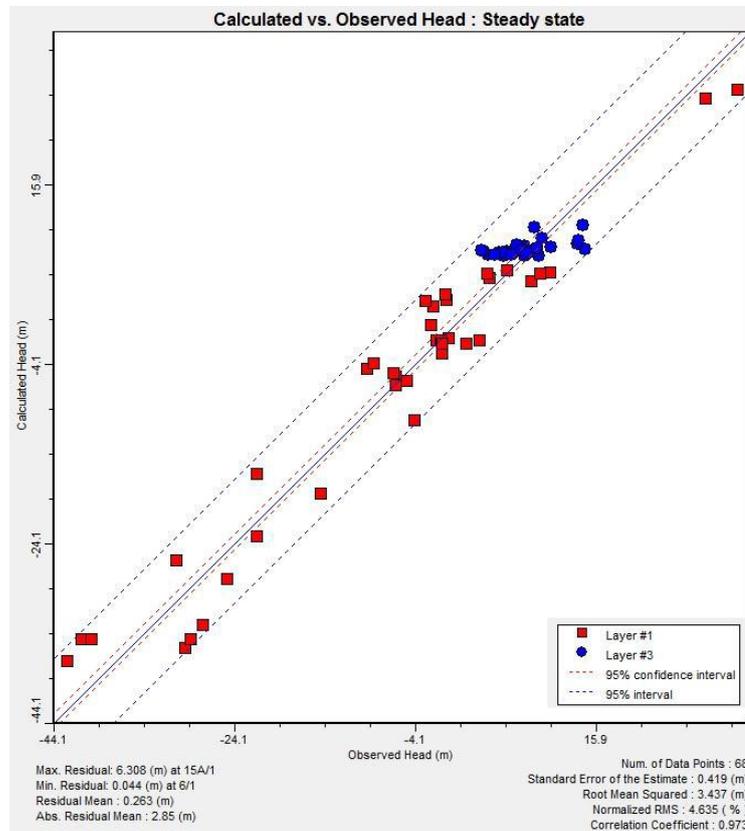


Figura 31. Gráfica de dispersión de los resultados de la calibración a régimen estacionario.
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

	Descripción	IN	OUT	Discrepancia
0	Almacenamiento	0.00	0.00	
1	Entrada/Salida al mar	67,337	14,571.8	
2	Pozos de extracción	0.00	119,358.61	
3	Salida/entrada al río	256,836.7	583,443.2	
4	Recarga	393,199.1	0.00	
	Total	717,372.9	717,373.6	0.7

Figura 32. Resultado del balance hídrico de masa—IN vs. OUT (m3/d).
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

La Figura 32 presenta el balance del modelo para el estado estacionario. Se puede apreciar un valor para la recarga que duplica el valor dado al principio, no se menciona el porqué de este nuevo valor, teniendo en cuenta que el modelo no ha sido calibrado. El río toma parte importante del modelo siendo la principal salida de flujo, lo cual puede deberse a los valores irreales de Stage (cota del calado) y Riverbed Botton (cota inferior del lecho) de hasta 74 y 120 m. por debajo de la

cota del terreno. No se presenta un balance diferenciado para el acuífero inferior y superior. El balance general no muestra intercambio de flujo entre la capa1 y capa3.

La **Figura 33** muestra el mapa de dirección del flujo de la modelación en estado estacionario para la capa1 (acuífero superior). Se aprecia que se forma un cono de depresión en la ciudad de Piura donde se encuentra la mayor concentración de volúmenes de bombeo, además se puede ver que el flujo fluye desde las lagunas Ñapique y Ramos hacia al acuífero, esto es debido a la condición establecida de carga constante. Asimismo, se aprecia que las alturas hidráulicas están bastante influidas por el cauce del Río Piura (por los parámetros irreales establecidos al río Piura). No se presentan resultados para la capa3 (acuífero inferior). Los mapas de resultados de altura hidráulica presentados para el estado transitorio, varían muy poco o nada del mapa en estado estacionario y tampoco se menciona o presentan resultados para el acuífero inferior.

En cuanto a los resultados del modelo en régimen transitorio, el estudio menciona que las permeabilidades usadas fueron las mismas que para el modelo en estado estacionario. La recarga se estableció en proporción del régimen de riego mensual de la zona para el mismo valor del modelo estacionario, Los valores de volúmenes de bombeo son los recopilados en inventarios de 2004, 2011 y 2014.

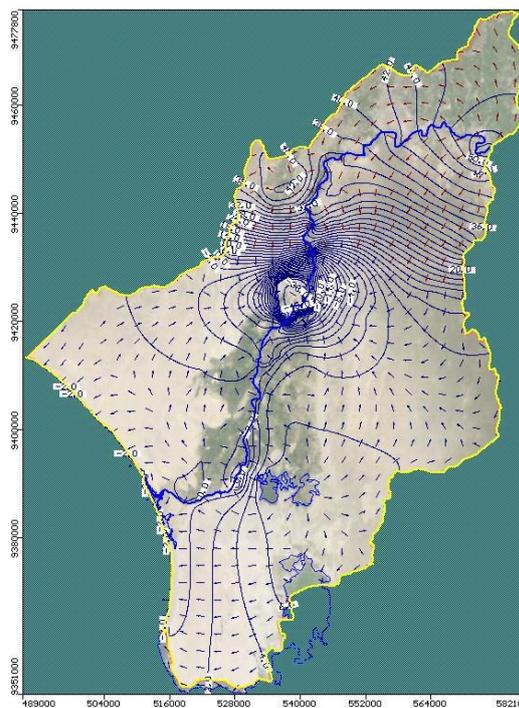


Figura 33. Curvas hidroisohipsas y dirección de flujo – Set. 2004.
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

El coeficiente de almacenamiento para el acuífero inferior se estableció como almacenamiento específico $S_s=1E-5$ m^{-1} y el rendimiento específico para el acuífero superior se fijó en $S_y=0.2$, ambos valores se consideraron constantes espacialmente en sus capas respectivas. Los resultados se presentaron en 03 gráficas de curvas de series de tiempo para 03 pozos representativos de toda el área, siendo la Zona alta cercana al inicio del modelo, la Zona media correspondiente al área de Bajo Piura y la Zona baja correspondiente al área de Sechura. No se indica en el estudio a qué capa corresponden los resultados de estas gráficas.

En la **Figura 34** los puntos rojos de mayor tamaño corresponde a los valores observados y las líneas con pequeños puntos rojos corresponden a los valores calculados. En las gráficas se aprecia claramente que no existe un buen ajuste del modelo y tampoco los valores calculados siguen las tendencias de las observaciones.

Finalmente, el estudio evalúa 03 escenarios a futuro hasta el año 2034, en donde va incrementando los volúmenes de bombeo del año 2014 en 15%, 25% y 50% para cada uno de los escenarios.

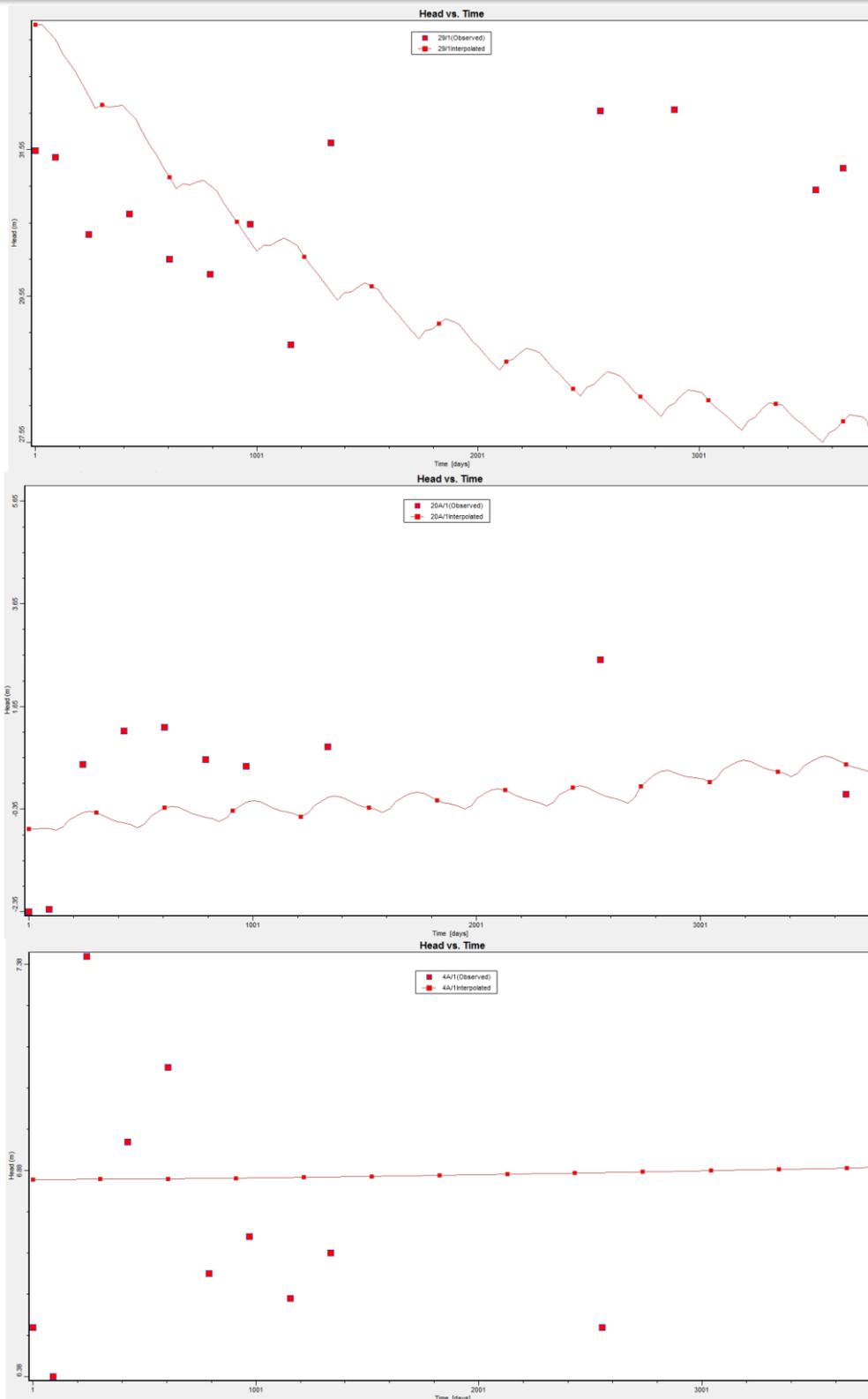


Figura 34. Resultados de altura hidráulica en régimen transitorio (Zona Alta, Media y Baja).
Fuente: (ANA-DCPRH, 2015)

3.2.3. Síntesis y Conclusiones

3.2.3.1. Características principales

El modelo del Servicio Geológico Checo se construyó con fines de estimación del origen de las fuentes de recarga del acuífero inferior, por tanto no explica detalladamente la configuración del modelo, ni el proceso de calibración. El modelo fue construido con 03 capas que representan el acuífero libre, semi-acuitardo y el acuífero confinado, se describe la permeabilidad fijada de forma general con un valor de $K=4.38$ m/d, coeficiente de almacenamiento $S=0.0002$ y rendimiento específico $S_y=0.2$. Finalmente se concluye que existe una recarga potencial del acuífero inferior en la parte baja del río Piura, donde existen afloramientos de formaciones terciarias pero no indica el volumen de la recarga.

A diferencia del modelo anterior, el modelo desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua busca simular el comportamiento integral del acuífero del VMBP, con el fin de mejorar el conocimiento del flujo de sus aguas en el acuífero superficial y confinado, para posteriormente poder evaluar escenarios que permitan mejorar la gestión de los recursos hídricos subterráneos. El modelo se construye con 03 capas que representan el acuífero libre, semi-acuitardo y acuífero confinado. Conductividades hidráulicas que oscilan entre $K=1.01$ y 72 m/d, almacenamiento específico $S_s=0.00005$ y rendimiento específico $S_y=0.2$. Finalmente se presentan los resultados, donde gráficamente no se reproduce las observaciones, ni en el modelo estacionario ni en el transitorio. Esto podría deberse a la deficiente conceptualización del modelo hidrogeológico, sumado a que no se realizó un proceso de calibración del modelo. Por tanto este modelo no estaría reproduciendo el comportamiento del acuífero.

3.2.3.2. Limitaciones

El modelo del Servicio Geológico Checo no presenta detalles de las hipótesis tomadas para la formulación del modelo, ni desarrolla un capítulo dentro del estudio donde se mencione detalles del modelo numérico. Sólo se describe de forma general los parámetros y geometría.

El modelo de la Autoridad Nacional del Agua, sí se describe dentro de un capítulo del estudio, pero presenta las siguientes deficiencias:

- No indica que conductividades hidráulicas fueron utilizadas en la capa³ del acuífero confinado.
- Establece condiciones tipo *Constant Head* a las lagunas Ñapique, Ramón y La Niña. Está comprobado que estas lagunas se forman del agua proveniente del río Piura especialmente en crecidas y se mantienen secas cuando los caudales del río disminuyen.
- El cauce del río Piura tiene un curso de agua erróneo conectado directamente al mar. El curso real del Río Piura desemboca en la Laguna Ramón.
- Los valores de Riverbed Botton y Head River fijados para modelar el Río Piura son totalmente irreales de hasta 74 y 120 m. por debajo de la cota del terreno. El río Piura en realidad tiene secciones de entre 1.5 a 5 m. de profundidad con respecto al terreno.
- El modelo no considera la recarga desde la parte alta de la Cuenca Piura, siendo ésta recarga mencionada en toda la bibliografía revisada.
- Existen serias inconsistencias en el balance del acuífero, que no concuerdan con lo expuesto en la descripción conceptual del modelo y tampoco presenta el flujo entre capas.
- El modelo no fue calibrado, el estudio menciona “que los resultados obtenidos son el mejor indicador, que las asunciones efectuadas son las correctas y apropiadas para el objetivo del modelo”.
- No se presenta el balance del modelo realizado en régimen transitorio y mucho menos se analiza sus resultados.

Finalmente, el modelo desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua, presenta serias limitaciones y deficiencias que no estarían modelando el comportamiento del acuífero. Esto empeora más, al no haber existido un proceso de calibración que ajuste los parámetros del modelo.

3.2.3.3. Mejoras a considerar en modelos futuros

Los modelos previos desarrollados para el acuífero del Medio y Bajo Piura pueden ser mejorados considerando lo siguiente:

- Elaborar un modelo conceptual convincente que guarde relación con la información bibliográfica del área de estudio.
- Determinar e indicar claramente los parámetros hidráulicos que serán utilizados para la modelación del acuífero.
- Mejorar la caracterización del río y lagunas dentro del modelo de aguas subterráneas.
- Considerar en el modelo las recargas del acuífero desde la parte alta de la Cuenca Piura.
- Diferenciar claramente el volumen de explotaciones del acuífero libre y del acuífero confinado.
- Analizar los resultados obtenidos, a fin de mejorar el entendimiento de la interacción de flujos en el sistema acuífero.
- Realizar un proceso de calibración de los parámetros para lograr reproducir las observaciones de altura hidráulica en el acuífero libre y confinado.

Además, se deben efectuar estudios con fines de caracterización lito estratigráfica, que permitan una mejor definición de la geometría y límites del acuífero.

4. PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO

4.1. Modelo Hidrogeológico Conceptual

El propósito del modelo conceptual es la simplificación del problema y organización de la información existente, de modo que el sistema acuífero pueda ser analizado más fácilmente (Maheswaran et al., 2016). El acuífero del VMBP está conformado principalmente por las formaciones terciarias Miramar, Montera y Zapallal, las cuales se encuentran cubiertas por sedimentos cuaternarios de origen eólico y fluvial. Debido a esto, la extensión de las formaciones terciarias y los límites del acuífero inferior no están bien definidos, por lo cual se ha utilizado el perímetro de la Subcuenca Bajo Piura como límite del modelo hidrogeológico. Verticalmente el modelo se divide en tres zonas, acuífero libre (superior), semi acuitardo (intermedio) y acuífero confinado (inferior). Las prospecciones geofísicas presentadas en el último estudio realizado por la ANA (ANA-DCPRH, 2015) y un DEM de resolución 30 m. (NASA, 2017), han permitido construir las capas del modelo hidrogeológico como se observa en la **Figura 35**. Los espesores promedio de las capas son 220 m., 46 m. y 731

m. para el acuífero libre, el semi acuitardo y el acuífero confinado respectivamente. El espesor del acuífero confinado ha sido estimado, ya que no se logró alcanzar el basamento con las prospecciones geofísicas realizadas.

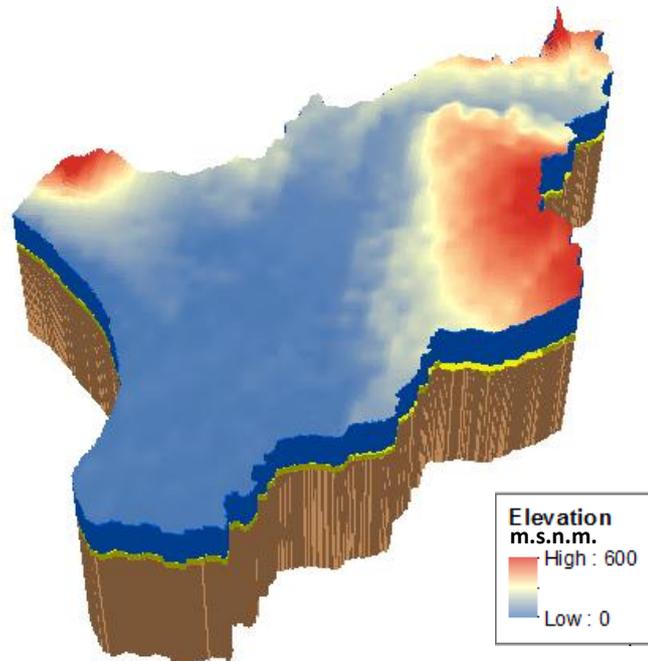


Figura 35. Modelo 3D del Acuífero del Medio y Bajo Piura.
Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015)

El acuífero libre presenta permeabilidades que oscilan entre 8.64 hasta 432 m/d (Servicio Geológico Checo, 2010) y el acuífero confinado valores de conductividad hidráulica de entre 0.04 y 0.87 m/d, según las pruebas hidrodinámicas de los pozos de bombeo realizados por la ANA (ANA-DCPRH, 2015) . El acuífero libre tiene una tasa de explotación baja, debido a la pobre calidad del agua, con conductividades eléctricas superiores a 2 mS/cm. La circulación del flujo es de NE a SO hasta el límite con el Océano Pacífico. El acuífero confinado presenta una tasa de explotación bastante alta llegando a alterar la circulación natural del flujo. Siendo la circulación del flujo desde los bordes de la subcuenca Bajo Piura hacia el centro debido al gradiente producido por las extracciones de bombes en la ciudad de Piura. La alta explotación de las aguas del acuífero inferior es principalmente para abastecimiento urbano, presentando valores de conductividades eléctricas inferiores a 2 mS/cm. El acuífero del VMBP es un acuífero costero que estaría siendo principalmente recargado desde la parte alta de la cuenca Piura y por los retornos de riego de las zonas de cultivos. Los ingresos de flujo en el acuífero superior son los retornos de

riego, la recarga lateral proveniente de transferencias del acuífero del Alto Piura, las transferencias del río y el intercambio de flujo desde el acuífero inferior. Las salidas de flujo son las extracciones por bombeos, las transferencias al río, intercambio de flujo hacia el acuífero inferior y salidas al mar. En el acuífero confinado los ingresos de flujo son, la recarga lateral proveniente del acuífero del Alto Piura y el intercambio de flujo desde el acuífero superior. Las salidas de flujo consideradas son las extracciones por bombeos, intercambio de flujo hacia el acuífero superior y salidas al mar. En la **Figura 36** se esquematiza las entradas y salidas de flujo del sistema de aguas subterráneas del valle, que fueron consideradas para la conceptualización del modelo hidrogeológico.



Figura 36. Esquema del Modelo Conceptual Hidrogeológico del VMBP.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Modelo Hidrogeológico Numérico

El modelo numérico del VMBP ha sido desarrollado con el software Processing Modflow for Windows (PMWIN). PMWIN es un sistema de simulación para modelamiento de aguas subterráneas y procesos de transporte (Simcore Software, 2012), con el modelo modular tridimensional MODFLOW de la U.S. Geological Survey (Harbaugh, Arlen, 2005).

El periodo de evaluación del modelo numérico hidrogeológico es desde el año 2004 al año 2014. Desde el año 2004 la ANA tiene registros anuales de los niveles piezométricos del acuífero del VMBP, y en el año 2014 se realizó el último inventario de las extracciones de bombeo del acuífero.

Inicialmente se construyó un modelo en estado estacionario para el año 2004, utilizando como condiciones iniciales los niveles registrados por los piezómetros, realizándose un proceso de calibración hasta reproducir los valores observados. La superficie de altura hidráulica resultante del modelo estacionario fue utilizada como condición inicial para la construcción del modelo en estado transitorio.

4.2.1. Discretización del modelo

El área del modelo corresponde al área de la subcuenca Bajo Piura con una extensión de 5 544.1 km², discretizado en celdas regulares de 300 x 300 m., teniendo el modelo un total de 305 columnas y 420 filas considerando celdas activas e inactivas.

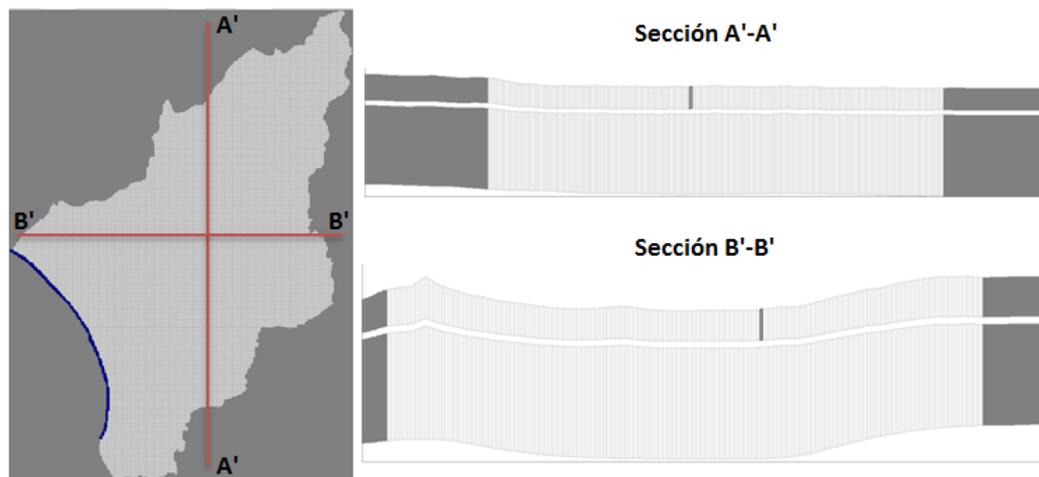


Figura 37. Discretización del modelo del VMBP.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 37**, se observa la vista de planta, un corte transversal y un corte longitudinal del modelo. Para la correcta representación del acuífero se establecieron celdas inactivas y celdas de altura hidráulica constante para el límite con el Océano Pacífico. Verticalmente el modelo se discretizó en dos capas que representan el acuífero libre (capa1) y el acuífero confinado (capa2). Con el propósito de disminuir el número de ecuaciones a ser resueltas por el modelo numérico, la capa intermedia del semi acuitardo no se representó físicamente. Sin embargo, su influencia en el sistema se modeló a través de los valores de conductividad hidráulica vertical de las capa1 y capa2. Para el modelo en estado estacionario y estado transitorio se utilizó como unidad temporal el día. El modelo en régimen transitorio se evaluó desde el mes de octubre del año 2004

hasta el mes de octubre del año 2014, siendo un total de 10 años simulados. La discretización se realizó en 121 periodos de 30 días, con 10 pasos de tiempo para el cálculo de cada periodo y un multiplicador de 1.05.

4.2.2. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del modelo en régimen estacionario corresponden a la superficie de altura hidráulica de Octubre del 2004, que fue interpolada con el método geo estadístico Kriging Ordinario, y extrapolado hacia toda el área del modelo en base a la tendencia de distribución espacial de los valores. Las condiciones iniciales para el modelo en régimen transitorio fueron los resultados de altura hidráulica obtenidas del modelo calibrado en estado estacionario.

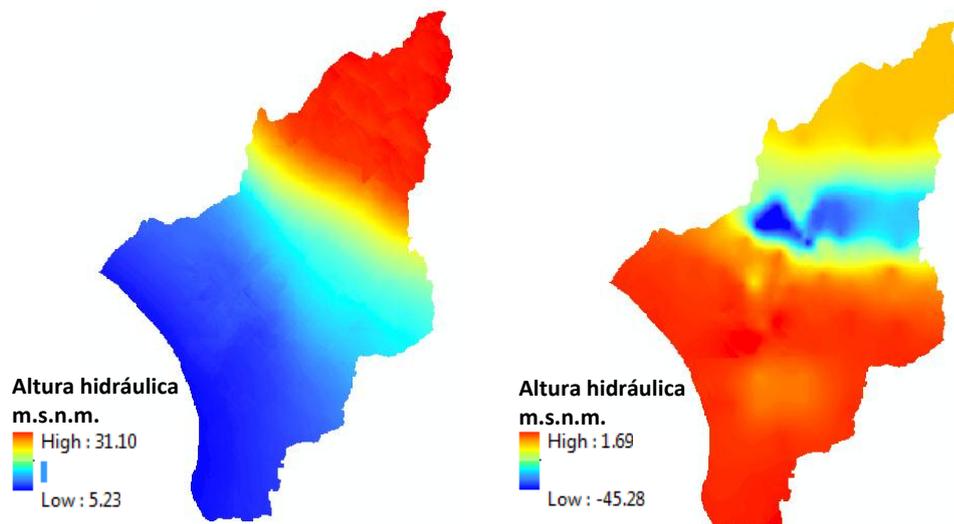


Figura 38. Condiciones iniciales en régimen estacionario para capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).
Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015)

4.2.3. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos que fueron establecidos a priori en ambas capas del modelo numérico hidrogeológico son los siguientes; conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico y porosidad efectiva.

Según el estudio del Servicio Geológico Checo los valores de conductividad hidráulica oscilan entre 8.64 y 432 m/d en la capa1, y entre 0.86 y 7.78 m/d para la capa2. El coeficiente de almacenamiento $S=0.0002$ y el rendimiento específico $S_y=0.2$ (Servicio Geológico Checo, 2010).

Según el estudio más reciente de la ANA las conductividades hidráulicas de la capa1 se encontraría entre 1.01 y 72 m/d, el almacenamiento específico

$S_s=0.00005$ y el rendimiento específico $S_y=0.2$. No obstante, las pruebas hidrodinámicas realizadas en los pozos de bombeo publicadas en el mismo estudio refieren conductividades hidráulicas de entre 0.0496 a 0.875 m/d y coeficientes de almacenamiento de entre 0.0000956 a 0.000525 (ANA-DCPRH, 2015).

Para establecer los valores iniciales de los parámetros hidráulicos del modelo, se ha establecido una zonificación de 48 zonas homogéneas e isotrópicas, que permitan representar la heterogeneidad de las capas del acuífero, ver **Tabla 10** y **Figura 39**. Esta zonificación se ha realizado en función de la litología y la distribución de los parámetros obtenidos de las pruebas hidrodinámicas de la ANA.

Las conductividades hidráulicas (K) iniciales han sido establecidas en función de los valores obtenidos de las pruebas hidrodinámicas de la ANA. Sin embargo, ha sido necesario recurrir a valores teóricos, en las zonas que no fueron cubiertas por estas pruebas. En el plano horizontal la conductividad hidráulica es isotrópica y se estableció una anisotropía vertical igual a 100. Los valores de coeficiente de almacenamiento (S) obtenidos de las pruebas hidrodinámicas fueron convertidos a almacenamiento específico (S_s) y completados con valores teóricos según la geología. El rendimiento específico (S_y) y la porosidad efectiva se obtuvieron de valores teóricos según la geología. Los valores que se presentan en la **Tabla 10** son los parámetros iniciales del modelo para las capas 1 y 2.

Tabla 10. Valores iniciales de los parámetros hidráulicos del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

ZONA	LITOLOGIA	SIMBOLO	PARAMETROS INICIALES DEL MODELO			
			K (m/d)	Sy	Ss (1/m)	Porosidad
1	Formacion Miramar	Tms-mi	1.00	0.21	5.00E-05	0.21
2	Volcánico Ereó	Km-ve	0.03	0.26	5.00E-05	0.26
3	Formacion Tambo Grande	Ts-tg	1.00	0.32	5.00E-05	0.32
4	Granito Paltashaco	KT-gr-p	0.03	0.26	5.00E-05	0.26
5	Deposito Fluvial	Qr-fl	0.10	0.15	1.00E-04	0.15
6	Granito Querobamba	Pi-gr	0.03	0.26	5.00E-05	0.26
7	Depositos mixtos lacustres	Qrm-la	1.00	0.25	1.00E-04	0.25
8	Indiviso	Pi	0.03	0.26	5.00E-05	0.26
9	Granito	Ks-gr	0.03	0.26	5.00E-05	0.26
10	Formacion La Mesa	Ks-h	0.10	0.21	5.00E-05	0.21
11	Formacion Tablazo Lobitos	Qp-tl	5.00	0.32	1.00E-04	0.32
12	Depositos mixtos de playa	Qrm-pl	1.00	0.30	1.00E-04	0.25
13	Deposito antiguos aluviales	Qp-al	0.10	0.15	1.00E-04	0.15
14	Formacion Tablazo Lobitos	Qp-tl	5.00	0.32	1.00E-04	0.32
15	Formacion Zapallal superior	Tm-zas	1.00	0.14	5.00E-05	0.14
16	Depositos aluviales recientes	Qr-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
17	Depositos Eolicos	Qr-e	1.00	0.32	1.00E-04	0.32
18	Depositos aluviales recientes	Qr-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
19	Deposito antiguos aluviales	Qp-al	0.10	0.15	1.00E-04	0.15
20	Formacion Montera	Tm-mo	1.00	0.22	5.00E-05	0.21
21	Formacion Chira	Te-ch	1.39	0.27	5.00E-05	0.21
22	Depositos Eolicos	Qr-e	1.00	0.32	1.00E-04	0.32
23	Formacion Tablazo Talara	Qp-tt	2.00	0.33	1.00E-04	0.33
24	Depositos Eolicos	Qr-e	1.00	0.32	1.00E-04	0.32
25	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
26	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
27	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
28	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
29	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
30	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
31	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.53	0.18	1.00E-04	0.15
32	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
33	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
34	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
35	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
36	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
37	Depositos aluviales recientes	Qe-al	1.06	0.18	1.00E-04	0.15
38	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.59	0.20	1.00E-04	0.15
39	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
40	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.34	0.15	1.00E-04	0.15
41	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
42	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
43	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.56	0.23	1.00E-04	0.15
44	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.14	0.15	1.00E-04	0.15
45	Depositos aluviales recientes	Qe-al	0.44	0.15	1.00E-04	0.15
46	Depositos aluviales recientes	Qr-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
47	Depositos aluviales recientes	Qr-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15
48	Depositos aluviales recientes	Qr-al	0.22	0.15	1.00E-04	0.15

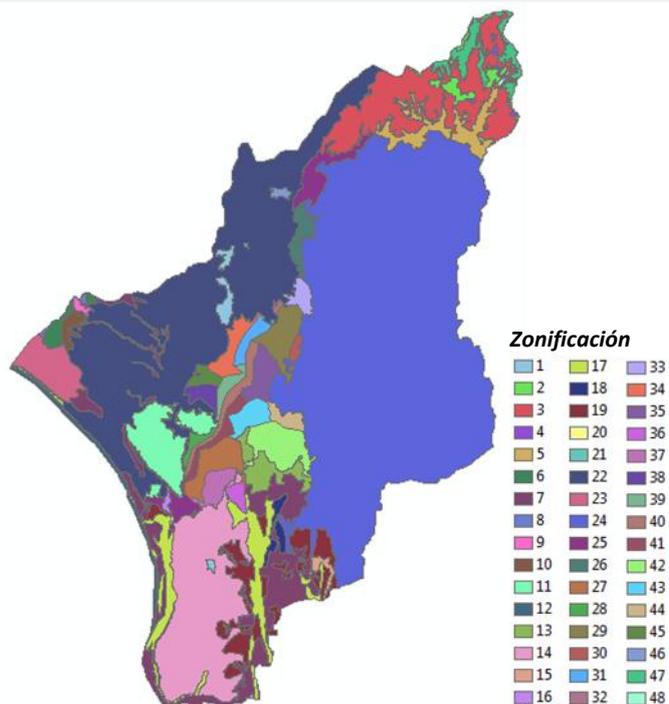


Figura 39. Zonificación de parámetros hidráulicos del modelo.

Fuente: Elaboración propia

No se especifican valores de permeabilidad por separado para la capa 1 y 2, debido a que la información geológica del acuífero inferior es limitada, ya que esta extensamente cubierto por las formaciones cuaternarias. No obstante, estos valores servirán como valores iniciales para la calibración del modelo, en donde se establecerán valores de permeabilidad diferenciados para ambas capas.

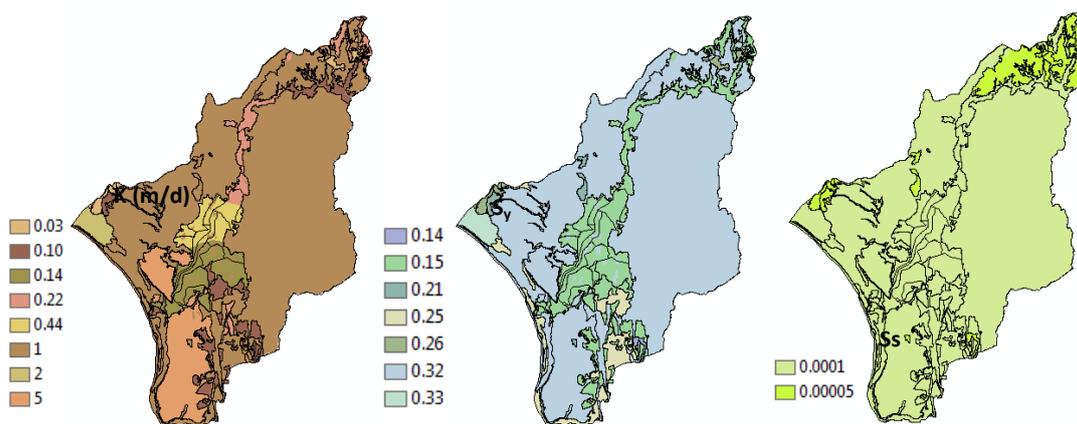


Figura 40. Distribución espacial de los parámetros iniciales del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Red Piezométrica

Se cuenta con registros de alturas hidráulicas desde el año 2004 hasta el año 2014. Estos datos son monitoreados anualmente en 69 pozos de bombeo seleccionados por la Autoridad Nacional del Agua como red piezométrica. De acuerdo a la clasificación que se ha realizado en este trabajo, 36 pozos representarían los valores de altura hidráulica del acuífero superior (capa1) y 33 los valores de altura hidráulica del acuífero inferior (capa2). En la **Figura 41** se presenta la distribución espacial de los 69 pozos en el área del modelo y la codificación de los pozos, anteponiendo una *S* para los pozos del acuífero superior (capa1) y una *P* para los pozos del acuífero inferior (capa2). En la **Tabla 11** se presentan los valores registrados por los piezómetros, se observa que a partir del año 2007 existe una disminución de los datos registrados, esto es debido a que algunos pozos pueden estar no operativos o enterrados. Además, estando la red piezométrica compuesta por pozos de bombeo y no piezómetros, fue necesaria la depuración de datos con el objetivo de conseguir buenos resultados en el proceso de calibración.

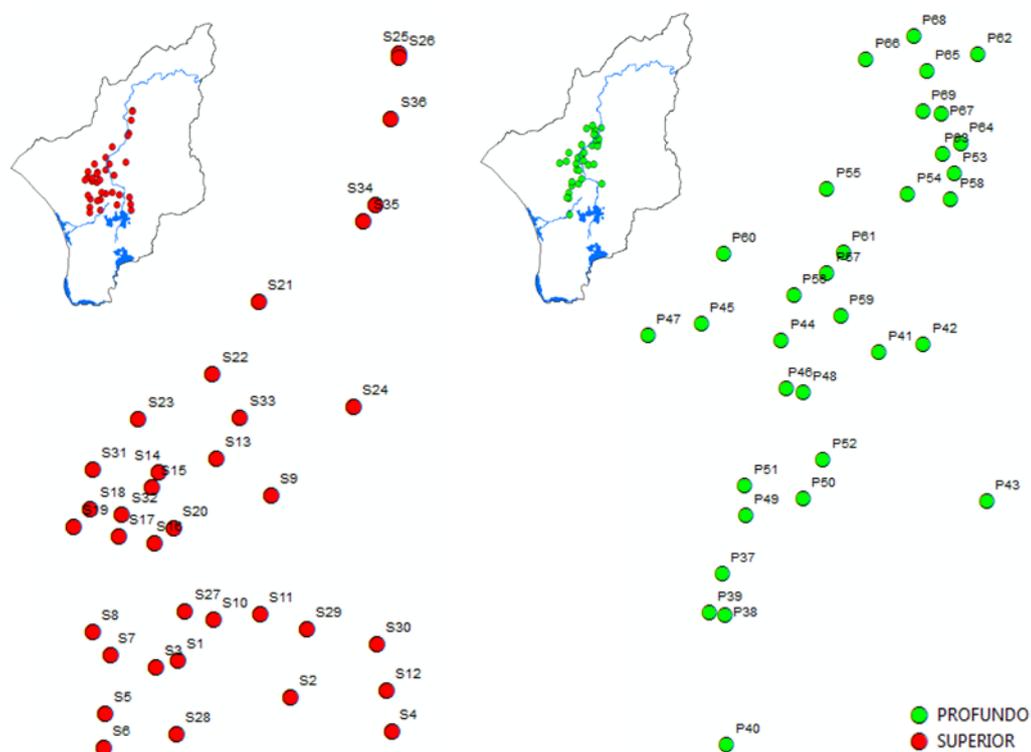


Figura 41. Codificación de la red piezométrica del acuífero inferior y superior.
Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015)

Tabla 11. Registros de la red piezométrica de la ANA entre los años 2004 - 2014.

Fuente: Elaboración propia con datos (ANA-DCPRH, 2015)

OBS	oct-04	nov_04	abr_05	oct_05	abr_06	oct_06	abr_07	oct_07	abr_08	ago_11	jul_12	abr_13	abr_14	oct_14
S1		6.40												5.53
S2	8.59	8.51	9.69	8.97	9.81	8.92	10.12	8.94	9.67	9.07	10.07	9.12	8.69	8.83
S3	7.22	7.12	7.67	7.28	7.92	6.90	7.69	7.09	7.81	7.27				7.37
S4									10.50					10.37
S5	7.32	7.29	7.82	7.97	8.30	7.74	8.19	7.91	8.15	7.32	6.92			6.86
S6	8.26	8.16	9.06	8.60	9.14	8.77	9.91	8.68	8.80	8.76	8.73	10.21	9.79	9.61
S7	6.53	6.43	6.88	6.38	6.34	5.76								
S8	9.79	9.71	9.74	7.99	9.54	9.54	8.58	9.84	8.37					
S9	10.85	10.73	11.19	11.39	11.85	11.67	12.03		11.80					11.35
S10	7.73	7.68	8.17	8.31	7.83	6.99	7.42		7.58	7.58	6.27			6.81
S11	8.57	8.42	8.77	8.92	8.97	8.43	8.85		8.90	9.43				9.47
S12	12.97	12.93		12.60	12.48	12.51	12.32		12.49		12.97			
S13			10.34	9.27	10.73	9.86	9.57	9.38	10.24	9.26				9.21
S14	8.36	8.31	7.81	7.48	9.01	7.62	7.93	8.45	8.17	7.66				7.88
S15	7.21	7.20	9.26	9.21	8.87	7.73	9.11		8.97	8.63				7.79
S16	8.64	8.60	8.84	9.61	9.54	8.97	9.02	8.67	9.42	9.02	7.44			
S17	8.86	8.82	8.46	9.66	8.56	8.94	8.92	8.93	9.32	9.16				8.06
S18	6.42	6.42	5.72	7.28	7.08	5.79	7.43	6.61	6.95	7.37	5.22			6.70
S19	9.11	9.09	9.16	7.58	9.56	7.53	8.82	7.42	9.77	8.86	8.11	7.51	7.51	8.86
S20			5.71	5.99	5.33	6.62	6.63		6.17	7.31		6.31	6.31	5.33
S21	12.14	12.08	12.64	12.82	13.07	13.23	13.32		13.36					
S22	12.35	12.27	13.30	12.88	12.83	12.32	13.51		13.37	13.23	13.13	13.83	13.25	11.50
S23	10.20	10.05	11.20	10.92	11.47	11.01	10.92		10.49	10.92	10.85			11.60
S24	14.64	14.54							16.62	15.54	15.54			14.86
S25	28.90	28.81	27.75	28.03	27.41	27.21	27.89	26.24	29.00	29.44	29.46	29.06	28.36	28.66
S26	29.15	29.02	26.23	26.72	26.80	26.62	27.06		27.53	30.55	29.51	28.99	30.15	29.89
S27	5.07	4.92	5.10	5.10	5.46	5.18	5.41	5.01	5.45		4.47			4.97
S28	4.15	4.03	5.05	4.60	4.78	4.28	4.37	4.22	4.33	4.15				
S29	3.72	3.54	3.12	2.42	2.72	2.25	2.25		2.49	1.87	1.92			
S30	14.04	13.93	13.89	13.72	13.39	13.48	13.61			12.53				
S31	4.95	4.94	5.58	5.35	6.01	5.26	5.50		5.50	5.45				
S32	9.54	9.49	10.43	10.47	10.59	9.19	10.43		10.70	9.97				10.51
S33	12.90	12.84	13.30	13.28	13.65	13.06	13.32		13.57					
S34	16.92	16.63		18.97	19.69				18.05	15.93	15.93			
S35			5.82	6.26	6.38	7.05	6.85		6.01					
S36	10.02	9.94	10.63	9.42	8.49	9.27	9.41		11.46			10.33	9.63	
P37	1.01	0.91	-1.80	-1.50	-1.21	-0.60	-0.93	-0.81	-1.30		-0.90	-1.90	-1.90	
P38	-1.10	-1.18		-1.25		-1.49	-2.68	-1.03	-1.80					
P39	1.83	1.77	1.03	0.96		0.16	-1.03	-0.81	-0.92					0.32
P40	-6.27	-6.30		-5.45	-6.66	-7.71	-7.61	-7.05	-6.87	-9.80				-11.30
P41	-2.80	-2.91	-3.33	-3.17	-3.79	-3.34	-4.88		-4.04					-4.99
P42	-3.99	-4.03	-6.03	-6.33	-5.12	-6.22								
P43	-1.86	-2.01	-1.91	-1.50	-1.99	-2.00	-2.04		-1.80	-2.96				-5.46
P44	-3.72	-3.77	-3.51	-3.79	-4.44	-4.56	-4.91		-4.61		-3.39			
P45	-13.55	-13.61	-16.84		-16.96									
P46	-2.96	-3.04	-3.09	-3.01	-2.49	-3.90	-4.32	-2.01	-3.70	-1.56				
P47	-2.16	-2.18	-2.46	-2.41	-2.56	-2.59	-2.90		-2.39	-3.09		0.34	0.34	2.34
P48	-4.30	-4.25	-1.43	-0.78	-0.70	-1.34	-1.46		-1.08	0.61				-2.01
P49	-3.17	-3.12	-2.97	-2.89	-2.97	-4.50	-4.72	-3.08	-4.45		-1.47			
P50	0.49	0.55	0.34	0.62	0.44	0.06	-0.67		-0.33					
P51	-2.70	-2.73	-2.88	-2.76	-3.36	-4.08	-3.82	-5.00	-3.78					
P52	-0.30	-0.34	0.33	-0.46	-0.44	-1.17	-1.87		-1.46		-2.51			-4.11
P53				-17.61			-25.97		-19.61					
P54	-22.44	-22.55	-21.44	-21.64	-23.65	-22.81	-31.40				-30.84			
P55	-5.34	-5.27	-5.53	-5.45	-5.89	-6.03	-6.55				-6.84			-5.64
P56	-4.92	-4.99												
P57	-5.67	-6.05	-6.31	-6.92	-7.04	-7.85	-7.36		-7.03	-4.56	-4.45			
P58	-18.52	-18.63	-17.71	-17.66	-17.46	-18.66	-19.54							
P59	-6.67	-6.76	-6.80	-7.47	-6.86	-7.60	-6.99		-7.09			-8.76	-8.96	
P60	-9.43	-9.46	-9.40	-9.46	-9.93	-9.88	-10.65		-9.84	-10.74				-13.90
P61	-6.45	-6.51	-6.66	-9.69	-9.48	-16.08	-17.16		-17.16		-12.16	-13.16	-13.16	
P62	-36.24	-36.41												
P63	-32.49	-32.55	-32.49	-31.49	-29.33	-32.72	-31.39	-28.56	-29.07	-25.23				
P64	-42.23	-42.38	-42.93	-40.85	-27.93	-27.93	-27.93		-27.93					
P65	-29.59	-29.75	-29.28	-29.46	-31.52	-32.55	-31.11		-30.76					
P66	-44.13	-44.38	-44.03	-44.15	-44.11	-44.46	-41.83	-42.63	-37.83		-35.83			-38.13
P67	-30.10	-30.25	-29.85	-29.75	-29.90	-30.02	-47.60		-47.60		-44.60		-48.10	
P68	-23.27	-23.35	-23.16	-23.05	-23.14	-23.03	-27.82		-27.82					
P69	-39.59	-39.82	-39.47	-39.65	-39.52	-39.69	-45.77		-43.77		-46.77	-42.77		

4.2.5. Condiciones de contorno

El conocimiento de los límites del acuífero y su influencia en el movimiento de las aguas subterráneas es limitado. Sin embargo, se han realizado aproximaciones en función de la información encontrada en estudios previos. Las condiciones de contorno del modelo han sido establecidas a fin de modelar la recarga proveniente de la parte alta de la Cuenca Piura, la interacción río-acuífero y el límite del acuífero con el Océano Pacífico.

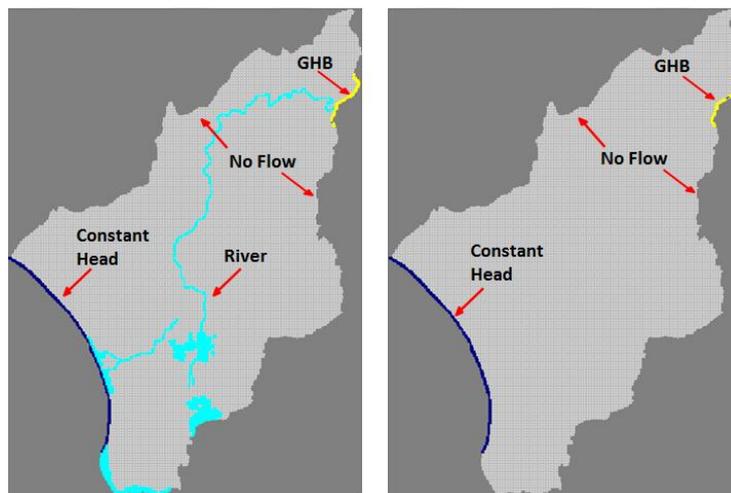


Figura 42. Condiciones de contorno del acuífero superior (izquierda) y acuífero inferior (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Para el límite con el Océano Pacífico se ha establecido una condición de borde Constant Head o de altura hidráulica constante, con un valor de nivel medio del mar de 0.8 m. (IMARPE, 2017).

Según Bolzicco y Arce existe una recarga del acuífero desde la parte alta de la Cuenca Piura (Bolzicco et al., 2013; Helberg Arce, 2011). Sin embargo, los límites del acuífero donde se estaría produciendo esta recarga y su magnitud son desconocidos. En el último estudio realizado por la ANA se realizó un balance con fines de estimación de la recarga del acuífero del Alto Piura, de donde se puede estimar que un valor igual o menor a 41.53 Hm³/año o 113,781 m³/d estaría recargando el acuífero del VMBP (ANA-DCPRH, 2015). Para introducir en el modelo el efecto de esta recarga lateral del acuífero, se ha utilizado una condición General Head Boundary, con altura hidráulica externa igual a 69 m. y conductancia hidráulica de 1684.8 m²/d para ambas capas. Estos valores fueron establecidos en función de los valores de altura hidráulica y permeabilidad

encontrados en los inventarios de aguas subterráneas del Alto Piura (ANA-DCPRH, 2009).

El estudio del Servicio Geológico Checo menciona que el río Piura tiene un ancho promedio de entre 100 y 150 m., con un índice ancho/profundidad del lecho $w/d=20$ (Servicio Geológico Checo, 2010), que serían profundidades del lecho de entre 5 a 7.5 m. El río ha sido modelado con el paquete River de MODFLOW, que requiere información de la elevación del nivel de agua del río, elevación del lecho y conductancia hidráulica del lecho. Debido a la poca información existente que caracterice al río Piura se ha estimado estos valores en función del Modelo de Elevación Digital (DEM) del terreno como se presenta en la **Figura 43**.

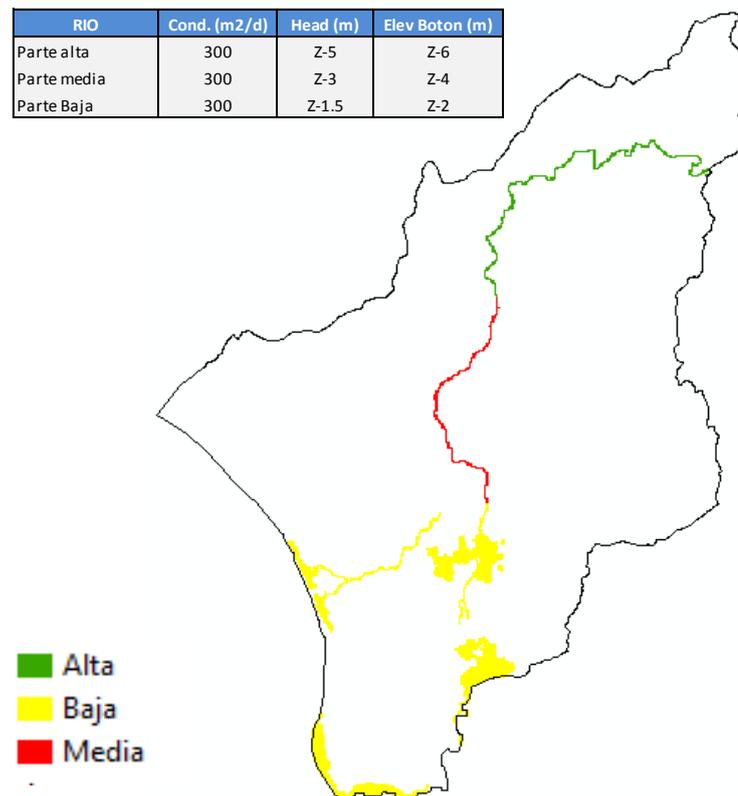


Figura 43. Caracterización del río y lagunas en el modelo.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 43** la letra **Z** corresponde a la cota del terreno en cada pixel que recorre el río y el valor de conductancia hidráulica se estableció considerando que el lecho está compuesto por arcillas poco permeables. Las lagunas Ñapique, Ramón y La Niña fueron también modeladas con el paquete River, ya que su

comportamiento es altamente dependiente de las aguas transportadas por el río, formándose como consecuencia de crecidas de caudal del Río Piura.

4.2.6. Recarga

La recarga promedio anual de retornos de riego ha sido estimada como el 10% de las pérdidas de aplicaciones de agua en los cultivos (SEA, 2012), siendo la eficiencia de riego de un 60% según se indica en la bibliografía revisada (INCLAM, 2013). Esto da como resultado una recarga efectiva promedio anual de 56.26 Hm³/año, equivalentes a 154,137 m³/d, que se distribuyen en los 913.2 km² del área agrícola. Este valor ha sido utilizado para las primeras aproximaciones del modelo estacionario en el mes de octubre del año 2004.

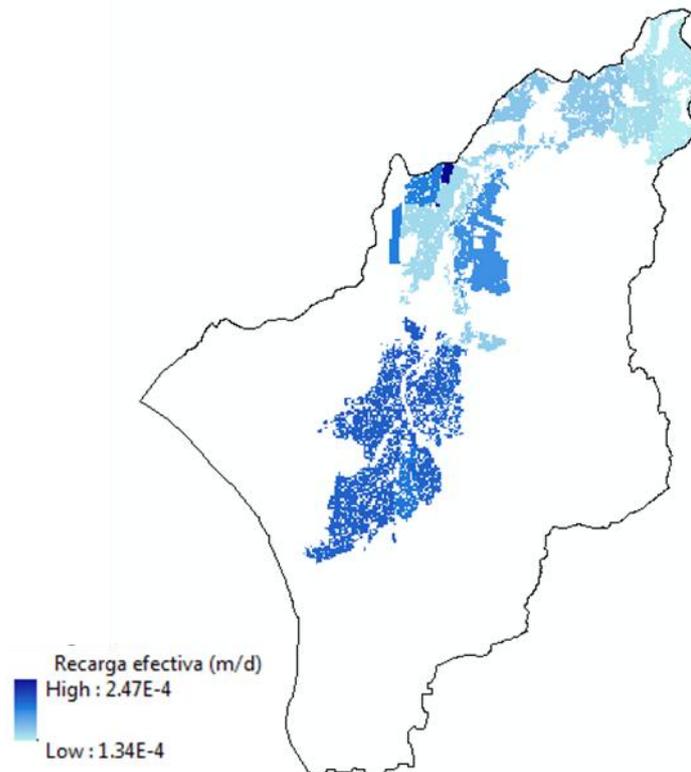


Figura 44. Distribución espacial de la recarga efectiva para el modelo en estado estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo en estado transitorio no se puede considerar un valor de recarga diaria constante, ya que las aplicaciones de riego varían según las campañas agrícolas y fenología de los cultivos. En la **Figura 45** se presentan las variaciones mensuales promedio de aplicación de riego y los valores de recarga efectiva que han sido utilizados para el modelo en estado transitorio.

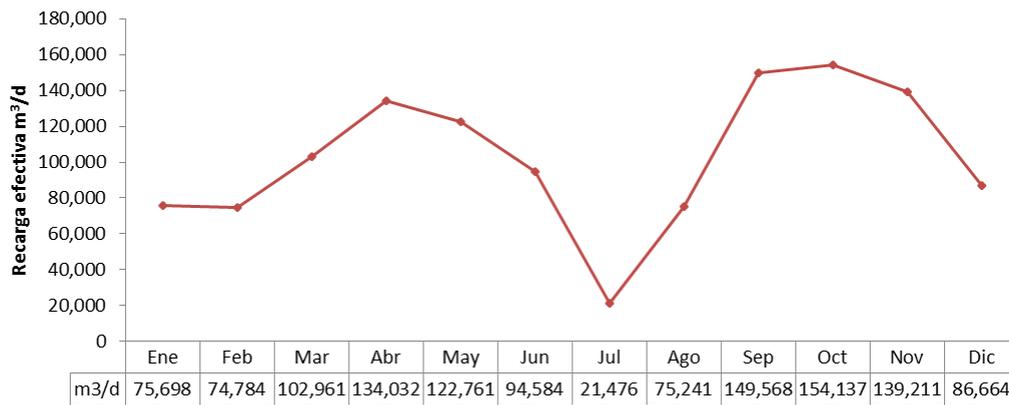


Figura 45. Variación anual de la recarga efectiva para el modelo en estado transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7. Extracciones de Bombeos

Se cuenta con datos de volúmenes de bombeo de los inventarios de los años 2004, 2011 y 2014. Sin embargo, los datos registrados en el año 2011 no siguen la tendencia creciente que se observa en los registros de explotación del acuífero desde el año 1980 hasta el año 2014, esto podría deberse a errores en la recopilación de información durante el inventario. Por este motivo, sólo fue utilizada la data de los años 2004 – 2014, realizándose una interpolación para completar los años intermedios.

En el año 2004 se registró una explotación de 43.27 Hm³/año, siendo 1.67 Hm³/año extraídos de pozos del acuífero libre y 41.6 Hm³/año de pozos del acuífero confinado, ver **Figura 46**. Para el año 2014 las extracciones ascendieron a 58.06 Hm³/año, siendo 3.36 Hm³/año extraídos de pozos del acuífero libre y 54.7 Hm³/año de pozos del acuífero confinado, ver **Figura 47**.

Sin embargo, como menciona Bolzicco existen deficiencias constructivas en las perforaciones de pozos del acuífero inferior (Bolzicco et al., 2013), por lo cual parte del caudal bombeado por los pozos que penetran el acuífero confinado estaría también siendo bombeado del acuífero libre. Para introducir esto en el modelo, se ha considerado que un 25% del volumen extraído de los pozos del acuífero inferior, pertenecería al acuífero superior sumándose a su volumen de explotación.

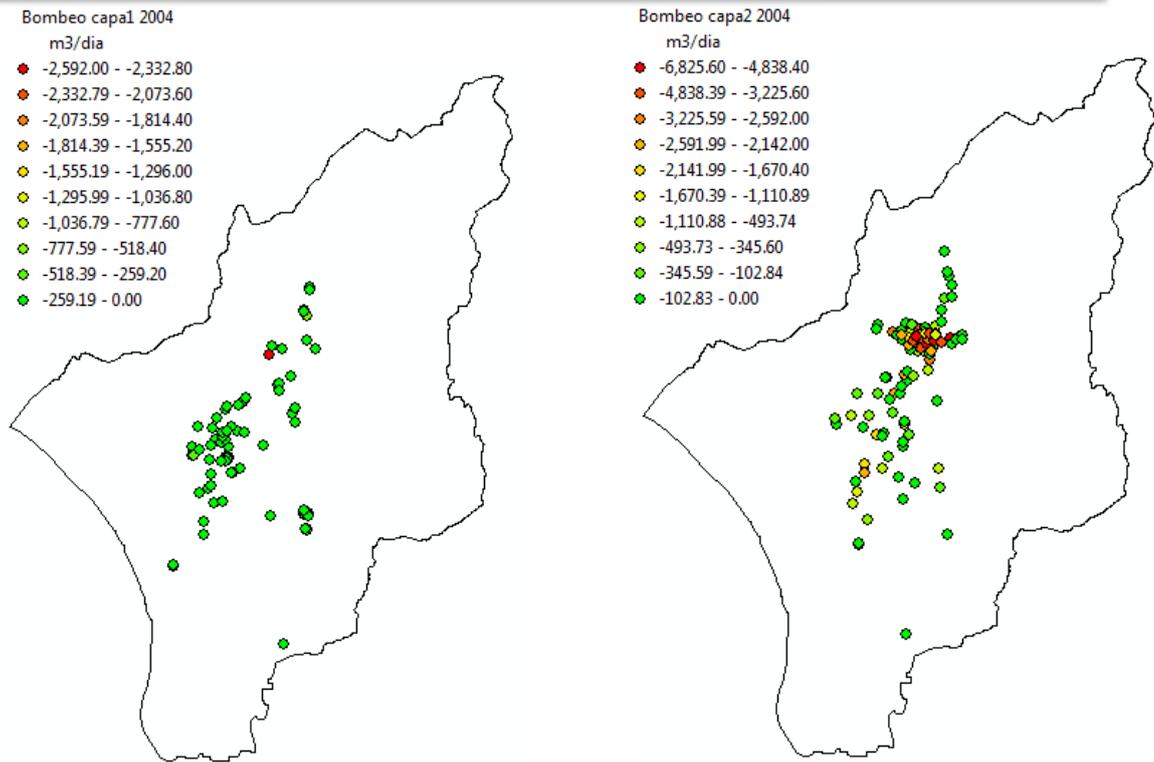


Figura 46. Volúmenes diarios de bombeo en acuífero superficial y confinado en el año 2004.
Fuente: Elaboración propia.

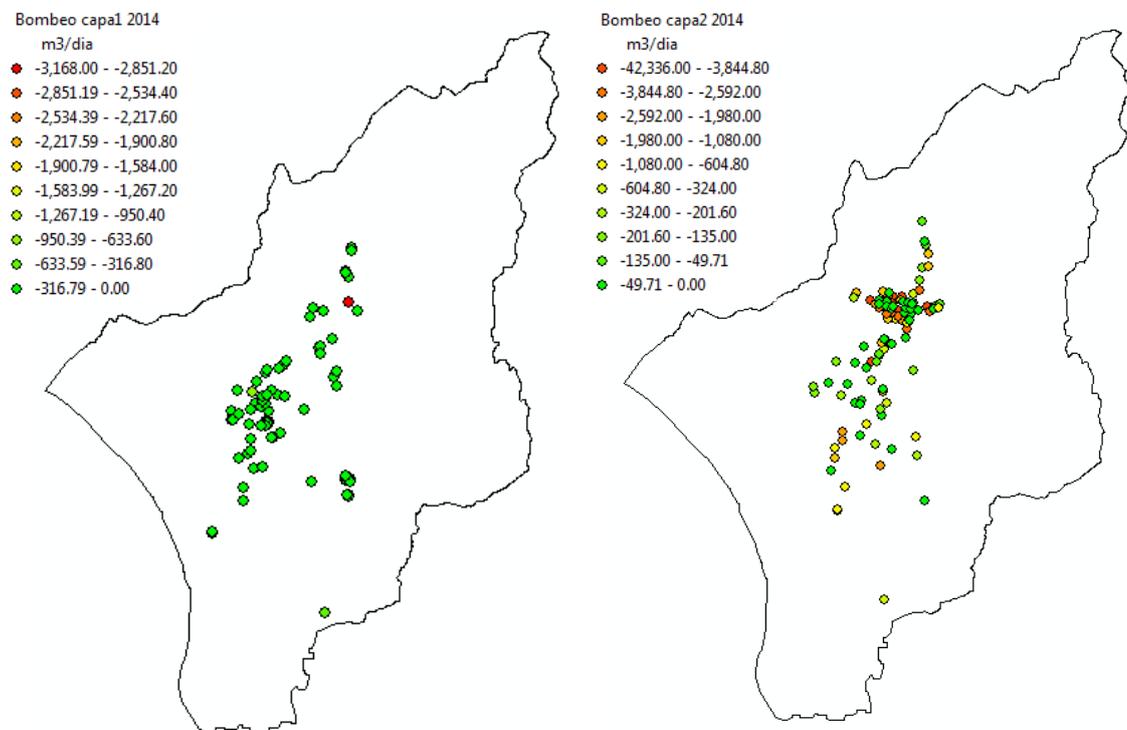


Figura 47. Volúmenes diarios de bombeo en acuífero superficial y confinado en el año 2014.
Fuente: Elaboración propia.

En base a las consideraciones antes descritas, fue ingresado al modelo un volumen de explotación de 117,915.04 m³/d, siendo 32,911.56 m³/d las extracciones del acuífero superficial y 85,003.47 m³/d las extracciones del acuífero inferior para el año 2004; y un valor de 154,681.03 m³/d para el año 2014, siendo 42,824.58 m³/d las extracciones del acuífero superficial y 111,856.50 m³/d del acuífero inferior. Como ya se mencionó líneas arriba, debido a la falta de datos los volúmenes de extracción de los años intermedios fueron interpolados.

5. CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO

5.1. Calibración en régimen estacionario

El proceso de calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el fin de reproducir las variables observadas, que este caso son las alturas hidráulicas registradas en los piezómetros del valle. Se debe tener presente que al involucrar un mayor número de parámetros en la calibración, el modelo es más susceptible a reproducir los mismos resultados bajo distintas combinaciones de parámetros, acentuando así el problema de la no unicidad. Ante esto, una cuidadosa selección de los parámetros a calibrar cobra relevancia puesto que al seguir el principio de parsimonia se puede reducir el grado de no unicidad, y lograr resultados de la calibración más confiables.

Para el proceso de calibración del modelo en régimen estacionario se ha considerado la calibración de las conductividades hidráulicas de la capa1 y capa2, mediante el modelo de calibración PEST (J. Doherty, 2016; J. E. Doherty, 2016). Adicionalmente, para mejorar el ajuste del modelo se modificó el valor de la recarga por retornos de riego utilizando la metodología de calibración prueba y error, quedando un valor ajustado de 144,696.38 m³/d, 6% menor al valor establecido en la conceptualización del modelo.

En la **Tabla 12** se presenta los valores calibrados de permeabilidad para ambas capas y los límites que fueron impuestos en PEST para obtener estos resultados.

Tabla 12. Límites y resultados de calibración automática con PEST para conductividades hidráulicas.

Fuente: Elaboración propia.

ZONA	Valor inicial	CALIBRACIÓN PERMEABILIDAD CAPA1 (m/d)			CALIBRACIÓN PERMEABILIDAD CAPA2 (m/d)		
		Límite mínimo	Límite máximo	K_1 (m/d)	Limite mínimo	limite maximo	K_2 (m/d)
1	1.00	1.00E-03	1.00E+00	1.00	1.00E-03	1.00E+00	0.16
2	0.03	3.00E-04	3.00E-02	0.03	3.00E-04	3.00E-02	0.03
3	1.00	1.00E-03	1.00E+00	1.00	1.00E-03	1.00E+00	0.74
4	0.03	1.00E-08	3.00E-02	0.01	1.00E-08	3.00E-02	0.03
5	0.10	1.00E+00	4.32E+02	3.97	1.00E-08	7.78E+00	0.49
6	0.03	3.00E-04	3.00E-02	0.01	3.00E-04	3.00E-02	0.03
7	1.00	1.00E+00	1.00E+02	3.03	1.00E-02	7.78E+00	0.20
8	0.03	3.00E-04	3.00E-02	0.02	3.00E-04	3.00E-02	0.03
9	0.03	3.00E-04	3.00E-02	0.01	3.00E-04	3.00E-02	0.03
10	0.10	1.00E-05	1.00E+00	0.08	1.00E-05	1.00E+00	0.38
11	5.00	1.00E+00	1.00E+02	4.53	1.00E+00	7.78E+00	1.50
12	1.00	1.00E+00	1.00E+02	4.53	1.00E-02	7.78E+00	0.10
13	0.10	1.00E+00	1.00E+02	3.29	1.00E-08	7.78E+00	0.29
14	5.00	1.00E+00	1.00E+02	4.53	1.00E-02	7.78E+00	0.10
15	1.00	1.00E-05	1.00E+00	0.39	1.00E-05	1.00E+00	0.82
16	0.14	1.00E+00	4.32E+02	2.48	1.00E-08	7.78E+00	0.59
17	1.00	1.00E+00	1.00E+02	2.24	1.00E-02	7.78E+00	0.25
18	0.22	1.00E+00	4.32E+02	2.02	1.00E-08	7.78E+00	0.84
19	0.10	1.00E+00	1.00E+02	3.92	1.00E-08	7.78E+00	0.92
20	1.00	1.00E-03	1.00E+00	0.25	1.00E-03	1.00E+00	0.48
21	1.39	1.00E-03	5.00E+00	2.06	1.00E-03	1.00E+00	0.99
22	1.00	1.00E+00	1.00E+02	4.53	1.00E-02	7.78E+00	0.52
23	2.00	1.00E+00	5.00E+00	4.53	1.00E+00	5.00E+00	1.80
24	1.00	1.00E+00	1.00E+02	4.53	1.00E-02	7.78E+00	0.02
25	0.22	1.00E+00	4.32E+02	4.36	1.00E-08	7.78E+00	0.31
26	0.22	1.00E+00	4.32E+02	4.25	1.00E-08	7.78E+00	0.33
27	0.14	1.00E+00	4.32E+02	3.98	1.00E-08	7.78E+00	0.21
28	0.14	1.00E+00	4.32E+02	5.84	1.00E-08	7.78E+00	0.47
29	0.44	1.00E+00	4.32E+02	6.92	1.00E-08	7.78E+00	0.03
30	0.44	1.00E+00	4.32E+02	5.06	1.00E-08	7.78E+00	0.04
31	0.53	1.00E+00	4.32E+02	5.24	1.00E-08	7.78E+00	0.54
32	0.22	1.00E+00	4.32E+02	2.00	1.00E-08	7.78E+00	0.11
33	0.22	1.00E+00	4.32E+02	2.15	1.00E-08	7.78E+00	0.69
34	0.44	1.00E+00	4.32E+02	1.66	1.00E-08	7.78E+00	0.01
35	0.44	1.00E+00	4.32E+02	4.12	1.00E-08	7.78E+00	0.26
36	0.14	1.00E+00	4.32E+02	2.89	1.00E-08	7.78E+00	0.21
37	1.06	1.00E+00	4.32E+02	3.99	1.00E-08	7.78E+00	0.19
38	0.59	1.00E+00	4.32E+02	3.29	1.00E-08	7.78E+00	0.56
39	0.44	1.00E+00	4.32E+02	3.88	1.00E-08	7.78E+00	0.01
40	0.34	1.00E+00	4.32E+02	5.77	1.00E-08	7.78E+00	0.10
41	0.14	1.00E+00	4.32E+02	3.42	1.00E-08	7.78E+00	0.12
42	0.14	1.00E+00	4.32E+02	2.09	1.00E-08	7.78E+00	0.23
43	0.56	1.00E+00	4.32E+02	3.49	1.00E-08	7.78E+00	0.19
44	0.14	1.00E+00	4.32E+02	3.98	1.00E-08	7.78E+00	0.06
45	0.44	1.00E+00	4.32E+02	1.61	1.00E-08	7.78E+00	0.01
46	0.22	1.00E+00	4.32E+02	2.21	1.00E-08	7.78E+00	0.63
47	0.22	1.00E+00	4.32E+02	1.32	1.00E-08	7.78E+00	0.53
48	0.22	1.00E+00	4.32E+02	1.32	1.00E-08	7.78E+00	0.53

Los valores iniciales y límites de la permeabilidad para la calibración automática fueron fijados en función de la información geológica y valores referenciales de estudios previos. En la **Figura 48** se presenta la distribución espacial de las conductividades hidráulicas calibradas en ambas capas del modelo. Tal como se

estima en estudios previos, las permeabilidades del acuífero superior tienen valores más altos que las permeabilidades del acuífero inferior.

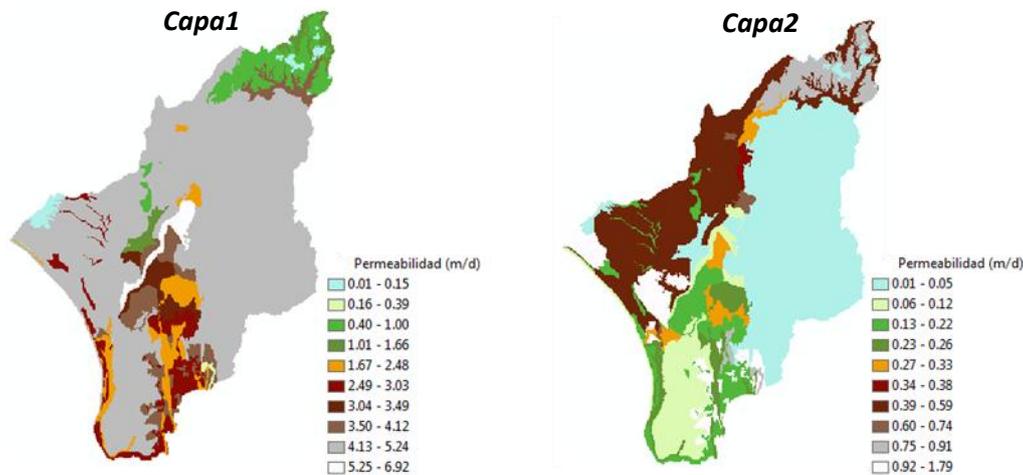


Figura 48. Conductividad hidráulica calibrada en el modelo en régimen estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

La precisión de los resultados se evaluó con 60 pozos de la red piezométrica, el máximo residual obtenido para el acuífero superior es 7.37 m. y para el acuífero inferior es 4.9 m. El histograma de residuos presenta una distribución simétrica centrada en torno a cero, lo cual indica una buena distribución de los errores de la calibración.

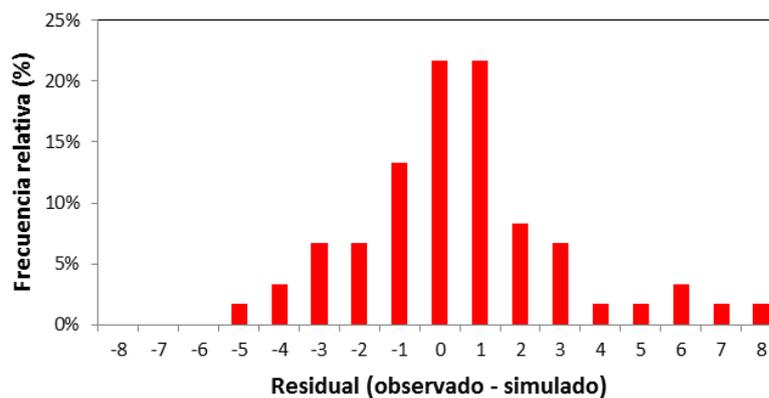


Figura 49. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 50 se presentan la evaluación estadística de la calibración del modelo en régimen estacionario y el gráfico de alturas hidráulicas observadas vs calculadas. La desviación estándar es una medida de la variación esperada con respecto a la media aritmética, siendo mejor mientras más pequeño es su valor. El coeficiente de

correlación (r) se evalúa entre 1 y -1, es un indicador del grado de relación lineal entre los valores observados y calculados. Si $r=0$, no existe relación lineal, si $r=1$ o $r=-1$, existe una perfecta relación lineal positiva o negativa. Aunque este estadístico es ampliamente usado para evaluación de modelos, es bastante sensible a valores extremos y poco sensible a diferencias proporcionales entre datos calculados y observados. Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual o ruido comparado con la varianza de los datos observado. NSE puede variar entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo del modelo. Valores de NSE entre 0.75 y 1 se consideran como muy buenos en la calibración de modelos a escala mensual (Moriassi et al., 2007). Dicho esto, se concluye que se obtuvo una calibración aceptable del modelo en régimen estacionario. Sin embargo, al estar los piezómetros concentrados en el área central del modelo, el ajuste de las alturas hidráulicas de los bordes del modelo no ha podido ser evaluado en el proceso de calibración.

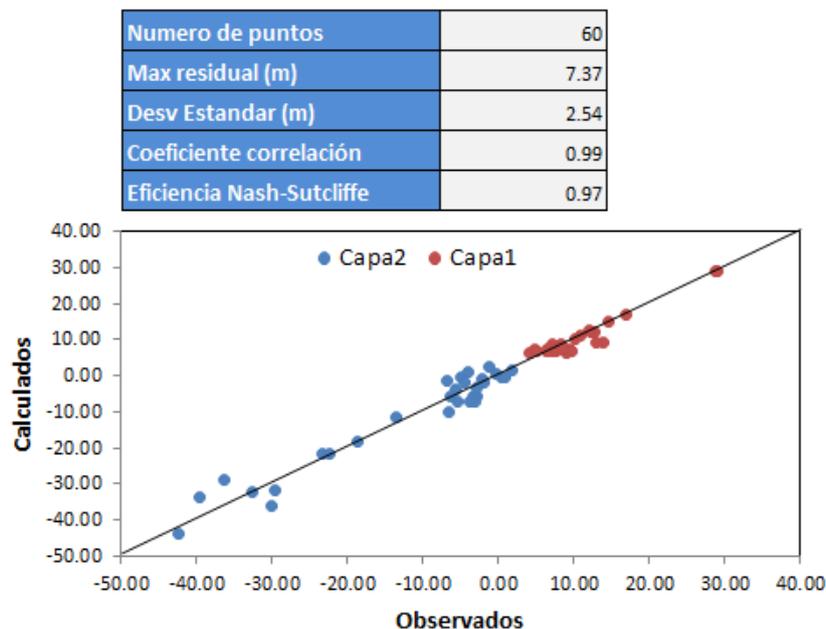


Figura 50. Análisis estadístico de alturas hidráulicas observadas vs calculadas en régimen estacionario.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Resultados del modelo en régimen estacionario

El modelo en régimen estacionario representa el año medio hidrológico 2004 con su correspondiente volumen de explotación. Su principal función es analizar numéricamente las hipótesis establecidas en el modelo conceptual, evaluar el

funcionamiento del sistema y obtener la piezometría inicial para el modelo transitorio, que será evaluado desde el 2004 hasta el 2014.

Las alturas hidráulicas resultantes y la dirección del flujo subterráneo se presentan en la **Figura 51** para ambas capas del modelo. La capa1 o acuífero superficial presenta un circulación del flujo de NE a SO hasta el Océano Pacifico, con un pequeño abatimiento en la ciudad de Piura de poca influencia en la circulación general de aguas. Los ríos y lagunas que fueron ingresados al modelo tampoco generan una marcada influencia en el flujo superficial. La altura hidráulica oscila entre 0.8 m., valor de la altura media del mar (IMARPE, 2017) y 70.36 m., valor que concuerda con los valores de altura hidráulica medidos en esta zona, correspondiente al acuífero del Alto Piura (ANA-DCPRH, 2009).

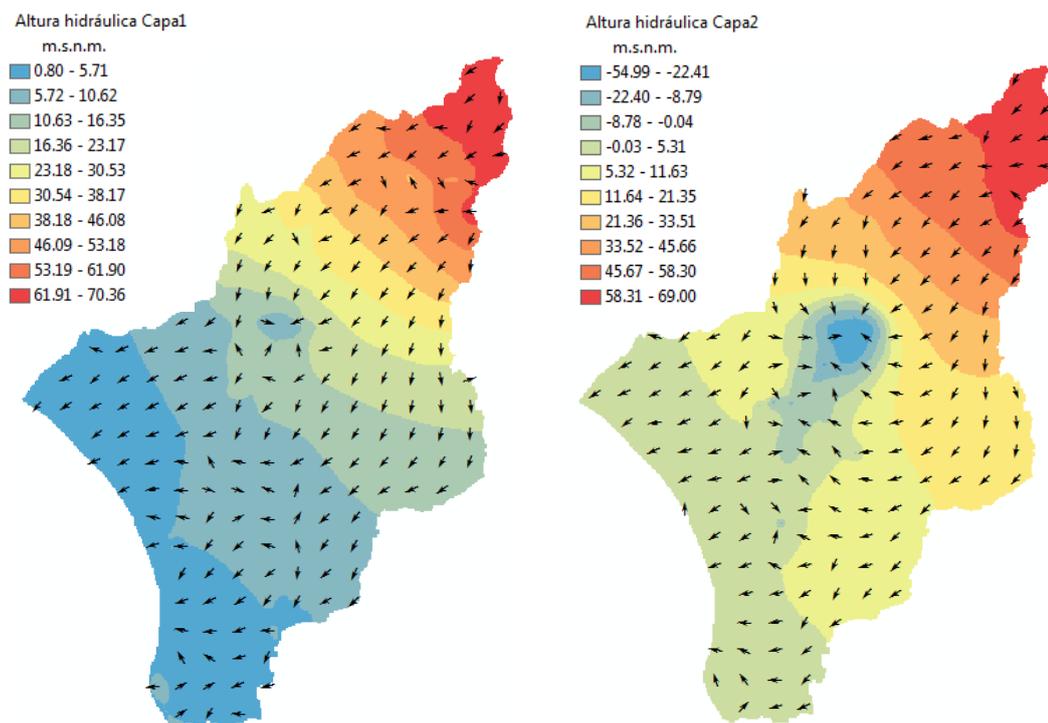


Figura 51. Alturas hidráulicas resultantes del modelo en régimen estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

En la capa2 o acuífero inferior, se ha logrado reproducir el cono de depresión de la ciudad de Piura producto de la intensiva explotación del acuífero. Como se menciona en estudios previos, se observa que la circulación natural del flujo seguía la misma dirección del acuífero superficial NE-SO. Sin embargo, ante la constante explotación se ha formado un fuerte abatimiento en el centro del modelo, produciendo un

gradiente hidráulico que altera la circulación natural del flujo, circulando desde los bordes del modelo hacia el centro.

Los flujos entrantes y salientes del modelo se han esquematizado en la **Figura 52** y **Figura 53**. Los cuerpos de agua superficiales se han clasificado por zonas para un mejor análisis de su influencia en el sistema. Los flujos entrantes en la capa1 provienen de las recargas por retorno de riego, recarga lateral proveniente del acuífero del Alto Piura y filtraciones de los cuerpos de agua superficiales. Los flujos salientes están compuestos por los bombeos, la transferencia de flujo hacia la capa2, salida al mar e intercambios de flujo hacia los cuerpos de agua superficiales. La principales recargas del acuífero superficial son las producidas por retornos de riego y recarga lateral; y las principales descargas se deben al intercambio de flujo hacia la capa2, las salidas al mar y los bombeos en menor magnitud.

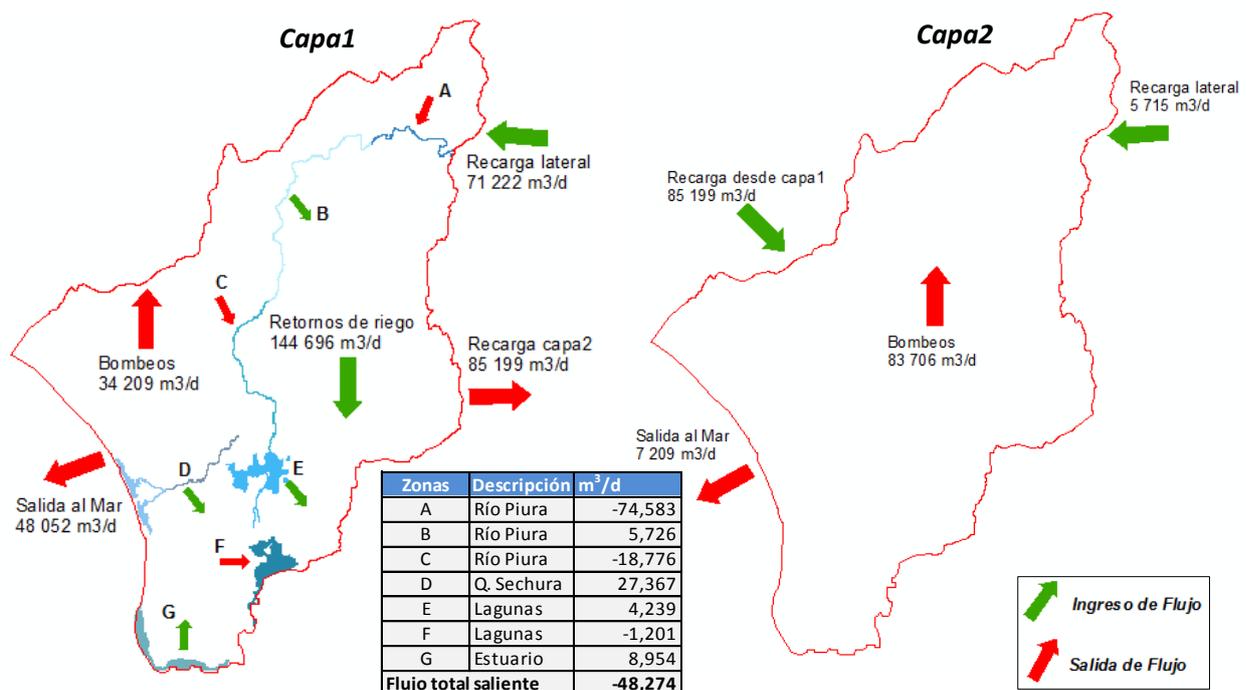


Figura 52. Representación esquemática de los flujos de capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

En el apartado de hidrología superficial del presente trabajo, se estimó que el río se comporta como ganador en la zona A y como perdedor en la zona B en función del balance de las estaciones hidrométricas Ñacara, Tambogrande y Sánchez Cerro. Además, el Servicio Geológico Checo estableció que existe una recarga del acuífero desde la zona B del Río Piura (Servicio Geológico Checo, 2010). Consecuentemente, las asunciones del modelo conceptual y valores asignados en el modelo numérico

logran reproducir esta interacción. No obstante, debido a la escasa información disponible no es posible comparar cuantitativamente la interacción del flujo entre los cuerpos de agua superficiales y el acuífero en estos tramos; y mucho menos hacia aguas abajo de la estación hidrométrica Sánchez Cerro donde no existe control hidrométrico.

El conocimiento del funcionamiento del acuífero inferior es mucho más limitado que el del acuífero superior. Pese a esto, se ha logrado reproducir las alturas hidráulicas observadas en los piezómetros bastante bien. El acuífero inferior o capa2 del modelo es recargado principalmente por flujos provenientes desde el acuífero superior y por transferencias de flujo desde el acuífero del Alto Piura. Siendo la principal salida de flujo debida a los bombeos y en menor magnitud a la salida de flujo al Océano Pacífico.

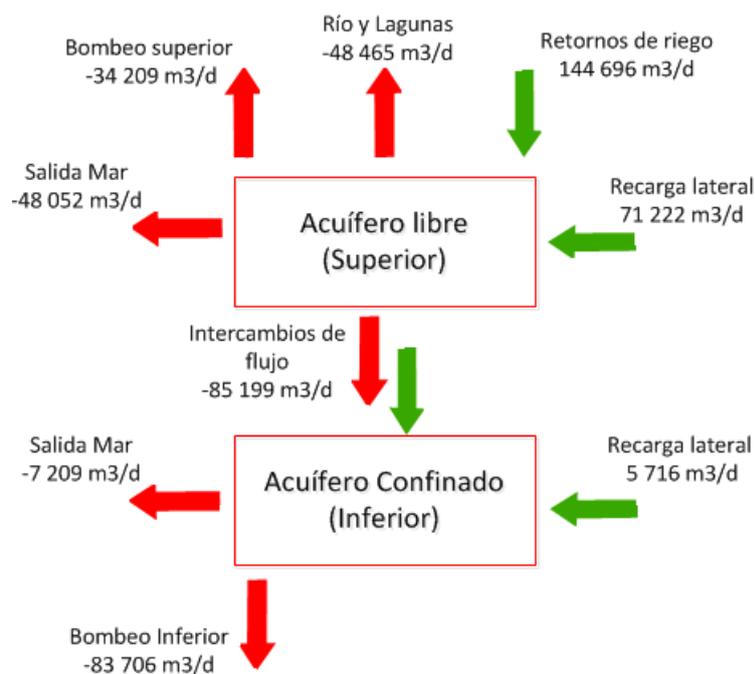


Figura 53. Esquema de balance de flujos del modelo en régimen estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

La magnitud de los flujos de ambas capas y total del sistema, se presenta en la **Figura 54** y **Figura 55**. Los antecedentes hidrogeológicos de la zona de estudio no mencionan problemas de intrusión marina en el acuífero, lo cual es reproducido en el modelo. El modelo reproduce una descarga al océano mucho más alta en la capa1 que en la capa2, esto puede ser debido a la alta explotación del acuífero inferior que ha cambiado la circulación natural del flujo. Con lo cual se puede deducir, que si se

mantiene esta explotación constante y sin control del acuífero confinado podría llegar a existir problemas de intrusión marina en el acuífero profundo.

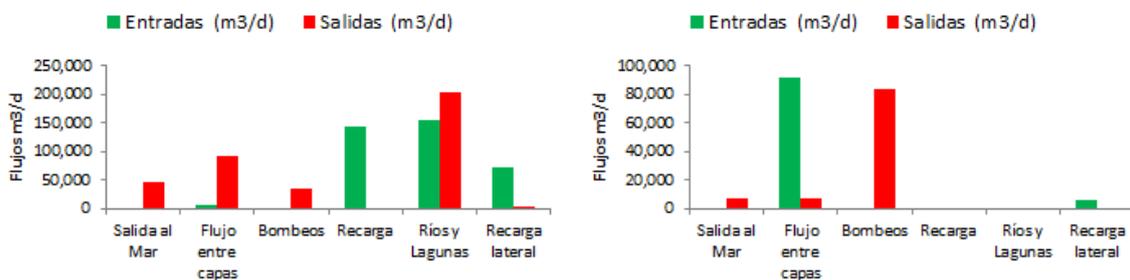


Figura 54. Representación de los flujos de entrada y salida de la capa1 (izquierda) y capa2 (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

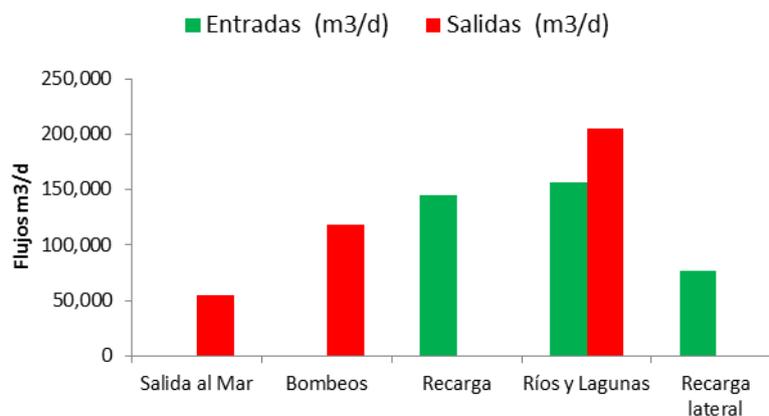


Figura 55. Representación de los flujos de entrada y salida total del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

El intercambio de flujo entre capas se produce principalmente de la capa1 hacia la capa2 pero también, un pequeño volumen es transferido en sentido contrario. El estudio del Servicio Geológico Checo menciona que en el pasado, en un escenario sin explotación del acuífero, el flujo circulaba desde la capa2 hacia la capa1 recargando el acuífero superior. Actualmente viene sucediendo lo contrario producto de la constante explotación del acuífero confinado.

Las extracciones de bombeo son significativamente superiores en la capa2 y representan la principal salida de flujo del acuífero inferior. Esto no ocurre en el acuífero superior, donde las extracciones de bombeo representan la menor salida de flujo, y la principal salida de flujo es la transferencia hacia el río Piura en la parte alta del modelo. Sin embargo, en la parte media y baja del modelo, donde los niveles de altura hidráulica se acercan a la superficie del terreno, los cuerpos de agua superficiales mayormente recargan el acuífero. La recarga de la capa1 por retornos de

riego representa uno de los principales ingresos de flujo al modelo, en conjunto con la recarga lateral proveniente del Alto Piura. No obstante, la transferencia lateral reproducida por el modelo en la capa2 es bastante inferior y al no existir referencias de estudios previos de la interacción con el acuífero del Alto Piura, no es posible reducir su incertidumbre.

Tabla 13. Balance de flujo del modelo estacionario.
Fuente: Elaboración propia.

Balance Capa1	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Salida al Mar	0.00	48,052.38	-48,052.38
Flujo entre capas	7,070.65	92,269.81	-85,199.15
Bombeos	0.00	34,208.64	-34,208.64
Recarga	144,696.38	0.00	144,696.38
Ríos y Lagunas	156,474.77	204,939.80	-48,465.03
Recarga lateral	71,257.15	35.30	71,221.84

Balance Capa2	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Salida al Mar	0.00	7,208.88	-7,208.88
Flujo entre capas	92,269.81	7,070.65	85,199.15
Bombeos	0.00	83,706.39	-83,706.39
Recarga	0.00	0.00	0.00
Ríos y Lagunas	0.00	0.00	0.00
Recarga lateral	5,715.80	0.00	5,715.80

Balance total del Modelo	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Salida al Mar	0.00	55,261.25	-55,261.25
Bombeos	0.00	117,915.04	-117,915.04
Recarga	144,696.38	0.00	144,696.38
Ríos y Lagunas	156,474.77	204,939.80	-48,465.03
Recarga lateral	76,972.95	35.30	76,937.64

Finalmente, en la **Tabla 13** se presenta el balance del modelo en régimen estacionario, en el cual se obtuvo una discrepancia de 0.00 % para ambas capas. La conceptualización del modelo ha supuesto una profunda reflexión sobre los conocimientos hidrogeológicos que se tenía de la zona de estudio, con lo cual se ha obtenido una buena calibración del modelo y resultados físicamente justificados teniendo en consideración las simplificaciones e incertidumbres del modelo numérico hidrogeológico.

5.3. Calibración en régimen transitorio

La correcta calibración de modelos de aguas subterráneas a menudo depende de múltiples tipos de observaciones, como observación de flujos, alturas hidráulicas, etc. Sin embargo, comúnmente para la estimación de los parámetros se utiliza datos históricos de altura hidráulica como el único o dominante tipo de observación (Faunt ed., 2009). En el caso del VMBP, las observaciones de flujo sólo se dan en la

parte alta de la cuenca y las únicas estaciones de aforo que están dentro del área del modelo son las estaciones hidrométricas Tambogrande y Sánchez Cerro. Sin embargo, la informalidad de extracción y vertido de aguas en este tramo del río no permite considerar estas mediciones cuantitativamente para el control del modelo hidrogeológico. Ante esto, la calibración se realizó con los registros de la red piezométrica de la ANA, que fueron presentados en la **Tabla 11**.

Las condiciones iniciales impuestas en el modelo en régimen transitorio fueron las alturas hidráulicas obtenidas del modelo en régimen estacionario para el año 2004. Por tanto, la modelación comprende un periodo de 10 años de modelación entre octubre 2004 hasta octubre 2014. Para las primeras simulaciones del modelo en régimen transitorio, se utilizó los parámetros calibrados del modelo en régimen estacionario, y se estableció los valores de almacenamiento específico y rendimiento específico establecidos en el modelo conceptual. Debido a que fue ligeramente modificado el valor de recarga por retornos de riego en el régimen estacionario, se calculó la variación anual de este nuevo valor de recarga para el régimen transitorio y se presenta en la **Figura 56**.

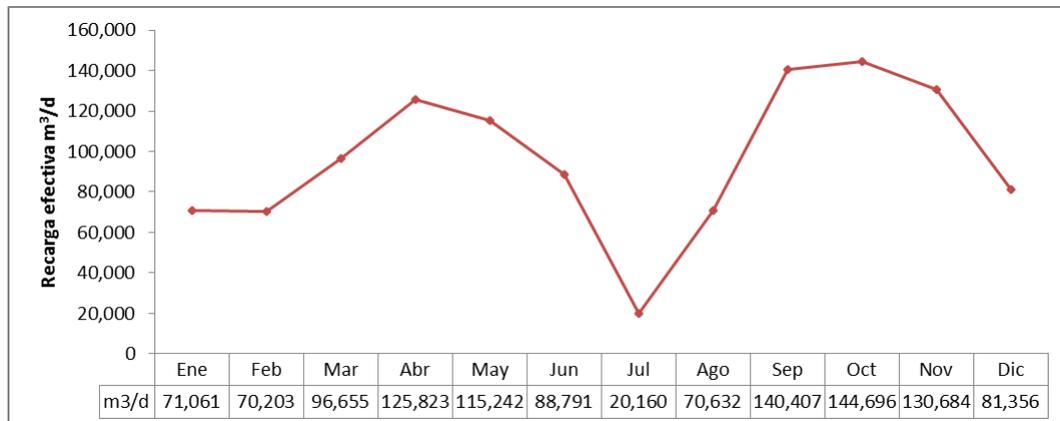


Figura 56. Variación anual de la recarga efectiva para el modelo en estado transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Calibración prueba y error de rendimiento específico, almacenamiento específico y porosidad.

Fuente: Elaboración propia.

ZONA	PARÁMETROS INICIALES			PARAMETROS CALIBRADOS		
	Sy	Ss (1/m)	Porosidad	Sy	Ss (1/m)	Porosidad
1	0.21	5.00E-05	0.21	0.13	1.00E-03	0.13
2	0.26	5.00E-05	0.26	0.16	2.00E-03	0.16
3	0.32	5.00E-05	0.32	0.19	3.00E-03	0.19
4	0.26	5.00E-05	0.26	0.16	7.05E-05	0.16
5	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	5.00E-03	0.09
6	0.26	5.00E-05	0.26	0.16	6.00E-03	0.16
7	0.25	1.00E-04	0.25	0.15	7.00E-03	0.15
8	0.26	5.00E-05	0.26	0.16	8.00E-03	0.16
9	0.26	5.00E-05	0.26	0.16	9.00E-03	0.16
10	0.21	5.00E-05	0.21	0.13	1.00E-03	0.13
11	0.32	1.00E-04	0.32	0.19	1.10E-04	0.19
12	0.30	1.00E-04	0.25	0.15	1.20E-03	0.15
13	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	1.30E-05	0.09
14	0.32	1.00E-04	0.32	0.19	1.40E-03	0.19
15	0.14	5.00E-05	0.14	0.08	1.50E-03	0.08
16	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	1.60E-03	0.09
17	0.32	1.00E-04	0.32	0.19	1.70E-03	0.19
18	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	1.80E-03	0.09
19	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	1.90E-03	0.09
20	0.22	5.00E-05	0.21	0.13	1.98E-03	0.13
21	0.27	5.00E-05	0.21	0.16	2.14E-03	0.16
22	0.32	1.00E-04	0.32	0.19	2.20E-05	0.19
23	0.33	1.00E-04	0.33	0.20	2.30E-03	0.20
24	0.32	1.00E-04	0.32	0.19	8.54E-05	0.19
25	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	2.50E-03	0.09
26	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	2.60E-05	0.09
27	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	2.70E-03	0.09
28	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	2.80E-03	0.09
29	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	2.29E-06	0.09
30	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.00E-03	0.09
31	0.18	1.00E-04	0.15	0.09	3.10E-03	0.09
32	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.20E-05	0.09
33	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.30E-06	0.09
34	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.40E-03	0.09
35	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.50E-06	0.09
36	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.60E-03	0.09
37	0.18	1.00E-04	0.15	0.11	3.27E-03	0.11
38	0.20	1.00E-04	0.15	0.09	3.80E-03	0.09
39	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	3.90E-03	0.09
40	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.00E-05	0.09
41	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.10E-05	0.09
42	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.20E-05	0.09
43	0.23	1.00E-04	0.15	0.09	4.30E-05	0.09
44	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.40E-05	0.09
45	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.50E-03	0.09
46	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.60E-03	0.09
47	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.70E-03	0.09
48	0.15	1.00E-04	0.15	0.09	4.80E-03	0.09

Durante el proceso de calibración se observó que las variaciones de los valores de conductividad hidráulica, no producen mejoras significativas en la calibración del modelo en régimen transitorio. En consecuencia, la calibración se centró en los parámetros de almacenamiento específico y rendimiento específico o porosidad de drenaje, mediante la metodología de calibración prueba y error.

La evaluación de los residuales de la calibración en régimen transitorio presenta una distribución normal. Sin embargo, existe un pequeño porcentaje de piezómetros que presenta residuales significativos superiores a 6 m.

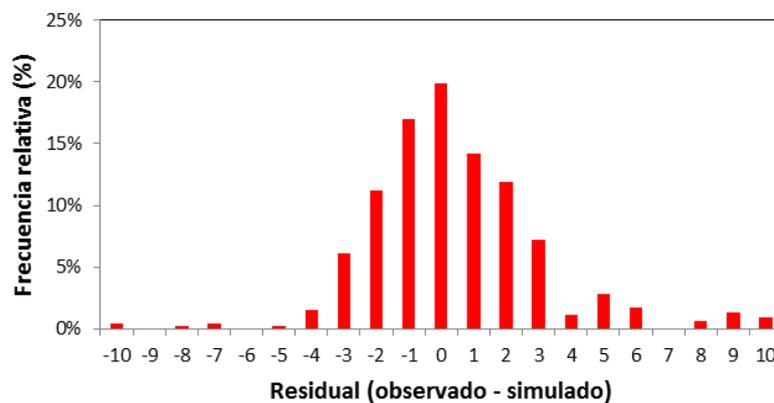


Figura 57. Histograma de residuos de calibración del modelo en régimen transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que el modelo en régimen estacionario, los criterios de calibración del modelo en régimen transitorio fueron los estadísticos del conjunto de residuos de alturas hidráulicas observadas y calculadas. El residuo máximo fue 17.09 m., correspondiente a un pozo de la capa2. La calibración en régimen transitorio presenta una mayor dispersión a diferencia de la calibración en régimen estacionario, los mayores residuales pueden ser producto de la escasa información obtenida para la conceptualización del modelo, especialmente en la capa2. Pese a esto, en general se obtuvo una calibración aceptable con una desviación estándar de 3.08 m., coeficiente de correlación 0.98 y coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe 0.96.

Gráficamente los resultados de la calibración presentan una alineación aceptable, a excepción de algunos pozos ubicados en la capa2. Se debe considerar que las extracciones ingresadas al modelo de los años intermedios entre los años 2004 y 2014 fueron interpoladas, y en algunos casos no estarían reproduciendo las variaciones de altura hidráulica del acuífero en años específicos.

Numero de puntos	528
Max residual (m)	17.09
Desv Estandar (m)	3.08
Coefficiente correlación	0.98
NSE	0.96

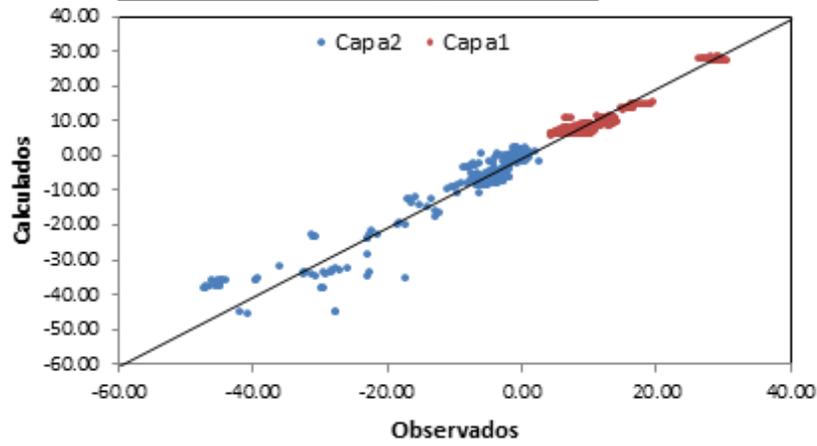


Figura 58. Análisis estadístico de alturas hidráulicas observadas vs calculadas en régimen transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

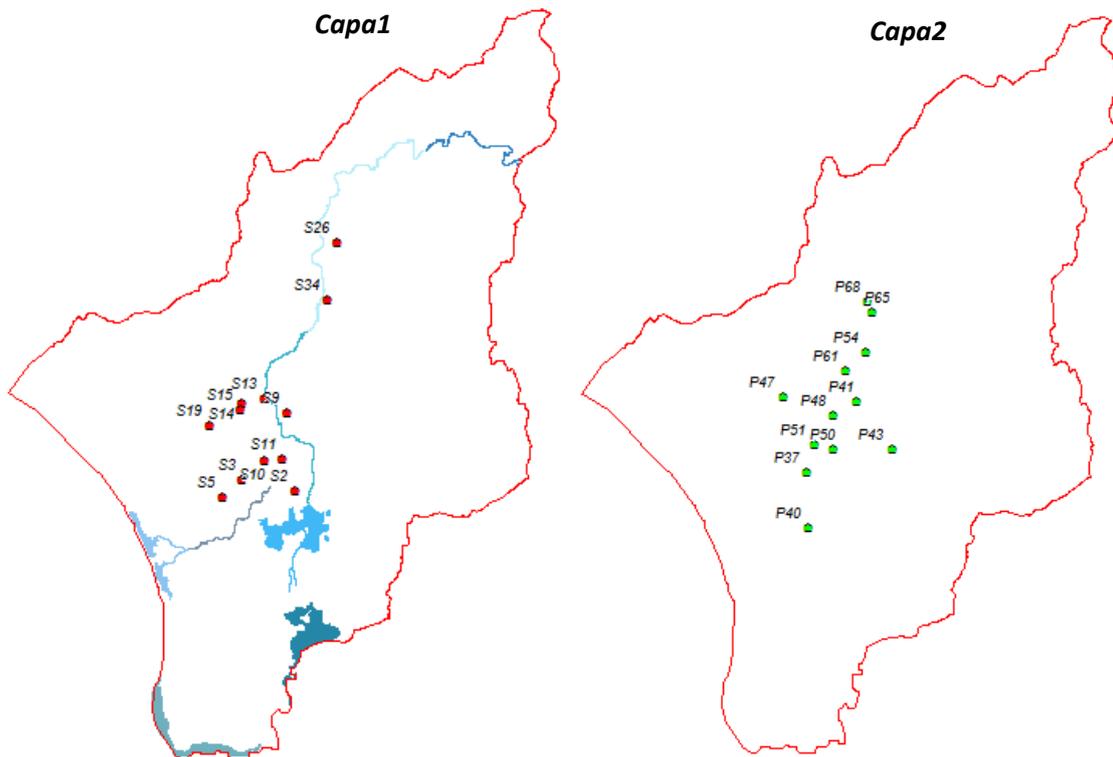


Figura 59. Piezómetros representativos para la evaluación de la calibración en régimen transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

Para la evaluación temporal de la calibración en régimen transitorio, fueron seleccionados 12 piezómetros representativos para cada capa del modelo, ver **Figura 59**. La calibración fue evaluada en cada pozo para el periodo de tiempo total modelado. En la **Figura 60** se presenta las variaciones temporales de altura hidráulica calculadas por el modelo y las observaciones de los piezómetros (puntos rojos). Los 3630 días corresponden a un periodo de 10 años entre octubre de 2004 y octubre de 2014. El modelo logra simular el comportamiento constante del acuífero superficial en la mayoría de piezómetros. Este comportamiento es debido a la baja tasa de explotación del acuífero superficial, que no ha incrementado notoriamente entre los años evaluados en el modelo. No obstante, algunos piezómetros presentan variaciones que el modelo no ha podido capturar como en el caso del piezómetro S34, esto puede deberse a la escasez de información temporal detallada de la explotación del acuífero, errores sistemáticos en la lectura de los pozos de bombeo o lecturas de niveles dinámicos.

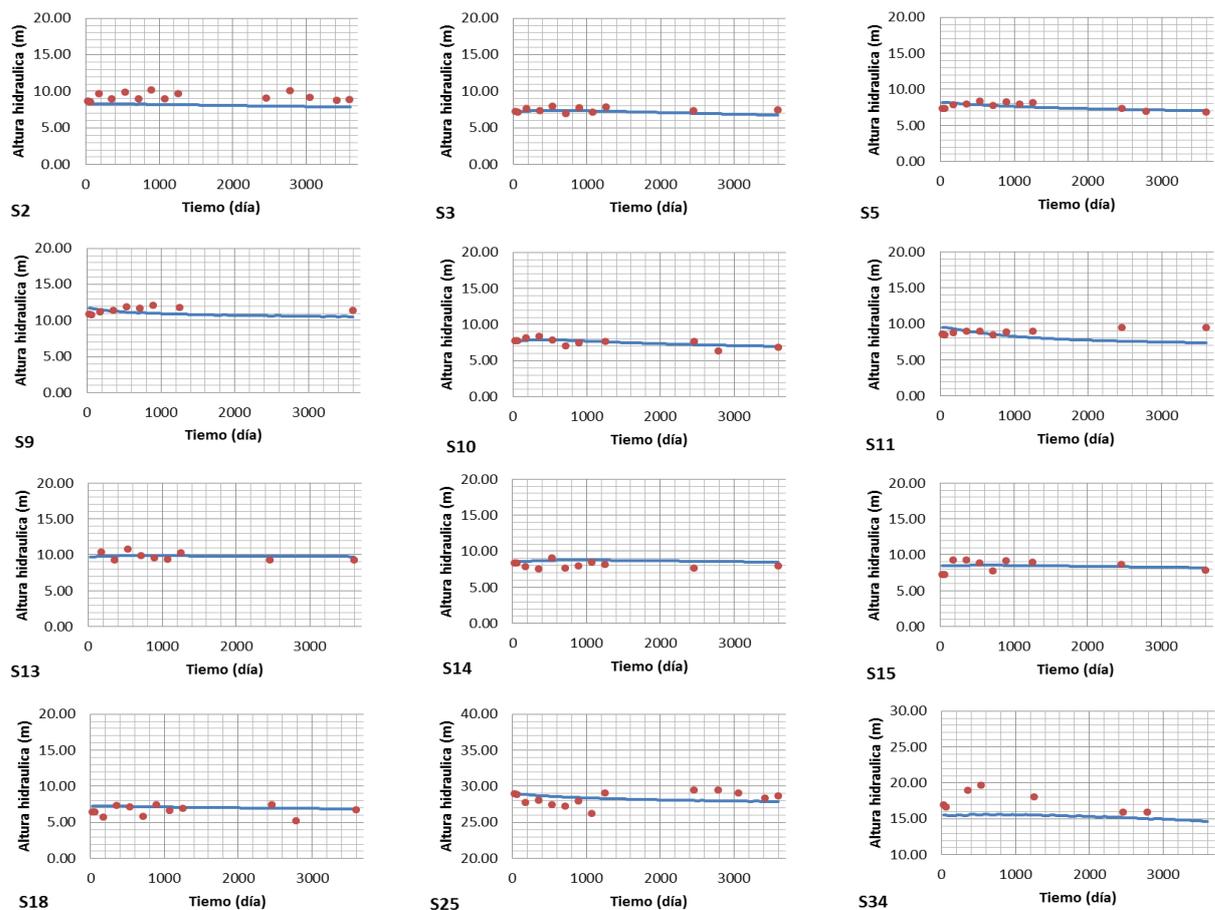


Figura 60. Calibración en régimen transitorio de piezómetros representativos de la Capa1.

Fuente: Elaboración propia.

En el acuífero confinado o capa2 del modelo se observa en general una tendencia decreciente de alturas hidráulicas, lo cual ha logrado ser modelado bastante bien en algunos de los piezómetros calibrados. El abatimiento reproducido en el modelo responde a la explotación que experimenta el acuífero inferior, que viene incrementando anualmente. Entre los años 2004 y 2014 se registró un incremento de la explotación de 34%, con respecto al valor explotado en el año 2004.

Como ya se ha mencionado previamente, el conocimiento hidrogeológico del acuífero inferior es bastante limitado. Sin embargo, las hipótesis asumidas para su conceptualización, han permitido obtener una calibración aceptable que nos acercaría hacia un mejor entendimiento del comportamiento del acuífero. Del mismo modo que para el acuífero superficial, la no existencia de información a una adecuada escala temporal de la explotación del acuífero, no permite obtener mejores resultados de calibración.

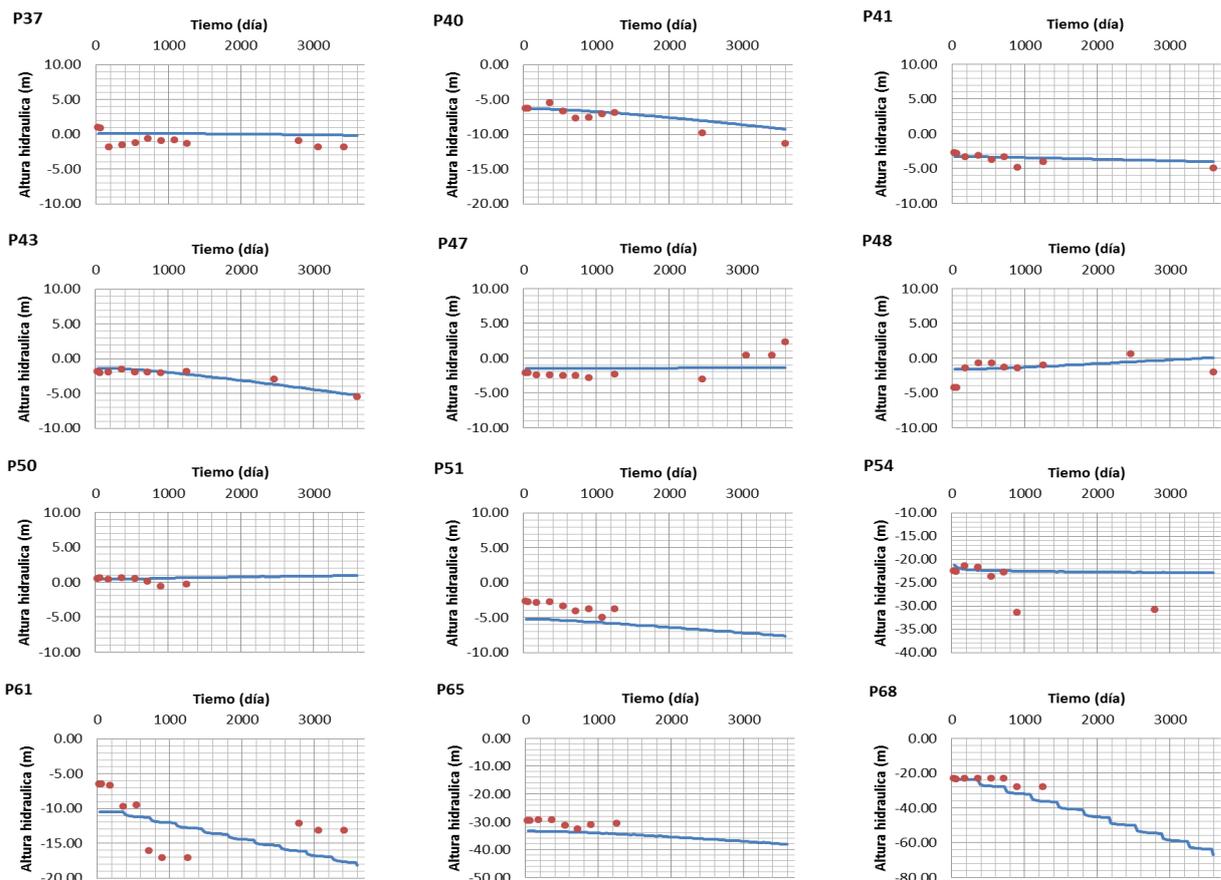


Figura 61. Calibración en régimen transitorio de piezómetros representativos de la Capa2.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Resultados del modelo en régimen transitorio

La modelación en régimen transitorio es una forma adecuada para representar sistemas acuíferos dinámicos, donde los flujos cambian significativamente en el tiempo y especialmente cuando el objetivo de la modelación consiste en simular periodos sobre los cuales existen intervenciones temporales en el sistema, como cambios en las extracciones de pozos, magnitudes de recarga, etc. Existe constancia en los inventarios realizados por la ANA, que el volumen de explotación sigue una tendencia creciente. Ante esto, con la modelación en régimen transitorio del acuífero del VMBP se busca evaluar la evolución y comportamiento del sistema entre los años 2004 y 2014.

En la evaluación temporal de la calibración del acuífero superficial (**Figura 60**), se observa que por lo general las alturas hidráulicas se mantienen constantes en el periodo de tiempo modelado 2004-2014, con un pequeño descenso al final de la modelación. Esto también es reflejado en el mapa de alturas hidráulicas presentado en la **Figura 62**, donde se compara la superficie piezométrica de los *Stress Periods* 1 y 121 del modelo.

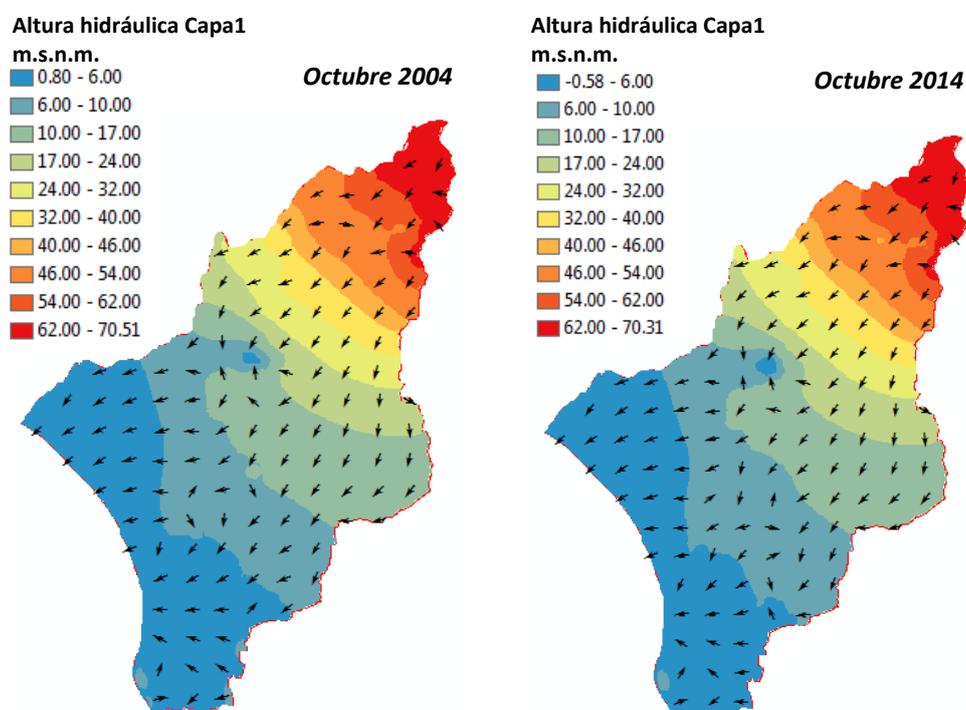


Figura 62. Alturas hidráulicas resultantes del modelo en régimen transitorio de la capa1.
Fuente: Elaboración propia.

La modelación se ha realizado considerando años medios hidrológicos, por tanto no fue posible reproducir alteraciones en las alturas hidráulicas debido a alteraciones hidrológicas puntuales. No obstante, la influencia antrópica en el acuífero es representada por el incremento de las extracciones de agua para actividades urbanas y agropecuarias. La circulación del flujo en el *Stress Period* 121 sigue su curso natural hasta el Océano Pacífico con un descenso del nivel piezométrico de 1.36 m. respecto al año 2004 en la ciudad de Piura, que se estaría produciendo por influencia del fuerte abatimiento del acuífero inferior.

A diferencia del acuífero superficial, el acuífero confinado presenta un descenso significativo del nivel piezométrico de 16.09 m. con respecto al valor observado en el año 2004, en el cono de abatimiento de la ciudad de Piura. Además, en la **Figura 63** también se observa que existe una franja de color azul con niveles piezométricos inferiores a los circundantes en la parte baja del modelo, que conecta el abatimiento de la ciudad de Piura con el Océano Pacífico. Esta franja de niveles piezométricos inferiores, claramente está siendo producida por el abatimiento que deriva de la creciente explotación del acuífero inferior, observándose un ligero incremento en su extensión al final de la modelación, en el 2014.

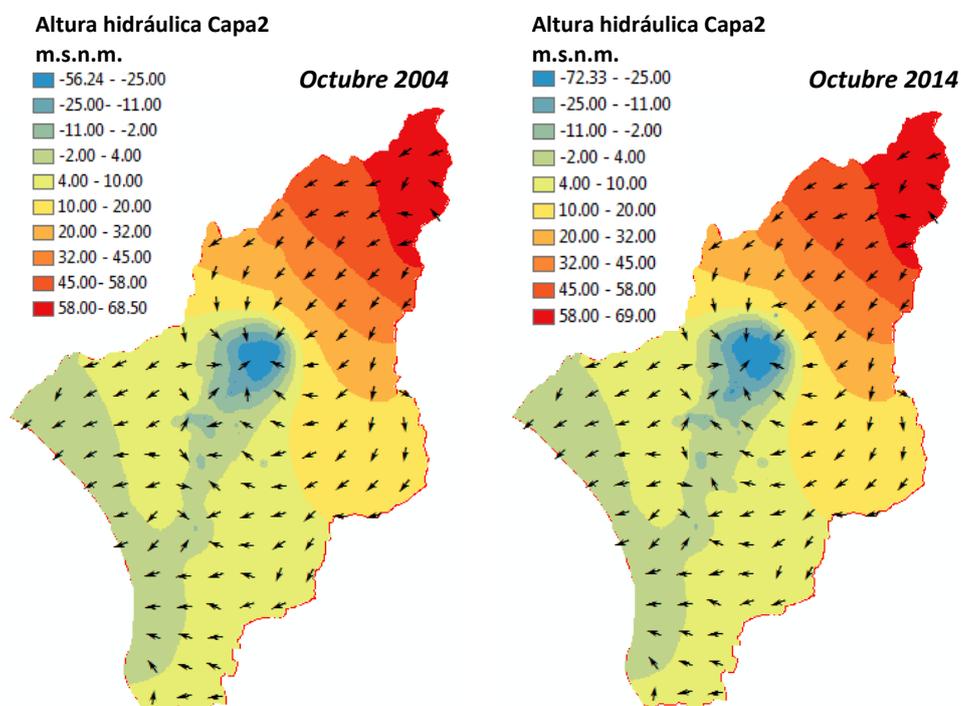


Figura 63. Alturas hidráulicas (msnm) resultantes del modelo en régimen transitorio en la capa2.
Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, conforme a lo observado en la comparación de alturas hidráulicas de la capa2 de la **Figura 63**, específicamente la franja de alturas hidráulicas inferiores que conecta el abatimiento de la ciudad de Piura y el mar, se deduce que existe el riesgo de producirse problemas de intrusión marina, en caso se mantenga la tendencia creciente de extracción de agua del acuífero inferior sin una adecuada gestión que permita alcanzar el equilibrio entre explotación y recargas del acuífero. No obstante, los descensos de altura hidráulica se producen siempre que hay una extracción continuada de agua en el acuífero y no significa que el acuífero este siendo sobreexplotado. Normalmente lo que sucede es que el nivel de altura hidráulica busca una nueva cota de equilibrio que estabiliza el sistema acuífero, que no necesariamente es lo que estaría ocurriendo en el acuífero del VMBP.

En la **Figura 64** se ha esquematizado el ingreso y salida de flujos del sistema en régimen transitorio de la capa1 para los *Stress Periods* 1 y121, con el objetivo de analizar como varía la circulación de flujos en el sistema tras 10 años de modelación. Los resultados del último año modelado, para el mismo mes del inicio de la modelación, muestran que en general los cuerpos de agua superficiales se mantienen como ganadores, recibiendo agua del acuífero en la zona A y B del río Piura, en la parte alta y media del modelo.

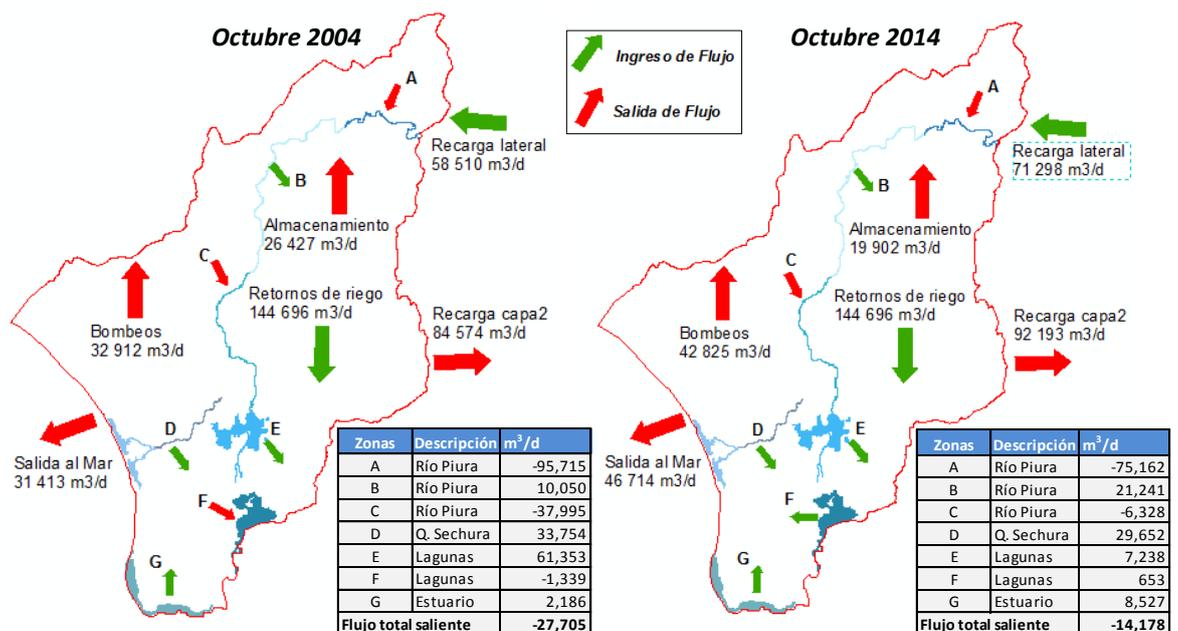


Figura 64. Representación esquemática de flujos de la capa1 en régimen transitorio.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, se observa que el flujo total que circulaba del acuífero hacia los cuerpos de agua superficiales disminuyó en un 49 % en el 2014. Esto se debería al incremento de las extracciones de bombeos y en consecuencia al descenso de la superficie de altura hidráulica del acuífero superficial. En el caso de cuerpos de agua ganadores, el descenso del nivel freático reduce el gradiente hidráulico acuífero-rio disminuyendo el flujo transferido hacia el río o lagunas, pudiendo llegar a convertirlo en perdedor como se observa en la zona F o Laguna La Niña. En el caso de cuerpos de agua perdedores, al descender el nivel freático aumenta el gradiente hidráulico río-acuífero transfiriéndose un mayor flujo hacia el acuífero. Sin embargo, en la parte baja de la capa1 se observa que el nivel freático incrementó produciendo que las zonas D y E disminuyan el flujo transferido hacia el acuífero. Este incremento del nivel freático en la parte baja produce también un incremento de la circulación de flujo hacia el Océano Pacífico.

La recarga debida a retornos de riego es la correspondiente al mes de octubre, según la variación estacional del riego de cultivos. La recarga lateral proveniente del acuífero del Alto Piura se incrementa en 22 %, debido al incremento del gradiente hidráulico entre la altura hidráulica externa y la altura hidráulica de la parte alta del modelo. La capa1 continua almacenando agua en el mes de octubre, pero disminuyó un 25% en el 2014 respecto al 2004, este almacenamiento se estaría produciendo en la parte baja del modelo y sería la razón de la elevación de la cota del nivel freático en ciertas zonas del acuífero superficial. El agua almacenada en el acuífero es tratada como una salida de flujo del sistema (pérdida de agua del sistema), mientras que el agua liberada del almacenamiento es tratada como una entrada de flujo (fuente de agua en el sistema).

En el acuífero inferior o capa2 del modelo se observa que la recarga lateral proveniente del Alto Piura y el flujo saliente al mar no presentan variaciones significativas al finalizar el periodo de simulación, a pesar de haber existido alteraciones en el sistema producto del incremento de las extracciones de bombeos.

En octubre del 2004, al inicio de la modelación se observa que el volumen de agua liberado del almacenamiento del acuífero inferior es de 1 572 m³/d e incrementó a 20 145 m³/d en octubre del 2014. Este alto incremento de las aguas liberadas del almacenamiento hacia el sistema, es respuesta de la creciente explotación del acuífero confinado, y a pesar que las transferencias de flujo desde la capa1 hacia la capa2, a

través del semi acuitardo, incrementaron en un 9 %, este volumen de agua en conjunto con la recarga lateral no cubren las salidas de flujo del sistema. Por tanto, se incrementa el ingreso de flujo de almacenamiento al sistema (pérdidas en el almacenamiento) y en consecuencia disminuyen los niveles piezométricos. La tendencia descendente de los niveles piezométricos en la capa2, se observa claramente en los piezómetros seleccionados para la calibración del modelo en régimen transitorio.

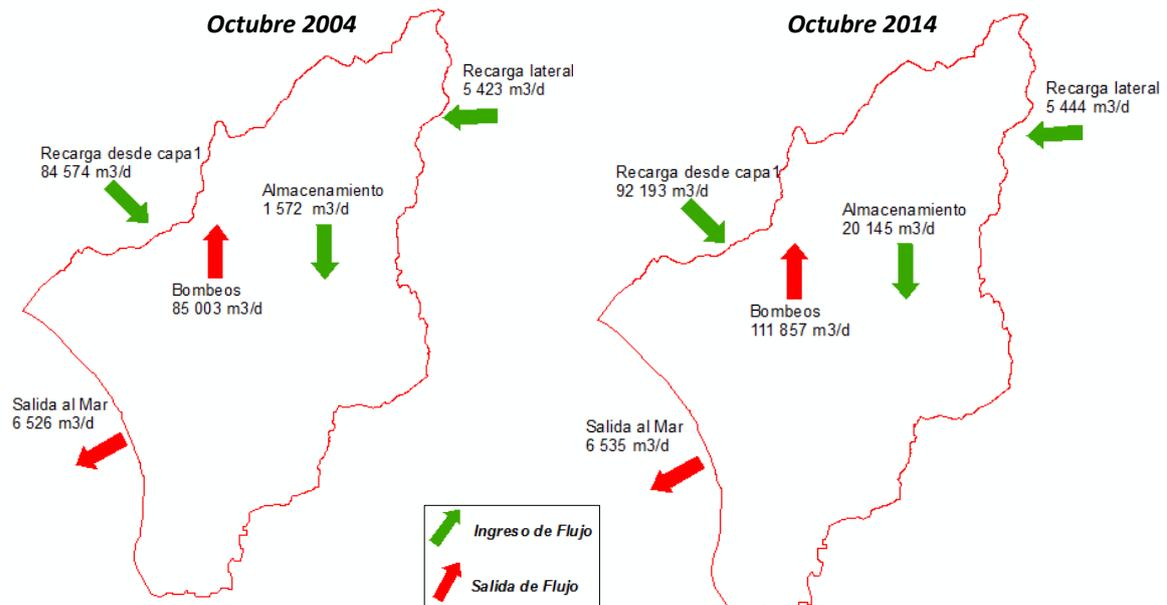


Figura 65. Representación esquemática de flujos de la capa2 en régimen transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 66** se presenta un esquema de balance de flujos global del sistema para octubre del 2004 y 2014. Si observamos las variaciones de flujo entre los años 2004 y 2014, podemos decir que en la capa1 existe una respuesta rápida del sistema ante un incremento de la explotación. Sin embargo, la capa2 no responde de igual modo ante estos incrementos, posiblemente debido a su menor permeabilidad y al semi acuitardo de baja permeabilidad que lo separa del acuífero superficial. En el acuífero superior se observa que aunque la explotación incrementa, el sistema encuentra un equilibrio. Por el contrario, en el acuífero inferior ante el incremento de la explotación, se empieza a utilizar las aguas almacenadas del acuífero descendiendo los niveles piezométricos.

La sobreexplotación en un acuífero se produce cuando las extracciones totales de agua superan a las recargas. Esto estaría sucediendo en el acuífero confinado, ya que se ha observado descensos en las alturas hidráulicas y el esquema de flujos revela que

ha incrementado enormemente la extracción de agua de las reservas almacenadas del acuífero profundo, para el mismo mes al inicio y fin del modelo.

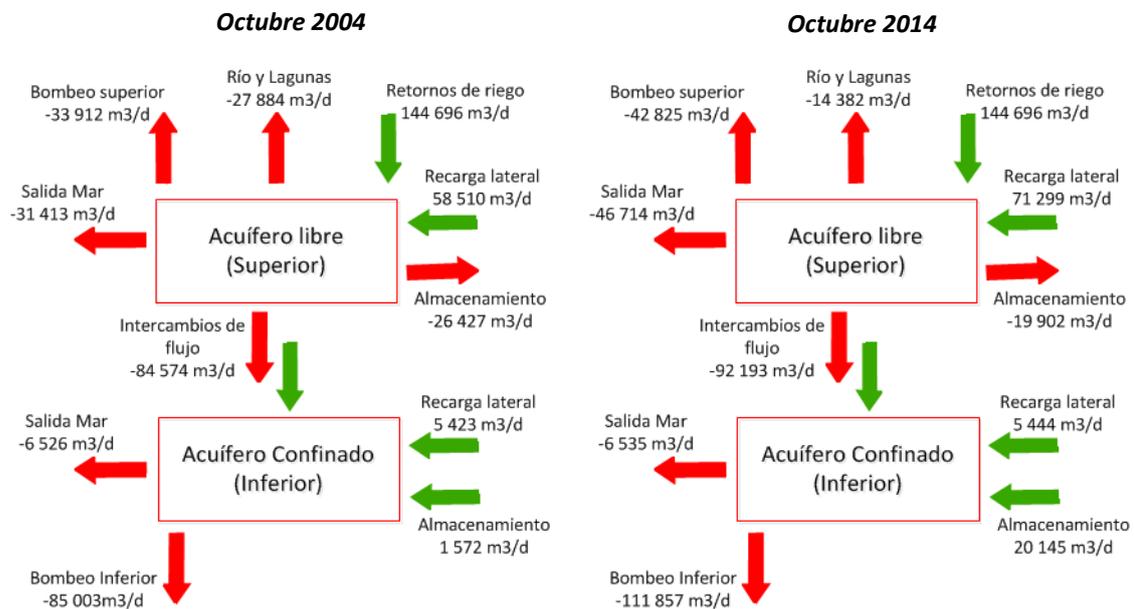


Figura 66. Esquema de balance de flujos del modelo en régimen transitorio.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 15** se presentan el balance de los flujos medios del periodo modelado 2004 – 2014. El balance de aguas subterráneas es un indicador que muestra la respuesta y el estado del sistema acuífero producido por las presiones externas. El análisis en distintos periodos de tiempo permite identificar tendencias y planes de actuación para la buena gestión de aguas subterráneas (Sarah, Ahmed, Boisson, Violette, & de Marsily, 2014). Los valores medios de la modelación en régimen transitorio, muestran que tanto el acuífero superior como inferior están liberando aguas almacenadas al sistema, lo cual en el caso del acuífero superficial no representa mayor riesgo como sí sucede en el caso del acuífero confinado, que debido a su lenta interacción con las fuentes limitadas de recarga, podrían continuar descendiendo los niveles de altura hidráulica. Esto sería un indicativo de haberse alcanzado o superado el límite de explotación sostenible, en el cual se explota un volumen igual o menor a las recargas naturales del acuífero. Por tanto, ante esta tendencia creciente de extracción de agua de las reservas almacenadas, es necesario que las autoridades competentes desarrollen estudios de buena calidad que disminuyan las incertidumbres del modelo desarrollado en este trabajo, con el objetivo de simular escenarios para implementar medidas que mitiguen los efectos de la sobreexplotación del acuífero del VMBP.

Tabla 15. Valores medios de flujos del modelo en régimen transitorio del periodo 2004 – 2014.

Fuente: Elaboración propia.

Balance Capa1	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Almacenamiento	55,075.87	34,275.47	20,800.40
Bombeo	0.00	37,417.48	-37,417.48
Recarga lateral	70,238.46	18.01	70,220.46
Retornos de riego	96,699.72	0.00	96,699.72
Río y Lagunas	170,886.32	188,475.72	-17,589.41
Salida al mar	0.00	44,838.83	-44,838.83
Transferencia capa2	7,124.69	95,006.50	-87,881.81

Balance Capa2	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Almacenamiento	14,901.32	4,863.63	10,037.69
Bombeo	0.00	97,209.39	-97,209.39
Recarga lateral	5,437.02	0.00	5,437.02
Salida al mar	0.00	6,530.83	-6,530.83
Transferencia capa1	95,006.50	7,124.69	87,881.81

Balance total del Modelo	Entradas (m ³ /d)	Salidas (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Almacenamiento	69,977.10	39,139.04	30,838.06
Bombeo	0.00	134,626.86	-134,626.86
Recarga lateral	75,675.49	18.01	75,657.48
Retornos de riego	96,699.72	0.00	96,699.72
Río y Lagunas	170,886.32	188,475.72	-17,589.41
Salida al mar	0.00	51,369.67	-51,369.67

Es importante analizar el comportamiento de los flujos del sistema temporalmente para evaluar la relación que existe entre ellos. En la **Figura 67** se presenta los flujos de la capa1 del modelo. Las recargas por retorno de riego siguen la variación temporal impuesta por la estacionalidad de cultivos y se observa que el almacenamiento del acuífero superficial está fuertemente relacionado a esta recarga. Al ingresar mayor agua de retornos de riego al sistema, el agua liberada del almacenamiento disminuye y llega a almacenarse. Por el contrario cuando la recarga por retornos de riego disminuye, el agua almacenada es liberada al sistema. Además, se aprecia que la tendencia de los flujos de almacenamiento asciende en el eje y positivo, lo que indica que cada vez un mayor volumen de agua es liberado del almacenamiento, esto indica que si esta tendencia continua las aguas almacenadas en la capa1 llegarán a agotarse, produciendo el descenso del nivel freático y en consecuencia problemas de intrusión marina. No obstante, es necesario mencionar que este modelo se ha construido en función de años hidrológicos promedio y no se ha evaluado la influencia de anomalías o fenómenos como el ENSO, que podría permitir una recuperación rápida de los niveles del acuífero libre.

Las extracciones por bombeos siguen una tendencia decreciente en el eje y negativo, debido al incremento de los bombeos. El ingreso de aguas por recarga lateral desde el acuífero del Alto Piura incrementa en los primeros días de modelación y luego

mantiene una tendencia ascendente muy leve. Al inicio de la modelación se observa que disminuye el flujo hacia los cuerpos de agua superficiales y luego se recupera, esto se debe a que el primer día modelado corresponde a octubre donde se presenta un pico de la recarga por retornos de riego y posterior a este descienden drásticamente. Con lo cual este fenómeno que se presenta notoriamente al inicio en los flujos de ríos y lagunas, no es representativo del comportamiento general del sistema, sino una consecuencia de las condiciones iniciales del modelo. Los cuerpos de agua superficiales en general se mantienen como ganadores en los 10 años modelados, pero existe una disminución de los flujos circulantes del acuífero superficial hacia los mismos. Los flujos de salida al mar y la transferencia hacia el acuífero inferior, presentan una tendencia decreciente en el eje y negativo, con lo cual estaría saliendo más fluido hacia el mar y hacia el acuífero inferior.

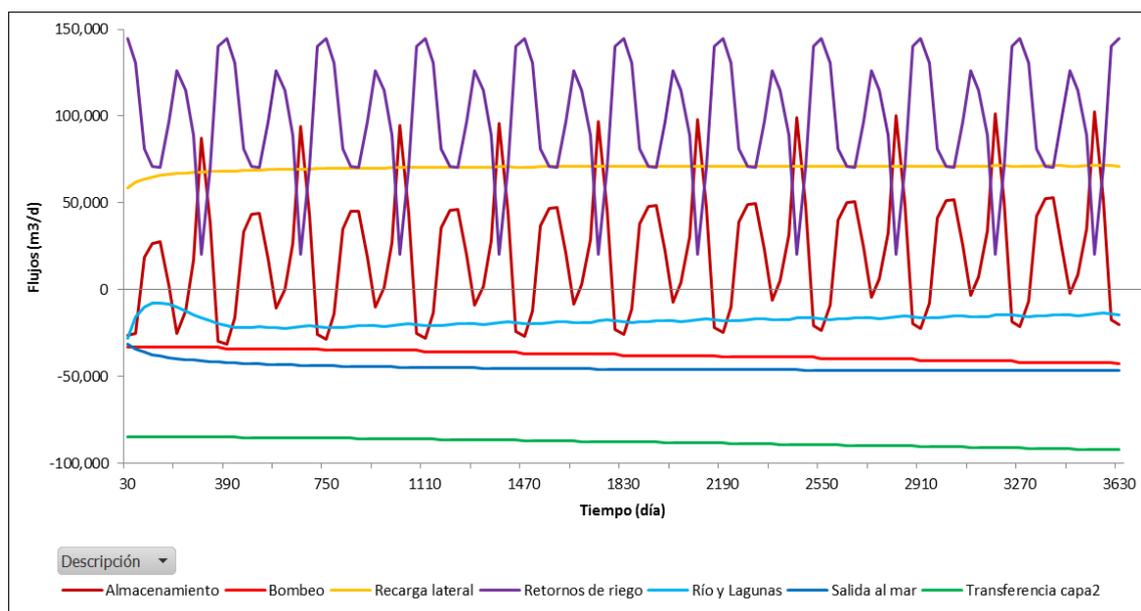


Figura 67. Flujos de la capa1, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 68 muestra claramente que el almacenamiento en el acuífero confinado, tiene una clara tendencia ascendente en el eje y positivo, y es simétrica a la tendencia descendente en el eje y negativo de las extracciones por bombes. El incremento de explotación de las reservas de almacenamiento del acuífero confinado, evidencia que ya se podría haber alcanzado el límite de explotación sostenible.

Como ya se observó en el gráfico de variación de flujos del acuífero superficial, los flujos transferidos desde el acuífero superior hacia el acuífero inferior incrementan

ligeramente. El ingreso de flujo al sistema desde el acuífero del alto Piura se mantiene constante, y también el flujo de salida hacia el Océano Pacífico.

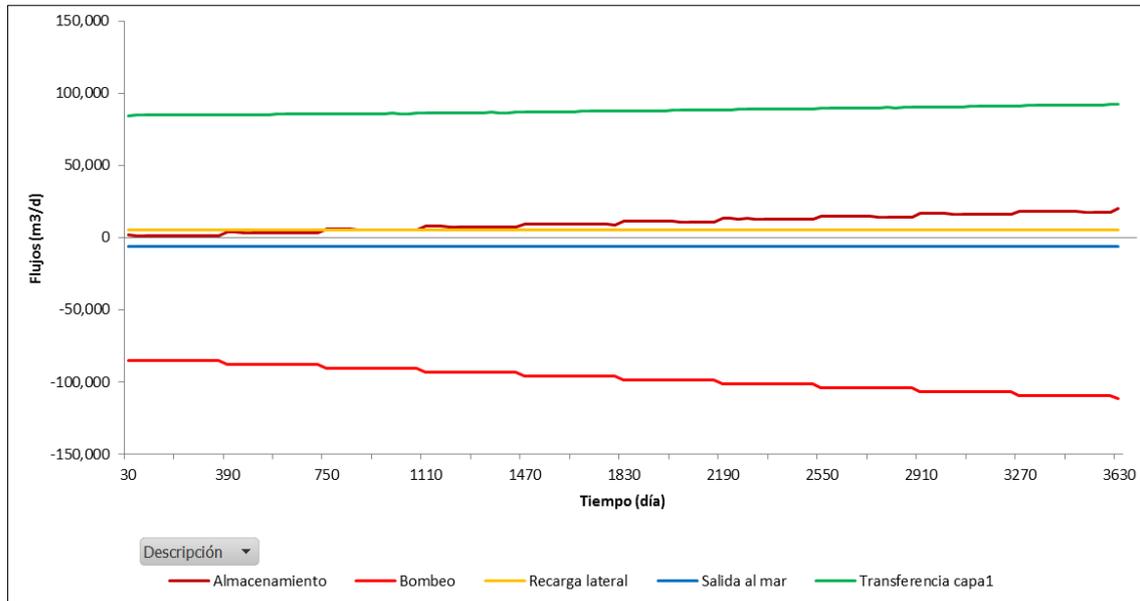


Figura 68. Flujos de la capa2, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 69 observamos las variaciones de flujo totales del acuífero, se aprecia la marcada tendencia ascendente del flujo de almacenamientos, lo cual se traduce en mayores pérdidas de las reservas de agua almacenadas. La alta relación entre la recarga de retornos de riego y el almacenamiento se deben principalmente a los flujos del acuífero superior, ya que el acuífero inferior tiene una respuesta mucho más lenta ante estas variaciones.

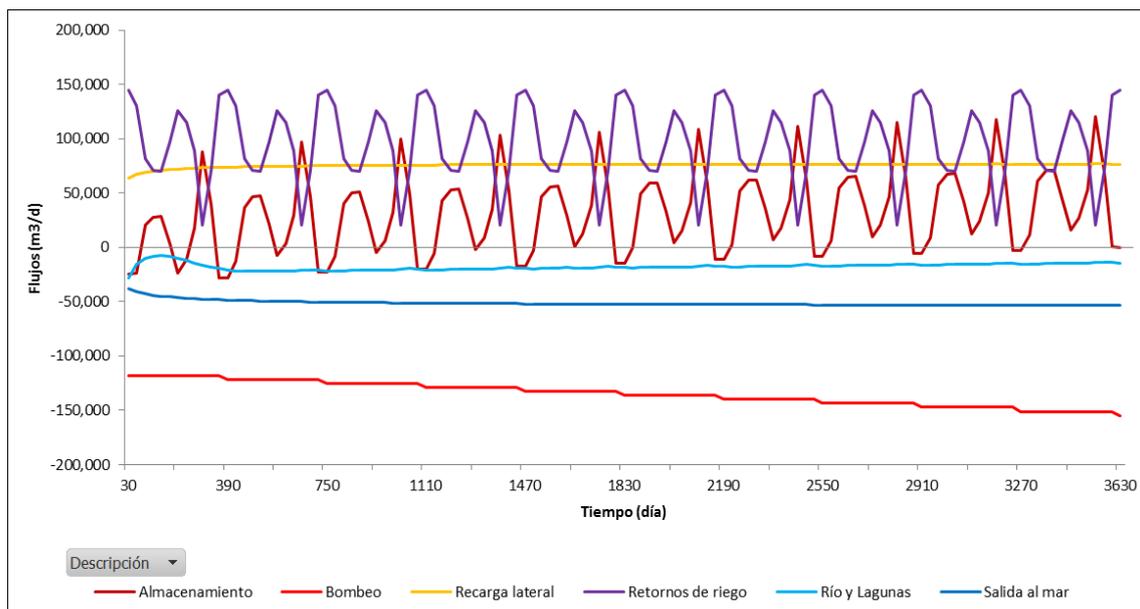


Figura 69. Flujos totales, valores positivos/negativos corresponden a entradas/salidas del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los resultados revela que el almacenamiento está generalmente disminuyendo. De esto se puede deducir también, que los niveles de agua subterránea continuarán descendiendo con las actuales prácticas de explotación y en consecuencia incrementará los costos de explotación. Esta tendencia es peligrosa para la sustentabilidad de aguas subterráneas en regiones semiáridas con limitadas fuentes de recarga como es el caso del VMBP.

Los modelos son mejores para entender el funcionamiento de un sistema que para simular el futuro, esto se debe al incremento de los errores de la estimación de parámetros y simplificaciones, que aumentan exponencialmente al incrementar los años que se pretenden simular. En consecuencia, en este trabajo no se han realizado simulaciones predictivas, ya que el objetivo es establecer las bases para el mejor entendimiento del acuífero.

5.5. Análisis de sensibilidad

En estricto rigor, un análisis de sensibilidad se refiere a la variación de los resultados del modelo producto del cambio en un sólo parámetro, lo que se conoce como *ceteris paribus*, mientras que el cambio en un grupo de parámetros se conoce como un análisis de escenario. Para fines prácticos, ambos términos se engloban indistintamente bajo el mismo concepto y se les denomina simplemente análisis de sensibilidad (SEA, 2012).

El análisis de sensibilidad se realizó en el modelo calibrado en régimen estacionario. Los parámetros y variables seleccionados para el análisis de sensibilidad fueron la conductividad hidráulica de la capa1 y capa2, la conductancia de ríos y lagunas, la conductancia impuesta en la condición GHB de la recarga lateral proveniente del Alto Piura y la recarga por retornos de riego. La evaluación consistió en evaluar el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) del modelo. NSE es recomendado y muy usado para evaluar el ajuste en modelos de recursos hídricos (Moriasi et al., 2007) y permite cuantificar cuan bien se ajustan las alturas hidráulicas observadas a las calculadas, siendo el valor óptimo 1. Además, también fueron evaluados los cambios en la circulación de flujos en el sistema. El Flujo lateral corresponde al flujo que entra al sistema desde el acuífero del Alto Piura, el flujo acuífero-río son los flujos salientes del sistema hacia los cuerpos de agua superficiales, el flujo capa1-cap2 es el flujo que circula desde la capa1 hacia la capa2 y el flujo acuífero-mar es el flujo que sale del sistema hacia el Océano Pacífico.

Tabla 16. Análisis de sensibilidad en régimen estacionario de parámetros y variables de entrada.

Fuente: Elaboración propia.

Parametro	Factor	NSE	Flujo (m3/d) lateral	Flujo (m3/d) acuifero-rio	Flujo (m3/d) capa1-capa2	Flujo (m3/d) acuifero-mar
Permeabilidad capa1	1.25	0.9708	86,875.06	52,632.47	84,621.72	61,031.12
	0.75	0.9720	66,165.09	44,035.59	85,965.31	48,918.29
Permeabilidad capa2	1.25	0.9055	78,451.86	48,462.50	85,389.09	56,778.13
	0.75	0.8165	75,412.98	48,476.44	84,967.45	53,725.13
Conductancia río y lagunas	1.50	0.9716	89,618.96	49,411.42	85,518.48	66,996.12
	0.50	0.9719	59,394.14	44,735.75	85,015.17	41,447.02
Conductancia recarga lateral	1.50	0.9722	79,514.64	51,041.73	85,221.88	55,261.88
	0.50	0.9722	70,972.58	42,501.72	85,143.31	55,259.67
Recarga por retornos de riego	1.50	0.9562	73,423.04	113,597.55	87,982.88	58,966.26
	0.50	0.9522	80,598.21	-16,080.83	82,221.66	51,115.97
Modelo calibrado		0.9722	76,937.64	48,465.03	85,199.15	55,261.25

Ante un incremento de 25% de la permeabilidad en el área del modelo correspondiente a la capa1, la eficiencia del modelo no presenta significativa variación. Sin embargo, el flujo lateral, acuífero-rio y acuífero-mar sufren incrementos debido a que los nuevos valores de permeabilidad permiten una más rápida circulación de flujos. Por el contrario, el flujo hacia la capa2 disminuye ligeramente y estaría sucediendo debido a ligeras disminuciones en las alturas hidráulicas. Al disminuir este mismo parámetro un 25% ocurre exactamente lo contrario. No obstante, el modelo es menos sensible a la disminución de la permeabilidad que al incremento de la misma.

Del mismo modo que en la capa1, se incrementó y disminuyó un 25% la permeabilidad en el área del modelo correspondiente a la capa2. Ante este incremento los flujos lateral y acuífero-mar se incrementan en mayor magnitud que el flujo capa1-capa2, y el flujo acuífero-rio disminuye ligeramente. Con la disminución de la permeabilidad, ocurre lo contrario y en la misma magnitud. Los resultados en general muestran que el modelo es más sensible a la disminución de permeabilidades. Además, existe una mayor sensibilidad a la variación de las permeabilidades de la capa2 que la capa1.

Se incrementó/disminuyó el valor de conductancia establecida para el lecho del río y lagunas en un 50%. Se observa muy poca sensibilidad del modelo a la variación de este parámetro. Sin embargo, ante el incremento no varía significativamente el flujo acuífero-rio, como si sucede al disminuir el parámetro. El flujo capa1-capa2 prácticamente no es afectado, los flujos lateral y acuífero-mar incrementan/disminuyen proporcionalmente con la variación del parámetro.

La conductancia impuesta en la condición GHB, no presenta sensibilidad ante el incremento/disminución del 50% de su valor. Sin embargo, si incrementa/disminuye el flujo lateral y el flujo acuífero-rio en función del incremento/disminución del parámetro. El flujo capa1-capa2 y el flujo acuífero-mar no son afectados. La poca sensibilidad del modelo a este parámetro, puede ser debida a la mala distribución de los piezómetros, los cuales no cubren el área total del modelo. Por tanto, el índice de NSE solamente estaría evaluando las sensibilidades en la parte central del modelo donde se concentran los piezómetros de la capa1 y capa2.

Ante un incremento/disminución del 50% de las recargas por retornos de riego, observamos que el modelo es levemente más sensible a la disminución de esta variable. A pesar que la diferencia de sensibilidad del modelo entre un incremento o disminución de la variable no es significativa, ésta produce grandes cambios en el flujo acuífero-rio, incrementándose enormemente en el caso de un incremento de la variable y llegando a invertir la circulación del flujo en el caso de una disminución de la variable. El flujo capa1-capa2 es directamente proporcional a las modificaciones de esta variable, presentando una mayor sensibilidad en comparación con los demás parámetros evaluados. El flujo lateral es inversamente proporcional a las variaciones de las recargas por retorno de riego, debido el ascenso y descenso de la altura hidráulica.

Finalmente, del análisis de sensibilidad se deduce que ante variaciones de igual magnitud en las permeabilidades de la capa1 y capa2, el modelo muestra una mayor sensibilidad en la capa2. Las variaciones de la conductancia de ríos y lagunas disminuyen la eficiencia del modelo y no representan grandes diferencias en la circulación de los flujos. La conductancia de la recarga lateral aparentemente no afecta la eficiencia del modelo, pero se debe considerar que sólo se está evaluando la eficiencia del modelo en función de los piezómetros calibrados, que sólo cubren la zona central modelo. En general la transferencia de flujos desde la capa1 hacia la capa2 es muy poco sensible a las variaciones de los parámetros, y varía sólo ante la variación de las recargas por retornos de riego, debido al incremento de las alturas hidráulicas en la capa1 que permiten el incremento del gradiente hidráulico y en consecuencia una mayor transferencia de flujo hacia el acuífero inferior.

5.6. Incertidumbres y limitaciones del modelo

A pesar que en este trabajo se utilizó metodología y software de modelamiento actualizado, el uso de modelos numéricos aún tiene numerosas limitaciones para la modelación de sistemas de aguas subterráneas, tales como la falta de datos, asunciones hechas durante la modelación, errores en la conceptualización del modelo, simplificaciones y limitaciones de software. La discretización espacial del área modelada representa un claro ejemplo de los errores introducidos en la modelación, ya que en cada celda se introducen parámetros y variables localmente uniformes para celdas de 300 x 300 m., no siendo representadas las variaciones espaciales que tienen lugar en espacios menores al tamaño de celda establecido. La caracterización vertical de las capas del acuífero es otra fuente de error en el modelo, ya que a pesar de existir muestreos geofísicos que han aproximado el espesor de los estratos, no existe estratigrafía suficiente que permita correlacionar esta información y definir claramente las variaciones espaciales de los espesores en el plano horizontal. La discretización temporal es otro factor a considerar, el modelo en régimen transitorio fue discretizado en *Stress Periods* mensuales, con lo cual las entradas y salidas de flujo se mantienen constantes mensualmente, pero permiten representar las variaciones mensuales de las recargas por retornos de riego. Sin embargo, parte de la precisión del modelo se pierde al carecer de data a una adecuada escala temporal que permita reproducir el comportamiento del acuífero con mayor precisión.

Existe una gran incertidumbre respecto a los bordes del acuífero, especialmente al Norte y Este del modelo. En la bibliográfica consultada no se ha encontrado estudios que determinen claramente los límites del acuífero, existiendo sólo la presunción de que existe una transferencia de flujo desde el acuífero del Alto Piura en el límite Noreste del modelo, pero no se menciona nada respecto a los flujos circulantes por estos límites y mucho menos a la extensión de este borde que pone en contacto ambos acuíferos. Por el norte se desconoce si existe una transferencia de flujos subterráneos provenientes de la Cuenca Chira, por ende fue establecido un borde impermeable en el modelo.

El estudio desarrollado por el Servicio Geológico Checo menciona que la recarga debida a infiltración producida por formación de cuerpos de agua superficiales en las depresiones de la subcuenca no es significativa en el acuífero inferior. Lo cual no

puede ser corroborado por este trabajo, ya que el modelo del acuífero ha sido desarrollado en función de años hidrológicos medios entre los años 2004 y 2014, por tanto una de las limitaciones es que no estaría reproduciendo la influencia de años húmedos y eventos del Fenómeno del Niño en las recargas del acuífero.

Las recargas por retorno de riego se han estimado como porcentaje de la aplicación de agua de riego total, siendo necesario realizar estudios de infiltración que permitan determinar de forma precisa las tasas de infiltración que estarían recargando el acuífero y de este modo reducir la incertidumbre de esta variable en el modelo.

La caracterización geométrica del río Piura se estableció en función a la estimación de observaciones in situ y dimensión promedio de las secciones transversales en la parte media y alta del río Piura, siendo una de las principales incertidumbres el parámetro de conductancia hidráulica asignado al lecho de ríos y lagunas.

Otra de las fuentes de error del modelo se estaría produciendo por la limitada información temporal de las explotaciones de bombeo. Se cuenta con data de los años 2004 y 2014, por tanto fue necesario realizar una interpolación lineal para obtener los volúmenes de bombeo de los años intermedios. Además, al contar con volúmenes totales de explotación anual, no fue posible representar en el modelo las variaciones de las extracciones que se producen en cada mes.

La incertidumbre de los parámetros hidráulicos se ha intentado reducir estableciendo valores justificados teóricamente dentro de los rangos que se indican en estudios previos del acuífero. Adicionalmente, debido a la deficiente distribución de los piezómetros en la extensión del modelo, no ha sido posible evaluar el ajuste del modelo en las zonas que no han sido cubiertas por los mimos, también se debe considerar que los piezómetros son en sí pozos de bombeo en operación que podrían estar introduciendo errores al modelo producto de lecturas de niveles dinámicos de altura hidráulica.

Finalmente, varios elementos del modelo tienen mucha incertidumbre y requieren investigación adicional que no ha podido ser desarrollada dentro de las actividades de este trabajo. Es importante destacar que para reducir la incertidumbre y consecuentemente aumentar la precisión esperada de los resultados, los esfuerzos

deben centrarse en mejorar la conceptualización del modelo. Cambios en el modelo numérico que no estén sustentados en mejoras del modelo conceptual muy difícilmente lograrán resultados más precisos.

6. CONCLUSIONES

- La principal conclusión a la que se ha llegado a través del análisis del modelo del acuífero del VMBP, es que se estaría extrayendo un volumen de agua mayor al volumen total de recargas del acuífero. El descenso de los niveles piezométricos, la tendencia ascendente de las explotaciones y la extracción cada vez mayor de aguas almacenadas indican que se habría sobrepasado el límite de explotación sostenible del acuífero VMBP. Esto empeora al considerarse que las mayores extracciones se producen en el acuífero inferior, el cual presenta una lenta interacción con las fuentes de recarga superficiales, por tanto una débil capacidad de recuperación (baja resiliencia), y en consecuencia los niveles piezométricos continuarán descendiendo, incrementando los costos de extracción de agua, problemas de intrusión marina y a un largo plazo podrían llegar a agotarse las reservas del acuífero.
- La modelación del acuífero VMBP se ha realizado en dos estudios previos, el estudio del Servicio Geológico Checo en el año 2010 y el estudio de la Autoridad Nacional del Agua en el año 2015. No obstante, en el primero sólo se utilizó un modelo numérico para estimar fuentes de recarga cualitativamente y no desarrolla un capítulo de modelación dentro del estudio, y mucho menos realiza un análisis de los resultados de la modelación del acuífero, sólo llega a la conclusión que es muy probable que se produzca una recarga desde la parte media del río Piura, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el modelo realizado en este trabajo. El segundo modelo realizado por la ANA es un modelo no calibrado con serias deficiencias en su conceptualización, en el cual no se llega a ninguna conclusión que pueda ser comparada con los resultados obtenidos en este trabajo. En consecuencia, la modelación y análisis del acuífero realizado en este trabajo es la primera aproximación hacia una mejor comprensión del funcionamiento integral del sistema de aguas subterráneas del VMBP.
- El modelo conceptual fue estructurado en base a información bibliográfica actual, y ante la aparición de nueva data podría mejorarse o quedar invalidado. Además, la

conceptualización presenta incertidumbres que no pueden ser cuantificadas, pese a esto continua siendo útil y el mejor enfoque que se tiene para analizar el funcionamiento del acuífero del VMBP actualmente.

- Los resultados del modelo en régimen transitorio han permitido conocer los flujos medios de entrada y salida del sistema entre los años 2004 y 2014. El acuífero sería principalmente alimentado por las recargas de retornos de riego que ingresan al sistema un volumen medio de 35.30 Hm³/año, seguida por la recarga lateral que ingresa al acuífero un volumen medio de agua de 27.61 Hm³/año. La principal salida de flujo son los bombeos con un valor medio de 49.14 Hm³/año, seguido por el flujo medio que sale al mar 18.75 Hm³/año y en menor magnitud el flujo medio hacia los cuerpos de aguas superficiales 6.42 Hm³/año. Esto representa un total de 62.91 Hm³/año entrantes al sistema y 74.31 Hm³/año salientes del sistema acuífero, esta diferencia que existe entre los ingresos y salidas del flujo estaría siendo cubierta por la extracción del almacenamiento, siendo extraído un volumen medio anual de 11.26 Hm³/año del agua almacenada en el acuífero.
- En general los cuerpos de agua superficiales son ganadores, es decir, son alimentados por el acuífero. Sin embargo, si se analiza a detalle existe una compleja relación entre los mismos y el acuífero. En la parte alta del modelo se presenta la mayor transferencia de flujo del acuífero hacia el río Piura y en la parte baja del modelo los flujos discurren al acuífero desde las lagunas y el estuario. En el análisis del modelo en régimen transitorio se comprobó que existe una delicada relación entre el acuífero y los cuerpos de aguas superficiales, llegándose a invertir la transferencia de flujos ante incrementos de la explotación que producen cambios en la superficie de altura hidráulica.
- Debido al corto periodo de tiempo evaluado en el modelo, no ha sido posible evaluar la influencia de periodos húmedos como eventos de Fenómenos de El Niño, en los cuales se forman grandes llanuras de inundación que podrían estar recargando el acuífero. No obstante, el Servicio Geológico Checo menciona que no se encontró relación entre las inundaciones producidas por eventos extremos y la recarga del acuífero confinado. Lo cual concuerda con lo observado en el análisis de flujos del

acuífero confinado, donde se observa que éste no responde rápidamente ante incrementos de las recargas superficiales.

- El modelo representa de manera satisfactoria la realidad actual del acuífero del VMBP, por tanto brinda cierta seguridad en las hipótesis tomadas para la elaboración del modelo conceptual. Además, el modelo demuestra que las condiciones de borde y la geometría del acuífero son razonables y por tanto pueden ser usadas como referencia en la generación de modelos futuros y para el desarrollo de políticas de gestión de aguas. La calibración del modelo es aceptable, tanto en el modelo en régimen estacionario como en el modelo en régimen transitorio con valores NSE de 0.97 y 0.96, respectivamente. Debido a que no se cuenta con data histórica piezométrica suficiente, no fue realizada la validación del modelo. No obstante, la validación no garantiza la eficiencia de un modelo para predecir resultados y mucho menos la calibración garantiza que el modelo conceptual establecido sea el más adecuado, ya que incluso malos modelos conceptuales pueden ser calibrados y validados dando una falsa impresión de cuan exacto y preciso es el modelo para representar y predecir sistemas de aguas subterráneas (Bredehoeft & Konikow, 1993).
- El volumen de recarga lateral que estaría ingresando al acuífero proveniente del acuífero del Alto Piura (límite Noreste) y si existe o no una recarga lateral del acuífero proveniente de la Cuenca Chira (límite Norte), representan las mayores incertidumbres del modelo. Estas condiciones de contorno tendrían una alta influencia en el comportamiento del acuífero. Sin embargo, el conocimiento que se tiene de estos límites del acuífero es muy escaso.
- A pesar que el análisis de agua subterránea es una buena herramienta para la gestión de acuíferos, existe muy poco trabajo científico para mejorar el entendimiento del acuífero del VMBP. Por tanto es necesario desarrollar estudios que reduzcan la incertidumbre asociada a la conceptualización del modelo y la estimación de parámetros. La Autoridad Nacional del Agua, es la entidad que rige, monitorea y regula la explotación de aguas superficiales y subterráneas en el Perú, por tanto es la responsable de elaborar estudios de carácter científico que permitan caracterizar, cuantificar y cualificar los recursos hídricos que gestionan. En la región Piura se

conoce que el acuífero del VMBP es uno de los más grandes del Perú y se fomenta su explotación, existiendo políticas que actualmente restringen el uso de aguas superficiales y facilitan la explotación de aguas subterráneas. Sin embargo, con este trabajo se ha comprobado que el abatimiento está incrementando y esto conlleva al incremento económico de los costes de explotación, futuros problemas de intrusión salina y alteraciones en el ciclo natural del agua que deben ser evaluados en estudios futuros.

7. RECOMENDACIONES Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Durante el desarrollo de este trabajo han surgido una serie de cuestionamientos, que deben ser resueltos mediante estudios detallados de carácter técnico y científico. El modelo desarrollado representa un avance considerable en el entendimiento del acuífero del VMBP. Sin embargo, es necesaria la realización de estudios paralelos que incrementen la precisión y exactitud de futuros modelos.

- Una de las principales investigaciones que debe llevarse a cabo, es un estudio geológico regional con fines hidrogeológicos que permita establecer los límites del acuífero y las condiciones de borde asociadas a los mismos, principalmente el tipo de borde que existe al Norte con la Cuenca Chira y al Noreste con el acuífero del Alto Piura. El estudio no debe estar limitado a la geología superficial, sino también a la recopilación de información de testificación de perforación de pozos o calicatas que permitan mejorar la caracterización estratigráficamente el acuífero VMBP.
- Se debe considerar el desarrollo de un modelo hidrológico distribuido a una adecuada escala espacial y temporal que permita obtener información detallada de los componentes del ciclo hidrológico de la cuenca. De este modo se podrán reducir las incertidumbres asociadas a las recargas del acuífero. Además, es necesaria la implementación de estaciones de aforo en la parte baja del río Piura para la calibración de modelos hidrológicos y control de los flujos entrantes/salientes del acuífero.
- En la descripción del acuífero, se observó que la concentración de sales varía espacialmente existiendo una mayor concentración en el acuífero superficial, por tanto es necesario el desarrollo de un modelo de transporte de sólidos que permita analizar las posibles fuentes de contaminación y simular escenarios con medidas de mitigación.

- En el análisis realizado en este trabajo se ha observado que existe una considerable transferencia de flujo desde el acuífero del Alto Piura hacia el acuífero VMBP, con lo cual es necesario realizar un análisis de ambos acuíferos como unidad, ya que ambos pertenecen al mismo sistema hidrológico y son recargados por la misma fuentes de agua.
- Se debe implementar y fomentar por parte de la autoridades el monitoreo de trazadores isotópicos que posteriormente permitan evaluar el movimiento del agua y poder determinar de manera más precisa las fuentes de recarga de las aguas subterráneas del acuífero VMBP.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA-DCPRH. (2009). *Actualización del Inventario de Fuentes de Agua Subterránea del Valle Alto Piura - Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, PERÚ*. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/listado/ediciones-ana>
- ANA-DCPRH. (2011). *Caracterización hidrogeológica del acuífero del Valle Medio y Bajo Piura - Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, PERÚ*. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/listado/ediciones-ana>
- ANA-DCPRH. (2012). *Caracterización Hidrogeológica del Acuífero del Valle Medio y Bajo Piura - Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, PERÚ*. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/listado/ediciones-ana>
- ANA-DCPRH. (2015). *Evaluación de Recursos hídricos superficiales en la Cuenca del Río Piura (Valle Medio y Bajo Piura) Estudio Hidrogeológico - Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, PERÚ*. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/listado/ediciones-ana>
- ANA PROFODUA. (2009). *Actualización de la propuesta de asignación de agua en bloques (Volumenes anuales y mensuales) para la consolidación de la formalización de derechos de uso de agua en el Valle Medio y Bajo Piura - AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, PERÚ*. Retrieved from <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/listado/ediciones-ana>
- Bolzicco, J., García, J., Ortiz, R., Ludeña, A., Jurado, M., Estrada, F., & Huerta, F. (2013). *Investigaciones Hidrogeológicas Acuífero El Zapallal (Perú)*.
- Doherty, J. (2016). PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers. *Watermark Numerical Computing*, 279.
- Doherty, J. E. (2016). PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part II: PEST Utility Support Software. *Watermark Numerical Computing*, 279.
- Emilio, C., & Manuel, L. (2001). *Hidrología Subterránea. Tomo I Y II. Ediciones Omega. Barcelona*.
- Fang, S., Cheng, L., & Ayala, L. F. (2017). A coupled boundary element and finite element method for the analysis of flow through fractured porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,

- 152(March), 375–390. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.02.020>
- Faunt ed., C. C. (2009). *Groundwater availability of the central Valley Aquifer, California*.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. (cop. 2001. Upper Saddle River : Prentice Hall : Pearson Education International, Ed.) (4th ed.).
- Galecio Castillo, J. D. (2004). *Diseño de defensas ribereñas del río Piura en el tramo presa Los Ejidos - Puente Cáceres*.
- GEOCATMIN. (2017). :: GEOCATMIN - WGS84 :: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico Perú. Retrieved March 5, 2017, from <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/index.html>
- Geoservidor MINAM. (2017). Geoservidor Ministerio del Ambiente. Retrieved March 5, 2017, from <http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/>
- Harbaugh, Arlen, W. (2005). MODFLOW-2005, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, 253.
- Helberg Arce, J. E. (2011). *Potencial geofísico exploratorio del acuífero zapallal, Piura*.
- IMARPE. (2017). Altura del nivel medio del mar :: Instituto del Mar del Perú. Retrieved April 4, 2017, from http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I0178030104000000000000
- INCLAM. (2013). *Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Chira-Piura Informe Final - INCLAM Ingeniería del Agua*.
- INGEMMET. (1994). *Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes y Zaramilla 11-a, 11-b, 10-a, 10-b, 9-a, 9-b, 8-b, 8-c, 7-c – [Boletín A 54] - Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú*.
- INRENA. (2004). *Inventario de Fuentes de Agua Subterránea en el Valle Medio y Bajo Piura - INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES, PERÚ*.
- Jiménez-Martínez, J., Molinero, J., & Candela, L. (2009). *Estimación de la recarga por retornos de riego a través de la ZNS en área de agricultura intensiva bajo clima semi-árido. Análisis de Sensibilidad*. (Vol. IX).
- Langevin, C. D., & Panday, S. (2012). Future of Groundwater Modeling. *Ground Water*, 50(3), 334–339. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00937.x>
- Maheswaran, Khosa, R., Gosain, A. K., Lahari, S., Sinha, S. K., Chahar, B. R., & Dhanya, C. T. (2016). Regional Scale groundwater Modelling Study for Ganga River Basin. *Journal of Hydrology*, 541, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.029>
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (2003). The history of MODFLOW. *Ground Water*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02591.x>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASA. (2017). Reverb | ECHO. Retrieved April 3, 2017, from https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=✓&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle
- PNUD. (2000). *Estudio para el Tratamiento Integral del Río Piura - PROYECTO PNUD - GOBIERNO PER 98/018 CTAR PIURA*.
- Poeter, E., Hill, M., Banta, E., Mehl, S., & Christensen, S. (2008). UCODE 2005 and Six Other Computer Codes

- for Universal Sensitivity Analysis , Calibration , and Uncertainty Evaluation. *Environmental Protection Agency*, 299. [https://doi.org/Cited By \(since 1996\) 28rExport Date 4 April 2012](https://doi.org/Cited%20By%20(since%201996)%2028rExport%20Date%204%20April%202012)
- Rushton, K. R. (2004). *Groundwater hydrology: conceptual and computational models*. John Wiley & Sons.
- Sarah, S., Ahmed, S., Boisson, A., Violette, S., & de Marsily, G. (2014). Projected groundwater balance as a state indicator for addressing sustainability and management challenges of overexploited crystalline aquifers. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 1405–1419. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.016>
- SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA - Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente de Chile*. (S. Servicio de Evaluación Ambiental, Ed.).
- Servicio Geológico Checo. (2010). *Evaluación de las condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas de las Cuencas bajas del Río Piura y Río Chira para mitigar factores ambientales que restringen el desarrollo social y económico de las regiones. Reporte final*.
- Simcore Software. (2012). Processing Modflow An Integrated Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow, Transport and Reactive Processes.
- Trefry, M. G., & Muffels, C. (2007). FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. *Ground Water*, 45(5), 525–528. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x>
- U.S. Geological Survey. (2017). The Water Cycle: Organización de las Naciones Unidas para la Educación y USGS Water Science. Retrieved February 23, 2017, from <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>