

INFORME TÉCNICO

“Definición del Modelo Conceptual del Acuífero de Casablanca, V Región”

**REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 363**

Santiago, Diciembre de 2014

INDICE

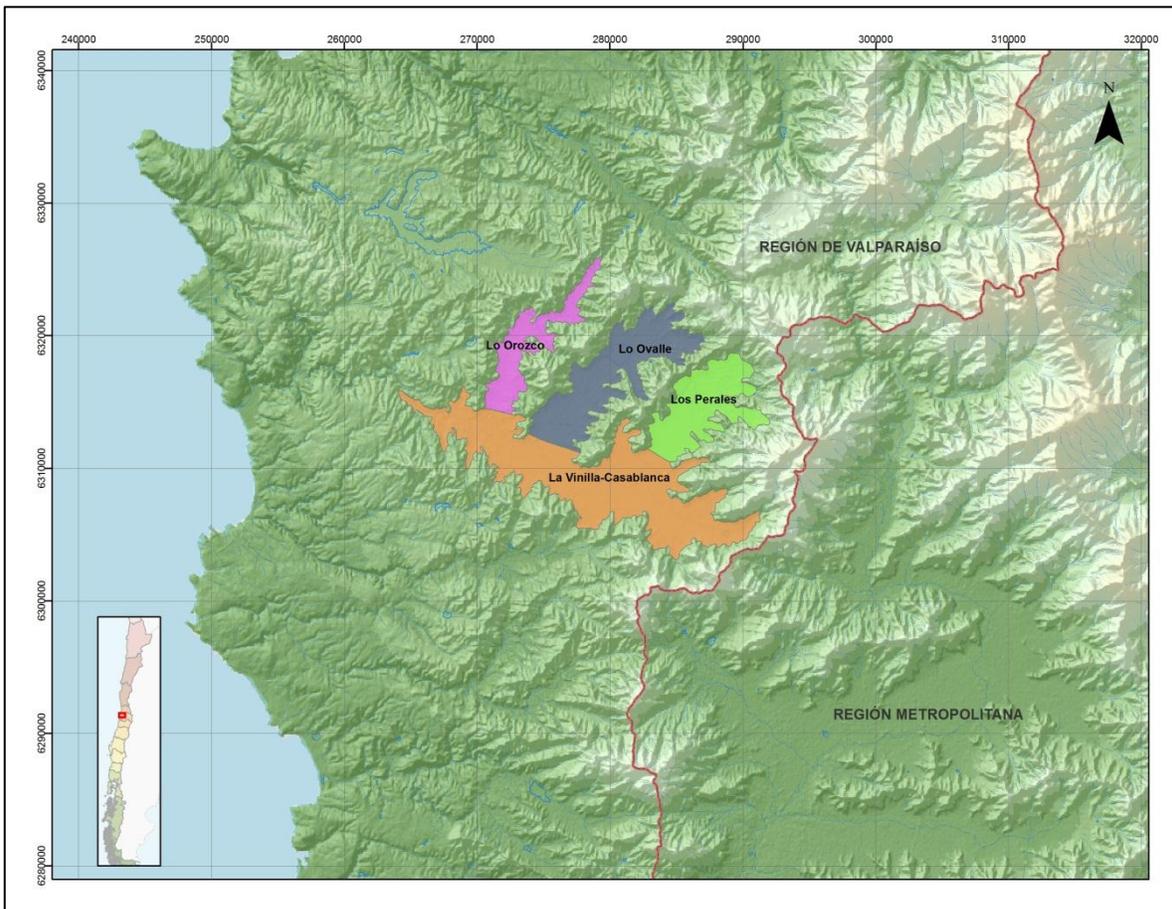
1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.	ANTECEDENTES	5
3.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	6
4.	TRABAJOS DE TERRENO	7
4.1	CATASTRO DE CAPTACIONES	7
4.2	DELIMITACIÓN DEL ACUÍFERO EN PLANTA	7
4.3	CAMPAÑA DE GEOFÍSICA	9
4.3.1.	Método Gravimétrico	9
4.3.2.	Método NanoTem	10
5.	GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES.....	10
5.1	UNIDADES GEOLÓGICAS.....	10
5.2	ESTRATIGRAFÍA	12
6.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	12
6.1	CLIMA.....	13
6.2	PRECIPITACIONES.....	13
6.3	HIDROGRAFÍA	14
7.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	15
7.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	15
7.2	GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	15
7.3	PIEZOMETRÍA DEL ACUÍFERO	17
7.4	DELIMITACIÓN DE ZONAS ACUÍFERAS.....	20
8.	CÁLCULO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS	21
9.	BALANCE HÍDRICO	23
9.1	ENTRADAS	23
9.2	SALIDAS	24
9.2.1	Evapotranspiración Potencial por Cultivo	24
9.2.2	Cálculo de Demanda Real de Agua según tipo de Cultivo	26
9.2.3	Resultados	29
9.3	BALANCE.....	29
10.	CONCLUSIONES	30

Juan Carlos Salgado González
Adrián Lillo Zenteno
Miguel Ángel Caro Hernández
Raúl Cisternas Novoa

1. INTRODUCCIÓN

En el acuífero de la cuenca del estero de Casablanca se han desarrollado variados estudios a través de la DGA, sin embargo, siempre surgen nuevas interrogantes y dudas, ya que el sistema es dinámico y varía con el tiempo. En el presente informe se busca definir el Modelo Conceptual del sistema, tanto superficial como subterráneamente.

La cuenca del estero Casablanca se ubica en la V región de Valparaíso, tal como lo muestra la siguiente figura.



En la cuenca se pueden distinguir cuatro valles de relevancia que la conforman y que son los siguientes: La Vinilla-Casablanca, Los Perales de Tapihue, Lo Ovalle y Lo Orozco (Figura 1). El estero propiamente tal se constituye un poco al oriente de la localidad de Casablanca, debido a la confluencia de los esteros Los Sauces y Tapihue. Su curso sigue una dirección aproximada SE-NW, recibiendo el aporte de los esteros Lo Ovalle y Lo Orozco, que son mayores afluentes. Finalmente desemboca en el Océano Pacífico a la altura de la localidad de Tunquén.

La cuenca está constituida por una depresión principal, en dirección NW-SE, correspondiente al sector donde se ubican las localidades de La Vinilla y Casablanca y

de ella se desprenden 3 depresiones laterales en dirección NE (Lo Orozco, Lo Ovalle y Perales de Tapihue), que posteriormente fueron parcialmente rellenadas con materiales provenientes de las alturas circundantes, debido a los procesos de erosión, remoción de material y sedimentación, dando lugar a los valles antes mencionados. Se observa además que las depresiones no presentan faldeos rectilíneos característicos de fallamiento, sino que se deduce que se han producido por simples pliegues y hundimientos en forma de artesa.

Con respecto a la precipitación, el régimen pluviométrico del área de la cuenca del estero Casablanca es de tipo mediterráneo, que tiene lluvias invernales con una estación seca prolongada y se extiende desde los límites del desierto hasta los 38° de Latitud Sur. Las lluvias son del tipo ciclónico y se ven afectadas por la influencia del relieve que exagera sus valores en la medida que se introduce al interior del país. La cordillera de la Costa con sus relieves modestos, actúa como una barrera provocadora de lluvias en sus faldeos occidentales; en las regiones ubicadas inmediatamente detrás de la Cordillera, en cambio, las precipitaciones ocurren sensiblemente disminuidas. El promedio anual de precipitación es de 488 mm., valor que se destaca entre los más altos para la latitud en que se encuentra Casablanca.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo del presente Informe es definir el comportamiento de los acuíferos existentes en la Cuenca del Estero Casablanca, a través de un Modelo Conceptual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis de antecedentes.
- Análisis de información de catastro realizado durante el año 2014.
- Utilización de perfiles geofísicos para la delimitación del acuífero en profundidad.
- Analizar el comportamiento hidrogeológico de la cuenca.

2. ANTECEDENTES

La Cuenca del Valle de Casablanca está siendo estudiada por parte de la Dirección General de Aguas (DGA) desde la década de los 90.

- En el año 1991, se realizó una modelación del sistema hídrico en la cuenca, incluyendo los acuíferos hasta la zona de las Dichas.
- En 1993, se implementó un modelo operacional superficial, y un modelo numérico para caracterizar el funcionamiento del acuífero.

- La División de Estudios y Planificación de la DGA, actualizó la información de la modelación numérica, realizando un nuevo catastro agrícola y de niveles de pozos en el año 2004, utilizando el software Visual Modflow 3.0.
- En la actualidad, ha habido un incremento de la demanda agrícola, provocando que esta superficie se extienda en altura, cubriendo grandes extensiones de lomas en cerros, y ha habido un cambio sustancial en el tipo de cultivos.

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

- El estudio que sirve de referencia para los futuros análisis es titulado "Estudio básico para la modelación del sistema de aguas subterráneas del Valle de Casablanca". / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación (DEP); Realizado por AC Ingenieros Consultores Ltda., Junio de 1991. (DGA/AC-1991)"
- Este estudio fue analizado por la empresa Rizzo Associates durante el año 2014. De éste análisis, que consistió en evaluar la información litológica, reinterpretar ensayos de bombeo y SEV, se concluye que en la mayor parte de la cuenca el acuífero es confinado o semiconfinado. Esto es distinto a lo que se concluye en el trabajo de AC Ingenieros Consultores Ltda. en el año 1991.
- En el año 1993 AC Ingenieros Consultores realiza otro estudio con el objetivo de contar con una herramienta que permita predecir los efectos de diferentes condiciones que se impongan al sistema hidrológico e hidrogeológico de Casablanca. Para tal fin, se desarrolló el modelo de simulación integrada Superficial-Subterráneo para poder planificar, administrar y racionalizar el aprovechamiento del recurso hídrico de la zona.
- Se analizaron 5 escenarios diferentes de simulación del modelo integrado para analizar la operación, considerando diferentes situaciones para períodos de como máximo 3 años consecutivos de baja recarga del acuífero, pero tomado en su total y no particularizando dónde convendría aumentar el ritmo de extracciones.
- En los años 1996 y 2004 la DGA realizó dos estudios en el valle de Casablanca, el primero enfocado principalmente en la obtención de la recarga de cada sector acuífero de la cuenca y el segundo, una Modelación hidrogeológica realizada con el software Visual Modflow v3.0
- En el año 2005, el DARH realiza un informe técnico que permitirá Declarar como área de restricción los siguientes sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común: Lo Orozco-La Vinilla/Casablanca-Los Perales.
- Finalmente en el año 2014 a través del Informe técnico DARH N° 77 se concluye que los sectores acuíferos de aprovechamiento común de La Vinilla-

Casablanca, Lo Orozco, Lo O valle y Los Perales, no pueden ser desvinculados unos de otros, pues tanto el área de recarga de un acuífero como su relleno sedimentario, conforman una sola unidad hidrogeológica, identificada como sector hidrogeológico de aprovechamiento común.

4. TRABAJOS DE TERRENO

Durante el año 2014 la empresa Rizzo Associates desarrolló varias labores de terreno en el valle de Casablanca, entre las que destacan catastro de captaciones con medición de nivel estático con GPS diferencial y levantamiento geofísico con métodos TEM y Gravimetría.

4.1 CATASTRO DE CAPTACIONES

Se catastró un total de 473 puntos de agua subterránea, junto con eso, se realizó una encuesta para obtener mayor información sobre los usos y demandas del agua. De las encuestas realizadas en terreno, se obtuvo la siguiente información.

- El 69% del uso se destina al riego
- El 7 % a usos ganaderos
- El 16 % se utiliza para uso domestico
- El 4,5 % para uso industrial
- El 3,5 % se utiliza para el abastecimiento de la población.

4.2 DELIMITACIÓN DEL ACUÍFERO EN PLANTA

Para delimitar la cuenca sedimentaria, se realizó una cartografía en terreno, siguiendo la metodología básica de una cartografía Geológica.

Esta metodología se dividió en 5 etapas:

1. Análisis de la documentación existente:

Se analizaron los estudios de referencia para conocer geología de la zona y así poder identificar y caracterizar las dos litologías que se quieren delimitar. Así mismo se compró el mapa geológico de la zona a escala 1:100000 del Sernageomin de 1996, que sirve para identificar las dos unidades que se quieren delimitar.

2. Reconocimiento:

Durante esta etapa se estudiaron las imágenes satelitales que sirvieron como apoyo para trazar el contacto roca-sedimento. A partir de estas imágenes se realizaron perfiles de elevación en zonas donde no estaban claros los afloramientos de roca.

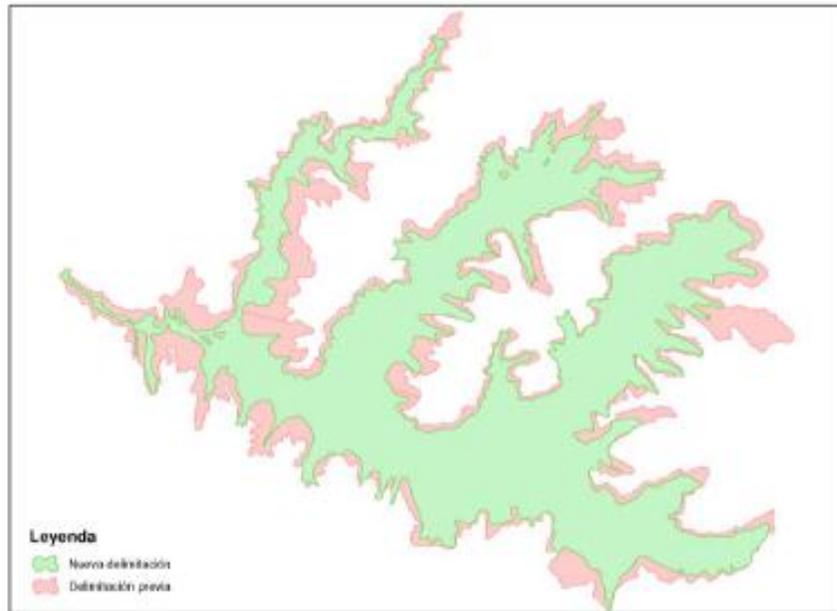
3. Recorrido:

Esta etapa se corresponde con la cartografía geológica. Se realizaron rutas a pie por toda la zona de estudio localizando los afloramientos de roca y tomando referencias con un GPS Garmin para posteriormente dibujar el límite en una base cartográfica

4. Análisis de los datos recopilados y construcción del mapa:

5. Los datos recopilados durante el recorrido a pie, se volcaron en mapas digitales.

Realizado esto, se generó una nueva delimitación del relleno sedimentario en planta, el cual se muestra en la siguiente figura:



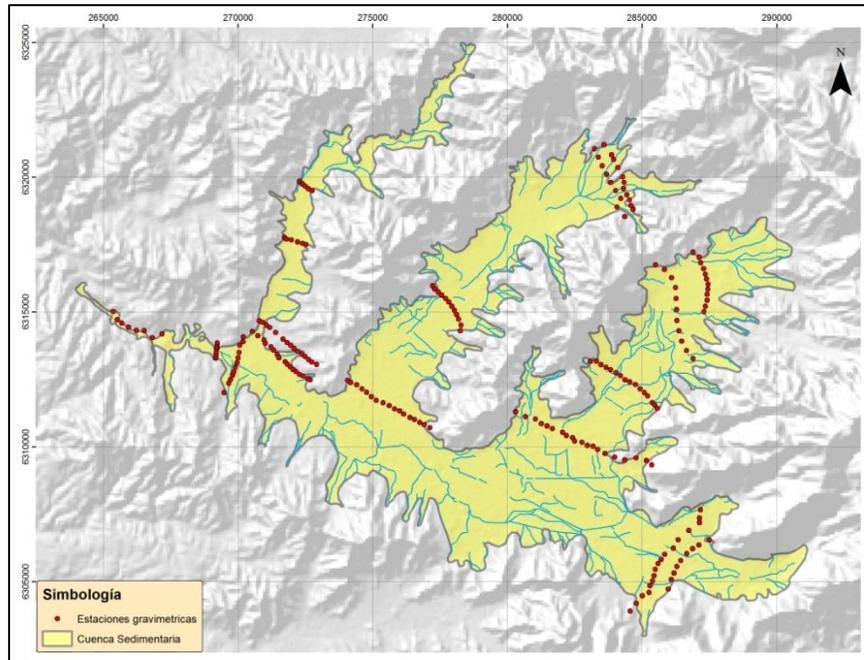
Nueva delimitación del relleno. Fuente: DGA/Rizzo Associates (2014)

El siguiente paso es redefinir el relleno sedimentario, pero en profundidad, para cumplir dicho objetivo se realizó una campaña de prospección geofísica.

4.3 CAMPAÑA DE GEOFÍSICA

4.3.1. Método Gravimétrico

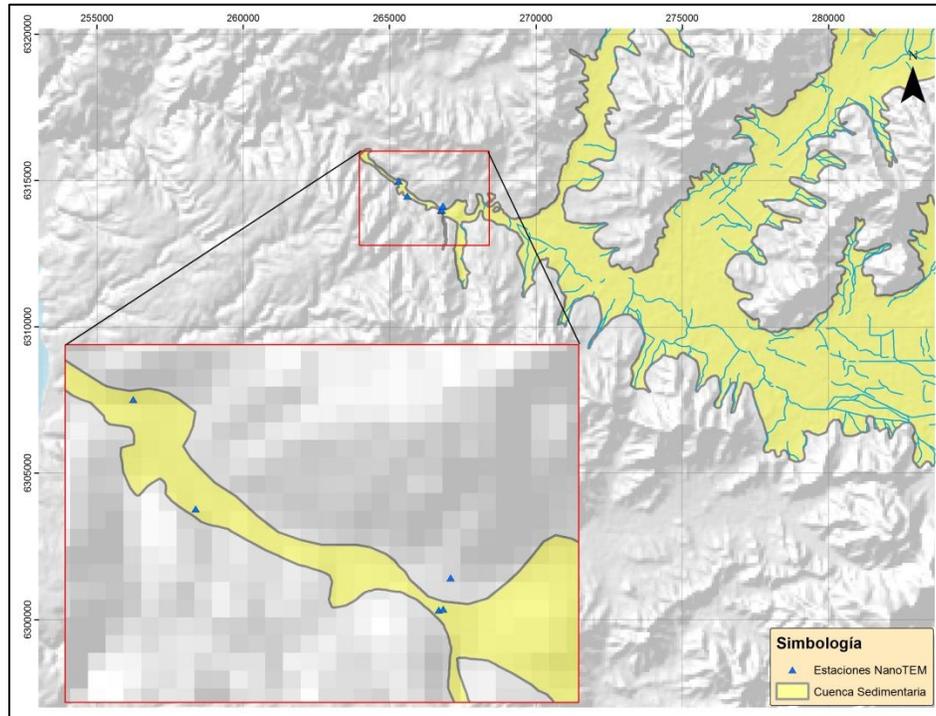
Se realizaron un total de 207 puntos gravimétricos, realizando dos perfiles en las cabeceras y dos en las salidas de cada sector acuífero, más uno longitudinal en el sector de Las Dichas.



Ubicación de perfiles gravimétricos. Fuente: DGA/Rizzo Associates (2014)

4.3.2. Método NanoTem

El trabajo consistió en medir 5 estaciones NanoTem en 3 sectores del estero Casablanca. La ubicación de los NanoTEM se muestra en la siguiente figura:



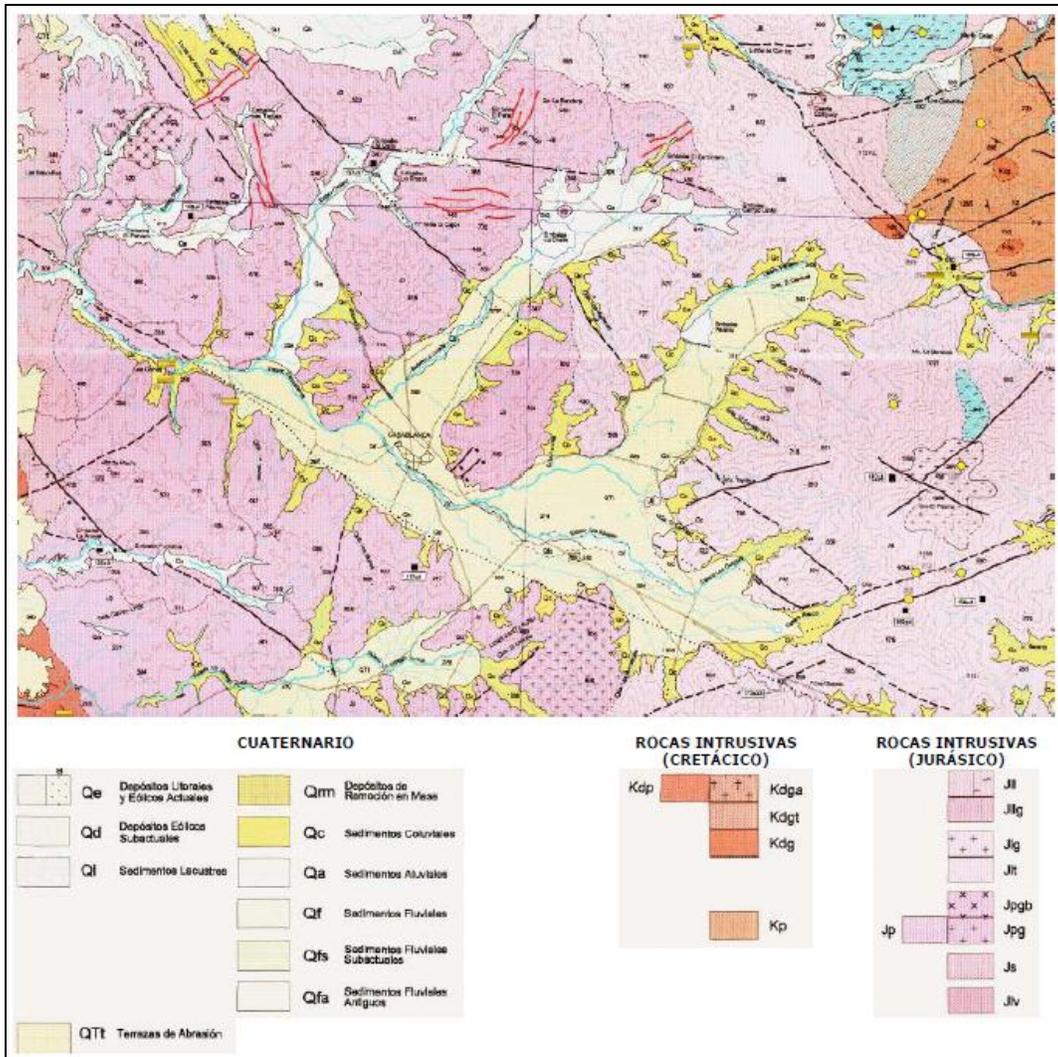
Ubicación de Estaciones NanoTEM. Fuente: DGA/Rizzo Associates (2014)

5. GEOLOGÍA Y FORMACIONES PERMEABLES

5.1 UNIDADES GEOLÓGICAS

Los materiales sobre los que se encaja la Cuenca del Estero de Casablanca son, fundamentalmente rocas intrusivas del Jurásico, mientras que los materiales que rellenan la cuenca están formados en primer lugar por sedimentos coluviales, aluviales y fluviales pertenecientes al Cuaternario.

Para realizar la descripción de las unidades geológicas que afloran en el sector de estudio se consultó el Mapa Geológico del área de Valparaíso-Curacaví (Escala 1:100.000) realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el cual se muestra en la siguiente figura.



Mapa Geológico estero Casablanca. Fuente: SERNAGEOMIN

Qc: Depósitos coluviales (Holoceno)

Qa: Depósitos aluviales (Holoceno)

Qf: Depósitos fluviales (Holoceno)

Qfs: Depósitos fluviales subactuales (Holoceno)

QTt: Terrazas de abrasión (Plioceno – Pleistoceno)

Kdg: Gabros de dos piroxenos y dioritas de hornblenda-piroxeno (Cretácico Inferior-Cretácico superior)

Jlg: Monzogranitos de anfíbola-biotita, con variaciones granodioríticas (Jurásico)

Jlt: Predominantemente tonalitas y granodioritas de anfíbola-biotita (Jurásico)

Jpg: Granitos, tonalitas y granodioritas de hornblenda-biotita (Jurásico)

Jp: Tonalitas de hornblenda-biotita y monzodiorita cuarcíferas que forman un plutón de 42 km de longitud (Jurásico)

5.2 ESTRATIGRAFÍA

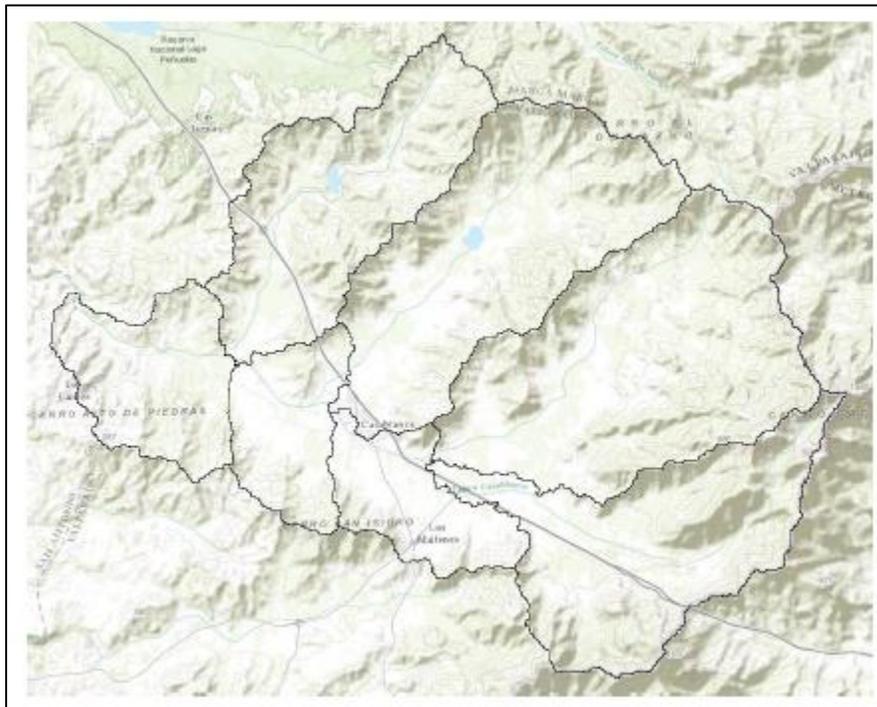
Durante el año 2014 la empresa Rizzo Associates con supervisión de la DGA, hizo una revisión de 43 expedientes con columnas litológicas. Esto ha permitido establecer un patrón de la serie estratigráfica. Esto es con un nivel superficial fundamentalmente arcilloso, el que tendría un espesor aproximado de 10 metros.

Luego hay un nivel que engloba materiales finos y gruesos correspondientes a la alternancia de depósitos de alta y baja energía típica de valles fluviales.

Bajo esta unidad se sitúa el basamento de la cuenca compuesto fundamentalmente por intrusiones graníticas y granodioríticas del jurásico.

6. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

La cuenca de Casablanca se subdivide en varias subcuencas, y éstas se definen considerando que las gotas de lluvia que caen sobre ellas, son drenadas por el sistema hidrológico hacia un mismo punto de salida. Las subcuencas hidrológicas se presentan en la siguiente figura:



Subdivisión de Cuencas hidrológicas. Fuente: DGA/Rizzo 2014

Los valores de temperatura y evaporación se obtuvieron de la Estación DGA de Peñuelas, la cual se encuentra fuera de la cuenca, pero es la más cercana, para la precipitación se utilizaron las Estaciones de Casablanca y Tapihue, ubicadas dentro de la cuenca.

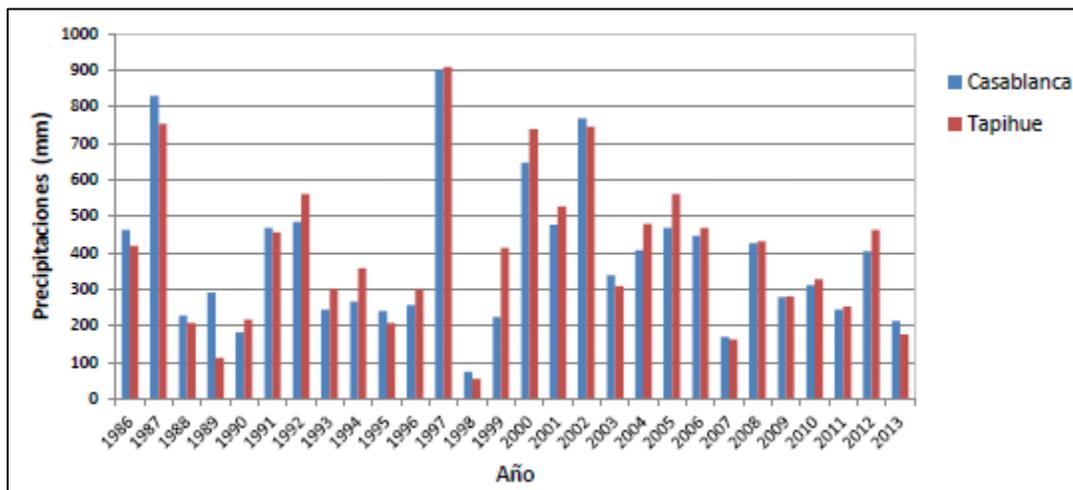
6.1 CLIMA

El clima en la cuenca de Casablanca es Templado Mediterráneo (según Köppen) caracterizado por precipitaciones invernales (80%) y estaciones secas que se extienden por 8 meses (Septiembre hasta Abril). Presenta de manera generalizada a lo largo del año una amplia cobertura de nubosidad baja matinal mayoritariamente de procedencia costera que entra a través de los valles y confiriendo al sector características particulares con rasgos del clima mediterráneo templado costero y el mediterráneo templado cálido propio de áreas interiores.

Las precipitaciones son de origen ciclónico y son afectadas por la influencia del relieve que las incrementa proporcionalmente a la elevación del terreno, de este modo, el bloqueo que ejerce la cordillera de la costa con su altura ocasiona preferentemente precipitaciones en los faldeos occidentales de la misma. El promedio anual de las precipitaciones se estima del orden de 488 mm (DGA, 2004), sin embargo en los últimos 28 años el promedio es menor a 400 mm.

Las temperaturas promedio son inferiores a los 18° C y superiores a 3° C en el mes más frío, con una temperatura media anual de 13,8° C. Una particularidad del clima es la caída de la temperatura en las noches estivales producto de la influencia marina (Ortega, R, 2011).

6.2 PRECIPITACIONES



Precipitaciones en la Cuenca. Fuente: DGA/Rizzo 2014

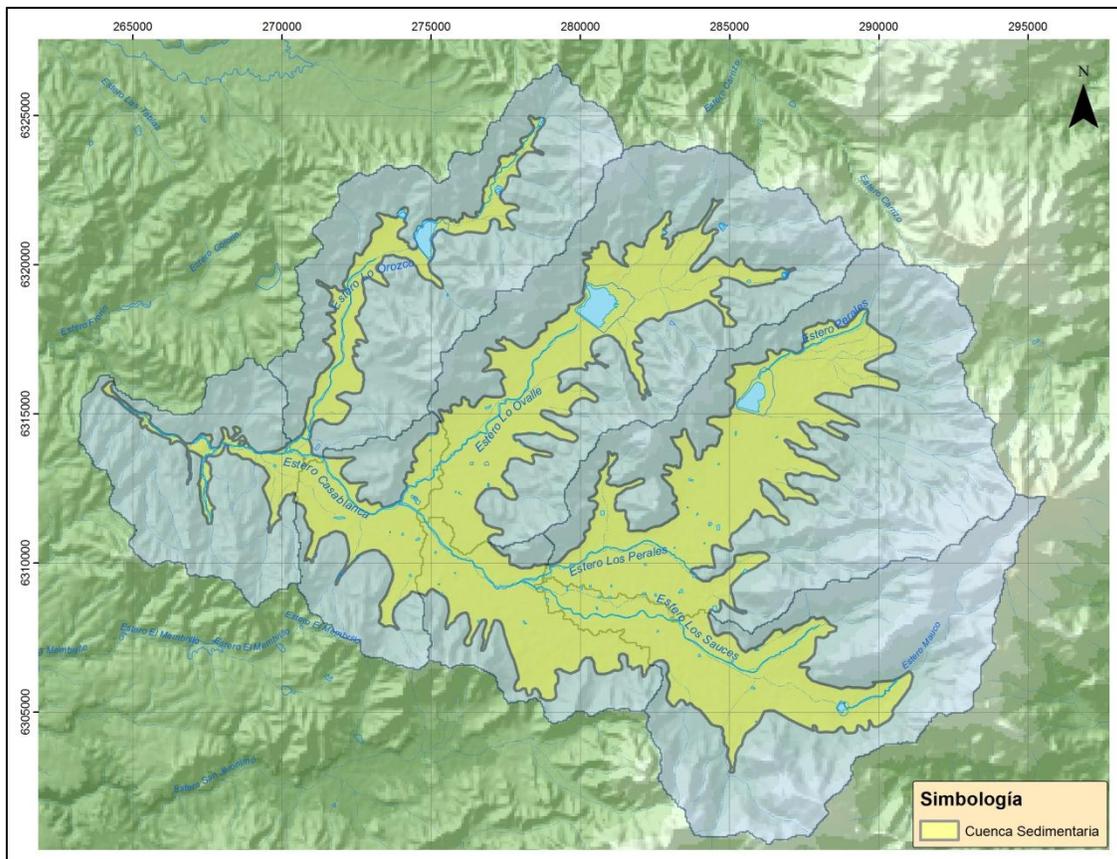
Según la distribución de las precipitaciones medias anuales en las estaciones meteorológicas de Casablanca y Tapihue se observa la existencia de años extremadamente húmedos como ocurre por ejemplo en 1997 coincidiendo con un episodio intenso del fenómeno del Niño. Este fenómeno, que afecta habitualmente incrementando la cuantía de las precipitaciones en esta región, tiene un carácter cíclico

pero a su vez errático (suele manifestarse con una recurrencia que oscila entre 3 y 8 años) por lo que no es posible estimar su próxima manifestación.

Si bien los registros pluviométricos muestran en los últimos años valores por debajo de la precipitación media anual no es posible afirmar con certeza la existencia de condición de sequía meteorológica en la cuenca estudiada ya que se requiere una escasez de precipitaciones pronunciada y continuada en el tiempo.

6.3 HIDROGRAFÍA

La cuenca del Valle de Casablanca, desde el punto de vista hidrográfico, debido a su ubicación espacial en el flanco occidental de la cordillera de la Costa, carece de cursos de agua principales como son ríos propiamente dichos. Sin embargo dispone de un sistema hidrográfico compuesto por un estero principal, denominado Estero de Casablanca y que se desplaza en sentido Este-Oeste. Este estero principal cuenta como tributarios con los Esteros Los Perales, Tapihue, Lo Ovalle y Lo Orozco por el Norte, que son los drenajes principales de cada subcuenca en la que se ha dividido el Valle.



Hidrografía principal en la Cuenca. Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que todos los cauces de la cuenca presentan un régimen pluvial. También es importante señalar que además de esta red hidrográfica, en las cuencas que

conforman el valle de Casablanca, se localizan 4 embalses, embalse de Lo Orozco, Lo Ovalle, Los Perales y La Vinilla, todos ellos de baja capacidad, entre los cuatro suman un total de volumen útil de 25 millones de m³, construidos en la década de los 30, que en la actualidad y desde hace al menos 5 años no contienen agua, pero que en épocas anteriores, década de los 90 abastecían de agua para el riego a través de una red de canales, que en la actualidad tampoco existen.

7. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

7.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Con la información antes mencionada, es decir, campaña de geofísica, análisis de estratigrafía y de ensayos de bombeo, se han caracterizados los distintos materiales existentes en la cuenca.

Rizzo Associates ha definido una única unidad hidrogeológica, entendiendo por unidad hidrogeológica el conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene estudiar conjuntamente. Se considera una unidad porque están conectados de forma que su funcionamiento (entradas, salidas, balance) hay que estudiarlo de forma conjunta. En la zona de estudio, la unidad hidrogeológica está constituida por estratos de espesor variable, con intercalaciones de material impermeable y semi impermeable, subyacente a un estrato superficial arcilloso y de muy baja permeabilidad. Esta última capa tiene un espesor de valor promedio en torno a los 10 m y su importancia radica en que impide la entrada por infiltración del agua procedente de las precipitaciones y escorrentía.

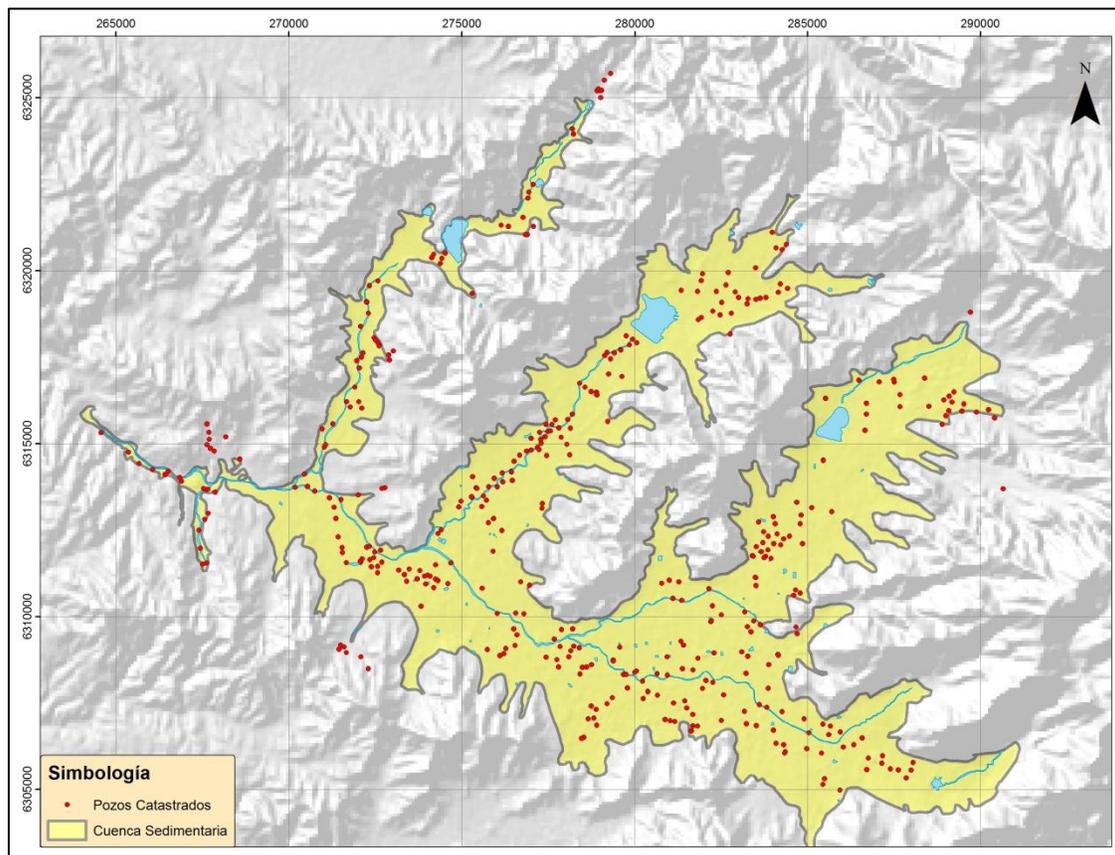
7.2 GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

La determinación de la geometría del acuífero, es decir, la ubicación del basamento rocoso, se basa principalmente en la interpretación de la geofísica realizada por Rizzo y por la interpretación de métodos realizados con anterioridad.

La ubicación de los perfiles fue presentada anteriormente. Y en la siguiente figura, se muestra la cota del basamento a través de curvas de isoprofundidad, obtenidas de la interpretación geofísica:

7.3 PIEZOMETRÍA DEL ACUÍFERO

Durante la campaña de terreno realizada entre los meses de septiembre y octubre de 2014, donde el principal trabajo fue el levantamiento de un catastro de usos y usuarios, se recopiló además valores de los niveles estáticos en aquellos pozos que cumplían las características para ello. En la siguiente figura se muestra la ubicación de los pozos catastrados:



Catastro de pozos. Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar, que las cotas de los pozos están medidas con GPS Diferencial Trimble R. Tanto las cotas de los pozos como las medidas de los niveles estáticos están referenciadas al suelo.

A continuación se presentan curvas piezométricas obtenidas en el catastro de niveles.

A partir de la anterior, es evidente que de los cuatro valles, los de mayor importancia hidrogeológica son los de La Vinilla-Casablanca y Los Perales de Tapihue, confirmándose que en ellos se presenta la mayor potencia del relleno sedimentario, y el mayor espesor saturado.

En el sector de La Vinilla-Casablanca, se observa que es en la cabecera del valle donde se alcanzan los mayores espesores saturados. En esta zona, la formación acuífera muestra un predominio de capas de material permeable (gravas y arenas), con intercalaciones de materiales impermeables o semipermeables. Hacia el sector occidental del valle, la formación acuífera muestra una disminución del número de capas permeables además de una menor potencia del espesor saturado. Los materiales que constituyen la formación acuífera en esta zona son arenas y gravilla o maicillo, con cierto contenido de grava en algunos casos. A lo largo de todo el valle, se observa que los espesores de los estratos permeables de la formación acuífera rara vez superan los 15 a 20m, siendo muchos más frecuentes los espesores comprendidos entre 2 y 5m.

El sector de Los Perales de Tapihue presenta formaciones acuíferas de naturaleza lenticular, semejantes a las observadas en La Vinilla-Casablanca, y es en este sector donde el acuífero presenta los mayores espesores en general, alcanzando espesores entre 70 y 135 metros. La formación acuífera está compuesta fundamentalmente por arenas gruesas y finas, con algo de grava. La mayor potencia del relleno sedimentario, se encontraría aguas abajo del embalse Los Perales.

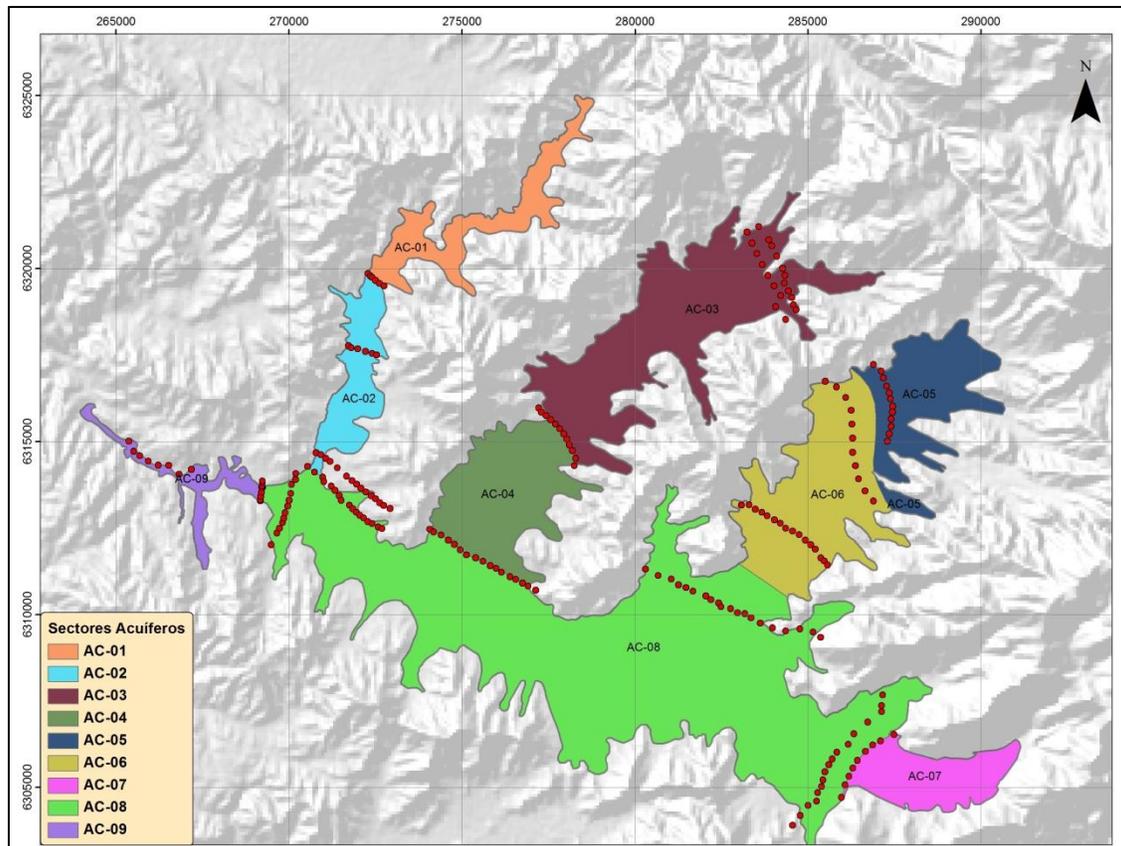
En el caso de Lo Ovalle y Lo Orozco, las características acuíferas son claramente inferiores a la de los valles anteriormente referidos, debido a su menor ancho, una menor potencia del espesor saturado y a las características de los estratos permeables. La presencia de un estrato superficial arcilloso explica el dominio de napas confinadas a lo largo de los cuatro valles en los que se estructura la cuenca del Estero Casablanca, observándose la existencia de napas libres sólo en los sectores de recarga de estas formaciones acuíferas (conos de deyección en faldeos laterales de la cuenca) y en algunos otros puntos aislados. En este sentido cabe comentar que estos conos de deyección son más abundantes en el valle de Los Perales de Tapihue.

Por otro lado, el basamento formado por intrusiones fundamentalmente graníticas y granodioríticas jurásicas corresponde a una formación de muy baja permeabilidad sobre la que se depositan los materiales sedimentarios del Cuaternario. La profundidad del basamento es variable, siendo este hecho relevante en la evaluación de las características hidrogeológicas de la formación acuífera según qué sector de la cuenca.

7.4 DELIMITACIÓN DE ZONAS ACUÍFERAS

Una vez realizada la geofísica y obtenida las curvas piezométricas, se opta por subdividir el acuífero en distintas zonas. Esto para facilitar el cálculo del flujo pasante y del volumen embalsado, hecho que no modifica en lo absoluto los valores obtenidos.

Las zonas obtenidas se muestran en la siguiente figura:



Subdivisión de acuíferos. Fuente: DGA/Rizzo (2014)

Como se aprecia en la figura, las subzonas se corresponden, en su mayoría, con los perfiles gravimétricos.

8. CÁLCULO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS

Los flujos subterráneos provenientes de cuencas laterales se han calculado con la ecuación fundamental que regula el flujo, es decir, la Ley de Darcy:

$$Q = k * i * A$$

donde,

Q: Es el caudal subterráneo o sección de flujo, normal a la dirección de flujo en la unidad de tiempo.

i: Es el gradiente hidráulico el cual expresa, en unidades de longitud, las pérdidas de carga hidráulica que se necesita para trasladar una unidad de masa desde un punto a otro del acuífero en el intento de vencer las fuerzas de rozamiento y retardo viscoso del agua sobre el medio poroso. Es adimensional.

A: Es el área total de la sección de flujo.

K: Es la Permeabilidad horizontal o Conductividad hidráulica expresada en m/día o cm/seg.

Cabe señalar que el gradiente hidráulico fue calculado con las curvas piezométricas.

La metodología para estimar la recarga por este método, es sencilla, puesto que se basa en admitir que, en ausencia de bombeos y encontrándose la superficie freática por debajo del nivel de afectación por evaporación de la franja capilar, la diferencia de caudal subterráneo, aguas arriba menos el flujo saliente en una sección aguas abajo, representa la recarga que recibió lateralmente la cuenca sedimentaria, desde las estructuras positivas de relieve que la circundan.

Se han estimado, para los cálculos del flujo subterráneo entre las distintas zonas acuíferas, los aportes laterales de los valles Lo Orozco; Lo Ovalle; Los Perales de Tapihue y del valle central Vinillas-Casablanca para 1991.

El cálculo de las recargas laterales se realizó considerando la piezometría del año 1991.

Como se mencionara anteriormente, el cálculo mediante la ecuación de Darcy requiere que el gradiente sea calculado en una sección de flujo transversal al mismo. Para los cálculos de caudales subterráneos fue excluida la sección gravimétrica L21 debido a que se dispone transversalmente a las líneas equipotenciales. Para aquellos lugares, donde es necesario calcular el flujo subterráneo de una zona acuífera a otra y no se dispone de secciones geofísicas, como es el caso del acuífero AC-04 y su vinculación con el AC-08, se utilizó la siguiente metodología: Se construyó un mapa con las cotas obtenidas en el Catastro de Pozos llevado a cabo por RIZZO durante Septiembre y Octubre 2014, con el cual se puede reconstruir la topografía de la sección y se dispone así mismo del Mapa Isopáquico del Relleno Total Sedimentario 2014, que permite

conocer los espesores sedimentarios en cualquier sitio de la zona de estudio. Con la interacción de estos dos mapas se pudo obtener un perfil de la sección entre los dos acuíferos y calcular el área necesaria para obtener el flujo.

Con todo esto se obtiene la sección en cada subzona. El gradiente hidráulico se obtuvo del Informe Técnico SIT N°97 del año 2004.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

LÍNEA GRAVIMÉTRICA	Área de flujo máximo (m ²)	Permeabilidad Kh(m/d)	Gradiente Hidráulico i (%)	Flujo subterráneo l/s	Flujo entre Acuíferos
Los Perales-Tapihue					
L10	63.967	3,18	4,16 E-3	9,9	
L11 (sección sigmoïdal)	235.376	5,17	3,84E-03	41,9	AC-05-AC-06
L20	204.213	6	3,84E-03	53,9	
L 21	133.75	5.17	3,60E-03	28,6	AC-06-AC-08
Vinilla Este					
L70	142.000	7,47	5,00E-03	61,4	AC-07-AC-08
L71	282.297	7,47	6,00E-03	148	
Ovalle					
L30	49.480	3	6,70E-03	11,4	
L31	99.241	3	6,70E-03	23	
L41	66.000	4,3	5,50E-03	18,06	AC-03-AC-04
L40	90.706	41,2	2,77E-03	119,8	AC-04-AC-08
Orozco					
L50	2.822	10,1	4,54E-03	1,5	AC-01-AC-02
L51	8.911	10,1	3,60E-03	3,72	
L61	40.000	6,7	3,18E-03	9,87	AC-02-AC-08
Casablanca Salida Oeste					
L80	68.075	25,8	9,00E-04	18,5	
L81	1.215	41,7	1,00E-03	0,57	AC-08-AC-09

En la tabla, la columna "Flujo subterráneo" representa los litros por segundo que pasan por dicha sección o entre las secciones definidas en la columna "Flujo entre Acuíferos".

9. BALANCE HÍDRICO

En este capítulo se aborda un tema por demás importante el cual se refiere a la hidrología de la Cuenca del Estero Casablanca, es decir, sobre la demanda total de agua, la cual incluye los usos Consuntivos y No Consuntivos. El balance hídrico se calculó para el año 2013, por tanto los datos utilizados para realizar los cálculos son los correspondientes a dicho año.

El cálculo de Evapotranspiración Total, tanto de la superficie cultivada, como la correspondiente a zonas de bosques y matorrales, se abordó mediante la aplicación de fórmula agronómica de Blaney-Criddle, la cual a partir de la determinación de la Evapotranspiración de referencia, se la ajusta de acuerdo al consumo de las distintas especies cultivadas en la zona de trabajo. La adopción de dicha fórmula, además, es consecuente con lo adoptado por otros investigadores que han realizado el mismo trabajo en la Cuenca del Estero Casablanca desde 1991.

El balance incluye las demandas totales con respecto a las precipitaciones.

9.1 ENTRADAS

Como se citó recientemente, el único ingreso de agua a la cuenca es la precipitación pluvial, concentrada entre Mayo y Agosto, a continuación se presentan las precipitaciones acumuladas mensuales:

Meses	Precipitación mm
Enero	0.8
Febrero	0.1
Marzo	0.5
Abril	0.7
Mayo	108.5
Junio	54.8
Julio	13.4
Agosto	19.1
Septiembre	3.3
Octubre	0.7
Noviembre	0.4
Diciembre	0.1
TOTAL	202.4

Tomando el valor de 202.4 mm de precipitación anual acumulada y una superficie de 470,19 km² para la Cuenca hidrológica del Estero Casablanca, los ingresos de agua se calculan como el producto de la superficie mencionada y el valor anual total de agua por kilómetro cuadrado.

9.2 SALIDAS

A los efectos de realizar el Balance Hídrico de la Cuenca del Estero Casablanca, se ha planteado en forma separada las pérdidas de agua causadas por el fenómeno natural de evapotranspiración en plantas (estrechamente ligadas a la actividad agrícola de la zona), y aquellas relativas al consumo humano urbano e industrial. Vale aclarar que se trata de una cuenca geomorfológicamente inactiva, sin presentar egresos a través de escurrimiento superficial por ríos, arroyos, etc., al menos dentro del corto plazo.

9.2.1 Evapotranspiración Potencial por Cultivo

En este apartado se desarrolla la metodología empleada en la determinación de los volúmenes de agua requeridos para satisfacer las necesidades de los cultivos, incluyendo la vegetación natural boscosa, y las pérdidas internas, a partir de datos climáticos, de cultivos y estimaciones de uso interno.

Las demandas de agua se calculan para las diferentes plantaciones, conformadas por viña, maíz, frutales, alfalfa y cebada, además de las áreas boscosas aledañas.

Para estimar la Evapotranspiración Potencial (máxima) de los cultivos existen varios métodos, de los cuales el método de Blaney-Criddle modificado por la FAO (Agencia Americana de Alimentos) es el más adoptado. Este método establece que las pérdidas de agua que se realizan a través de una planta (ET_c) dependen de una componente fisiológica, propia de cada especie vegetal, y que viene representada por el Coeficiente de cultivo (K_c), así como una componente climática que determina la Evapotranspiración de Referencia (ET_0) en función algunas variables meteorológicas. Así, la fórmula que permite su cálculo adquiere la siguiente forma:

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (1)$$

Donde,

K_c es el coeficiente de cultivo.

ET_0 es la Evapotranspiración Potencial de Referencia [mm/día].

ET_c es la Evapotranspiración Potencial de cada cultivo [mm/día].

El coeficiente de cultivo es un valor adimensional que depende de la vegetación y no es constante durante el año.

Según el estudio de la Universidad Técnica Federico Santa María del año 2013 "Diagnóstico acabado de la Cuenca del Valle de Casablanca, utilizando tecnología Geoespacial", los coeficientes de cultivo promedio de la cuenca se presentan en la siguiente tabla:

	Viña	Maíz	Frutales (Olivos- Cítricos)	Alfalfa- Cebada	Bosque
Septiembre	0,15	-	0,6	-	Se asume que por su gran follaje perennifolio el bosque trabaja con valores máximos de evapotranspiración ($ET_c = ET_0$), por lo que se adopta un Coeficiente de cultivo $K_c = 1$ para todos los meses del año.
Octubre	0,42	0,3	0,7	0,3	
Noviembre	0,675	0,65	0,7	0,7	
Diciembre	0,675	0,85	0,7	1,05	
Enero	0,85	1,2	0,8	1,3	
Febrero	0,85	1,1	0,7	1	
Marzo	0,6	0,9	0,7	1	
Abril	-	-	0,7	0,9	

La **Evapotranspiración Potencial de Referencia** (ET_0) indica la Evapotranspiración Potencial de cierta región geográfica en función únicamente de las características meteorológicas dominantes en la misma. Es importante destacar que aunque se trate de un valor diario, expresado en mm/día, representa un promedio mensual dado que las variables contempladas en su cálculo son valores de promedios mensuales. En su forma original Blaney-Criddle proponen la fórmula:

$$ET_0 = (0,457 * t + 8,13) * P \quad (2)$$

Dónde:

t es la temperatura media mensual [°C] y
P es el factor de duración del día [adimensional]

Estos valores se obtienen de tablas que dependen de la latitud

La modificación introducida por la FAO al método empírico de Blaney-Criddle, se trata de una aproximación más realista que contempla los factores más importantes influyentes en la Evapotranspiración. Así, surgen los coeficientes "a" y "b" que depende de la humedad relativa del aire, de la insolación y de la velocidad del viento, y que afectan a la Evapotranspiración de Referencia ET_0 .

La Evapotranspiración de Referencia modificada por la FAO resulta ser:

$$ET_0 = a + b * f \quad (3)$$

Donde los términos "a" y "b" son coeficientes adimensionales que se obtienen de una tabla y "f" es el factor de uso Consuntivo promedio mensual [mm/día], que no es más que la Evapotranspiración de Referencia de Blaney-Criddle.

Al no disponer de datos de insolación diaria en la estación meteorológica Casablanca para ninguna fecha., se tomaron los datos de la estación cercana Santo Domingo,

presentados en el Anuario Climático 2013 (pág.30). En la figura se muestra la ubicación de esta estación.

Por último, la fórmula de Blaney-Criddle modificada por la FAO, se obtiene al insertar la ecuación (2) en la (3), y lo mismo en la (1) y se obtiene lo siguiente:

$$ET_c = [a + b * (0,457 * t + 8,13) * p] * K_c \quad (4)$$

9.2.2 Cálculo de Demanda Real de Agua según tipo de Cultivo

Conocidos los valores de Evapotranspiración Potencial de los diferentes cultivos, se procede a calcular la dotación para cada uno de estos, es decir, el volumen medio mensual unitario [$m^3/Ha*mes$] requerido para satisfacer las necesidades de agua del mismo, las cuales dependen además de la eficiencia del sistema de riego y de los requerimientos de lavado del suelo. El primer cálculo es el del Requerimiento neto de riego (RNR):

$$PNR = ET_c - (PP + Ss + Alm)$$

Dónde,

RNR: Requerimiento Riego Neto (mm/mes)

ET_c : Evapotranspiración Potencial del cultivo (mm/mes)

PP: Precipitación (mm/mes)

Ss: Provisión subsuperficial del agua

Alm: Aportes del almacenamiento de agua del suelo

La Evapotranspiración Potencial de cada cultivo calculada por el método de Blaney-Criddle, es un valor promedio diario (mm/día); para obtener los valores mensuales se multiplica dicho valor por el número de días del mes correspondiente.

La precipitación se obtuvo de la estación meteorológica Casablanca.

En el caso de los bosques, debido a su gran follaje, las pérdidas por intercepción pueden ser significativas por lo que se ha considerado un valor conservativo del 28% (tomado de un informe anterior del mismo proyecto).

Como una visión conservadora se considera que la influencia de la provisión subsuperficial "Ss" y los aportes del almacenamiento de agua del suelo "Alm" son despreciables, con lo que lo que el Requerimiento Neto de Riego es:

$$PNR = ET_c - PP$$

Los requerimientos netos de riego representan la cantidad de agua que se deberá derivar hacia el área de riego para cubrir las necesidades efectivas de agua en los

cultivos. Para calcular los Requerimientos Totales de Riego es necesario tener en cuenta una cantidad adicional indispensable para mantener el nivel de salinidad adecuado en la solución del suelo. Sin embargo, en la zona no hay requerimientos de lavado del suelo, debido a la buena calidad del agua de riego y a los métodos de riego, por lo tanto, el Requerimiento Total de Riego es igual que el Requerimiento Neto de Riego.

Por último, se tienen en cuenta las pérdidas de agua que se producen en el uso interno por parte del regante, el cual depende básicamente del sistema de riego y del tipo de suelo. Por lo tanto el volumen de agua mensual que se necesita en una hectárea de un cultivo dado, para un tipo de suelo y cierta calidad de agua, viene dada por la siguiente expresión, conocida como dotación volumétrica unitaria.

$$DOT = \left(\frac{RTR}{Ea} \right) * 10$$

Donde,

DOT: Dotación Volumétrica unitaria [$m^3/Ha*mes$]

RTR: Requerimiento total de riego [mm/mes]

Ea: Eficiencia de aplicación [%]

La siguiente tabla contiene valores de eficiencia para diferentes métodos de riego por cultivo:

Especie vegetal	Sistema de riego	Superficie bajo el sistema de riego (%)	Eficiencia de riego (%)
Viñas	Goteo	100	90
Maíz	Pivote	60	80
	Surco	40	50
Frutales	Goteo	100	90
Alfalfa (pradera)	Pivote/tecnificado	60	80
	Surco/tendido	40	50
Bosque	Secano (natural)	100	100

La demanda mensual para cada cultivo se calcula como el producto de la dotación de dicho cultivo por la superficie cultivada en [Ha] correspondiente con lo que se obtiene un valor expresado en [m^3/mes]. Como puede apreciarse en la tabla de arriba, los cultivos de maíz y alfalfa están regados por dos sistemas diferentes, por lo cual es imprescindible el cálculo de dos dotaciones para cada cultivo. La demanda mensual en ese caso, como es de esperar, se calcula como la suma de los productos de la dotación para cada sistema de riego por las correspondientes superficies cultivadas bajo dicho sistema. Finalmente, la demanda anual por cultivo es la suma directa de las demandas mensuales de cada cultivo.

Para el riego de la viña, se han considerado otros factores, los cuales se citan a continuación:

Control de heladas: Una de las características productivas relevantes de la viña en el Valle de Casablanca es la gran superficie que opera con control de heladas por agua entre los meses de Septiembre y Noviembre. El gasto de agua de este sistema de control puede llegar a ser alto, de 20 m³/Ha por hora de funcionamiento. En general, se presentan 7 a 10 eventos de heladas por temporada, y en cada día de control de heladas los sistemas se mantienen en funcionamiento por un tiempo cercano a las 8 horas. Según información proveniente del Catastro realizado por RIZZO en Septiembre - Octubre 2014 y de información tomada de "Diagnóstico acabado de la cuenca del Valle de Casablanca utilizando Tecnología Geoespacial", Universidad Técnica Federico Santa María, CATA, 2013, la superficie viñatera que tiene control de heladas en el Valle de Casablanca sería de aproximadamente unas 3000 Ha.

El gasto es muy variable dependiendo del modelo del sistema utilizado y de las condiciones ambientales. Sin embargo, se ha optado como un cálculo conservativo aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Gasto por control de heladas [Hm}^3\text{/año]} = 20 \text{ [m}^3\text{/Ha. hora]} * 10 * 8$$

Estrés hídrico: El estrés hídrico, como práctica agrícola, consiste en la reducción controlada del agua aportada a las plantas con diferentes objetivos. En la vitivinicultura es una práctica muy utilizada como herramienta para mejorar la concentración de taninos y color de las uvas, trasladándose dichas características posteriormente a los vinos, lo que mejora su calidad. Pero también se la utiliza cuando hay una importante escasez de agua, y en situaciones límites para racionar las dosis en los riegos, reduciendo de esta manera el gasto de agua hasta donde la planta vive y pueda resistir con menor producción vegetal. En particular, en la zona de estudio se observa una disminución de la demanda anual de riego en un 40% al someter a las viñas al mencionado estrés hídrico controlado (tomado de "Diagnóstico acabado de la cuenca del Valle de Casablanca utilizando Tecnología Geoespacial", Universidad Técnica Federico Santa María, CATA, 2013). Por consiguiente, la demanda anual de las viñas se calcula inicialmente como la demanda a partir de la dotación y superficie cultivada, multiplicada por el factor de estrés hídrico, para el caso 60% (100% - 40%), y sumando los gastos por control de helada explicados anteriormente.

$$\text{Demanda anual total [Hm}^3\text{/año]} = \text{Demanda anual [Hm}^3\text{/año]} * 0,6 + \text{Gasto por control de heladas}$$

9.2.3 Resultados

En la siguiente tabla se muestra la síntesis de los resultados obtenidos, considerando demandas anuales para cada cultivo

Demandas anuales (Hm ³)	
<i>Viña</i>	17,60
<i>Maíz</i>	1,58
<i>Alfalfa</i>	3,36
<i>Frutales</i>	5,17
<i>Total Cultivos</i>	27,71
Bosque	192,59
Total	220,30

9.3 BALANCE

Una vez calculados las pérdidas y las ganancias puede establecerse la ecuación de balance general:

$$\text{Balance global} = \Sigma \text{ Ganancias} - \Sigma \text{ Pérdidas}$$

Y reemplazando los términos para el caso particular el balance se plantearía como

$$\text{Balance Global} = \text{Precipitación [Hm/año]} - (\text{Demanda urbana/industrial [Hm/año]} + \text{Demanda por Vegetación [Hm/año]})$$

Siendo el balance hídrico global:

$$\text{Balance} = - 127,24 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

La Cuenca hidrológica del Estero Casablanca está en una situación netamente deficitaria, con una pérdida equivalentes a 127 Hm³/año (según valores del año 2013). Esta situación puede sostenerse prolongadamente mientras la cuenca no reciba mayores aportes por precipitaciones o no se controle la extracción de agua subterránea por bombeos.

10.CONCLUSIONES

Claramente la cuenca se encuentra en un estado de déficit hídrico, en los últimos años se ha explotado el recurso sin medir consecuencias.

Con el estudio realizado por Rizzo Associates durante el año 2014 se dio un paso importante en la investigación y el conocimiento del acuífero de Casablanca, tanto así, que se concluye que el acuífero es confinado y no libre como se estipuló en el año 1991. Esto se debe principalmente a las nuevas herramientas existentes y tecnología de precisión utilizada.

En la cuenca, como se ha citado en el documento, existen 3 sub-acuíferos aportantes al acuífero principal, sin embargo, dicho aporte es cada año más despreciable, principalmente en el sector de Lo Orozco, donde si bien, las extracciones son menores, ya casi no existe flujo hacia el acuífero de Casablanca-La Vinilla, este hecho también se debe a la nueva delimitación del relleno sedimentario en que en la zona antes mencionada (Lo Orozco) se reduce bastante el sector que une ambos acuíferos.

La nueva delimitación acuífera, también se debe, principalmente a la aplicación de nuevas tecnologías mucho más precisas.

Es muy importante la información que se ha generado y actualizado, ya que, si bien es reinterpretable, es el dato duro el que servirá de input para futuras modelaciones.