

# RESULTADOS



### **3. RESULTADOS**

En el presente capítulo se expondrán todos los resultados alcanzados. Se seguirá para su presentación el orden adelantado en el apartado metodología.

#### **3.1. Hidrometeorología y Clima**

La Hidrometeorología es por definición el “estudio de la fase atmosférica del ciclo hidrológico y especialmente de su interrelación con la fase terrestre” (González et al., 1986). Consecuentemente con ello se ha ordenado el desarrollo de los temas involucrados siguiendo una secuencia lógica, basada en la ocurrencia e importancia dentro del ciclo hidrológico de cada una de las variables.

##### **3.1. 1. Precipitación**

Como se expuso en el capítulo metodología, la información pluviométrica proviene de diversas fuentes, con amplias diferencias en lo que respecta a la extensión de los registros y los periodos que estos abarcan.

En la Tabla 3.1.1 se muestran las estaciones con las que finalmente se trabajó una vez realizada la primera selección, función de la consistencia de los datos (representatividad, extensión y garantía).

Los registros procedentes de la estación Puerto Madryn corresponden a dos periodos separados, el primero procedente del Servicio Meteorológico Nacional y el segundo del CENPAT. La información recopilada del SMN es de tipo modular mensual y corresponde a los decenios 1951/60 y 1961/70. A partir de 1980 los datos comienzan a ser tomados por el Centro Nacional Patagónico y el record disponible es de tipo diario.

La estación Faro Punta Delgada cuenta con información obtenida por el SMN y cedida a este estudio por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) sede en la ciudad de Trelew. La información modular mensual corresponde al período 1942/1968.

Puerto Pirámides, Ea. El Trébol y Ea. La Isla presentan una situación análoga a la anterior (solo datos modulares para el período completo), con la salvedad que los registros originales fueron tomados por los pobladores de cada sitio.

La información de las estaciones, Ea. La Pastosa, Ea. La Corona y Ea. El Salitral, fue obtenida por los pobladores de cada sitio y recopilada y cedida por el INTA.

Corresponden a series mensuales completas para cada uno de los períodos expuestos en la tabla anterior.

Tabla 3.1.1: Estaciones pluviométricas

Estación	Latitud S.	Longitud N.	Fuente	Record	Carácter
Pto. Madryn	42° 46' 0"	65° 01' 0"	SMN/ CENPAT	1951/1970 1980/2004	Modular mensual/ Diaria
Pto. Pirámides	42°34' 19,5"	64°16' 37,4"	INTA	1927/1955	Modular mensual
Faro Pta. Delgada	42°45' 51,6"	63° 38' 8,6"	SMN	1942/1968	Modular mensual
Ea. La Adela	42°32' 23,6"	64°17' 26,3"	Particular	1912/2006	Serie mensual
Ea. El Trébol	42°44' 58,6"	63°52' 29,7"	INTA	1957/1977	Modular mensual
Ea. San Jorge	42°37' 26,1"	63°42' 41,1"	Particular	1966/1995	Serie mensual
Ea. El Salitral	42°29' 28,9"	63°58' 53,4"	INTA	1942/1956 1967/1995	Serie mensual
Ea. La Isla	42°25' 52,2"	64°29' 37,4"	INTA	1957/1992	Modular mensual
Ea. La Corona	42°40' 46,2"	63°48' 42,3"	INTA	1958/1980	Serie mensual
Ea. La Pastosa	42°46' 49,2"	63°49' 33,0"	INTA	1942/1956	Serie mensual

Los registros de las estancias San Jorge y La Adela fueron recogidos también por los pobladores y transferidos para la investigación. En ambos casos consistió en información de tipo seriada mensual.

A continuación se procede a la descripción de la variable precipitación comenzando con su distribución espacial de modo de poder apreciar regionalmente el fenómeno.

### 3.1.1.1. Distribución espacial

El mapa (Figura 3.1.1.) muestra la distribución espacial de las precipitaciones medias anuales para el periodo 1979-1992.

Se exponen conjuntamente, la imagen raster de distribución de las lluvias generada con el MapInfo y las isohietas trazadas manualmente con el mismo software. Cabe aclarar que los colores representados en las referencias, corresponden a un valor puntual y no a un

rango, ya que el programa genera una gama de colores entre los ellos para mostrar las cuantías intermedias.

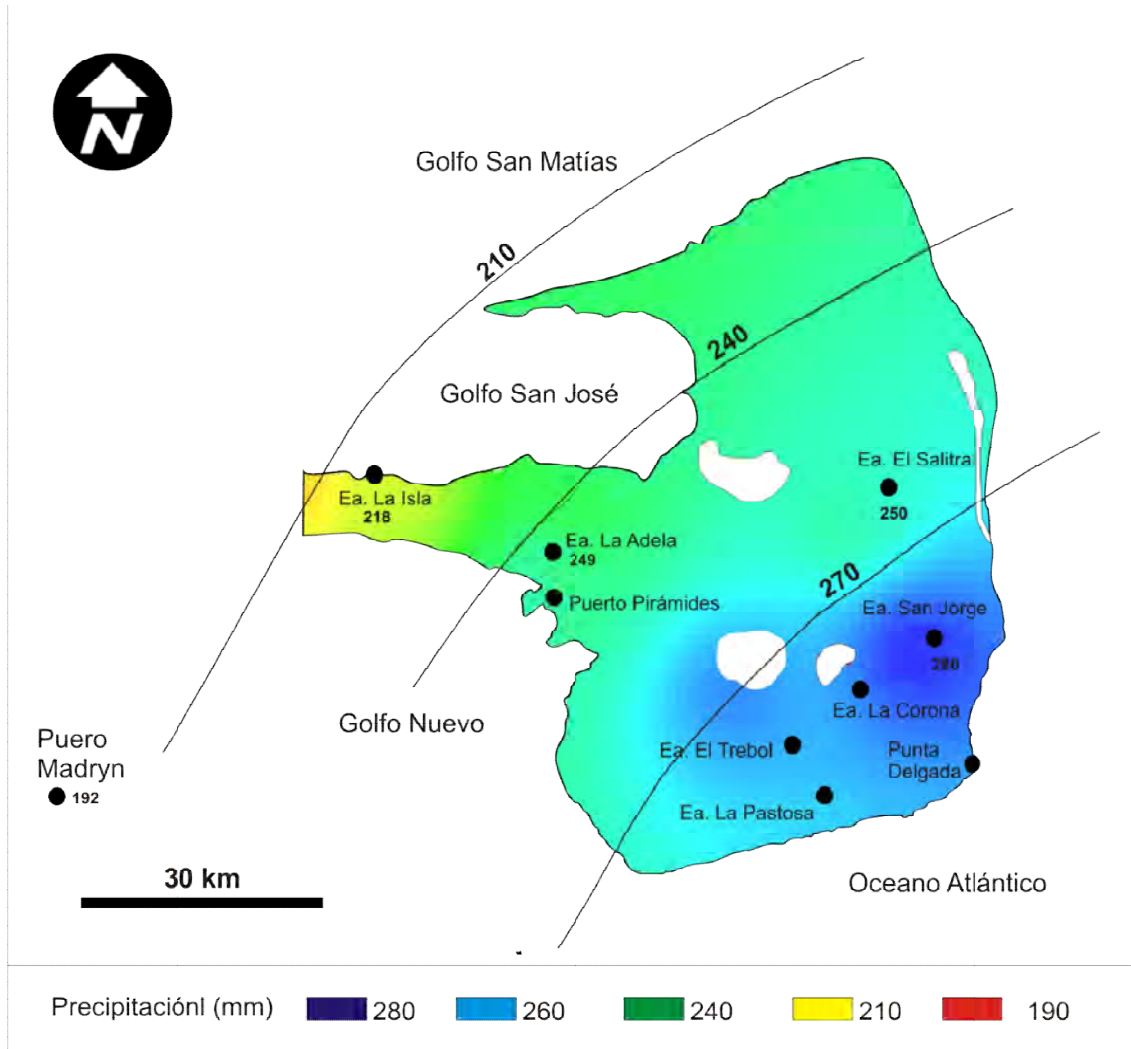


Figura 3.1.1.: Mapa de isohietas

Como se puede apreciar, existe un leve incremento de los registros hacia el sector atlántico, variación que ha sido interpretada (Barros, et al., 1979) como debida a la influencia que los cuerpos de agua adyacentes (océano Atlántico, Golfo Nuevo y Golfo San José) generan sobre la distribución de las precipitaciones.

De esta manera los vientos dominantes del sector Oeste y Sudoeste, se cargan de humedad en su paso sobre los golfos y el océano generándose así un incremento de las lluvias en el área peninsular respecto de los valores registrados en las estaciones ubicadas al oeste de área de estudio.

Si bien se tomó el periodo 1979-1992, cabe aclarar que para los distintos periodos, la estación Puerto Madryn siempre presentó valores promedio de total acumulado menores que las estaciones de la península.

### 3.1.1.2. Análisis de las series pluviométricas

Con los datos pluviométricos de todas las estaciones mostradas en la tabla 3.1.1 se construyeron los pluviogramas individuales que se encuentran en el anexo (Figuras, A.3.1.1, A.3.1.2, A.3.1.3, A.3.1.4., A.3.1.5., A.3.1.6., A.3.1.7., A.3.1.8 y A.3.1.9.), ya que a los fines de caracterizar el fenómeno regional se creyó más conveniente en primer instancia mostrar un pluviograma integrado con todas las estaciones y luego describir en detalle el de una de ellas.

En la Figura 3.1.2 se muestra el pluviograma de todas las estaciones tratadas. Resalta sin lugar a dudas la alta variabilidad interanual de las precipitaciones medias anuales, factor común a todas las estaciones y característico de las regiones áridas. Hay que notar que si bien la fluctuación en las medias anuales es alta, el comportamiento comparativo entre estaciones es relativamente homogéneo.

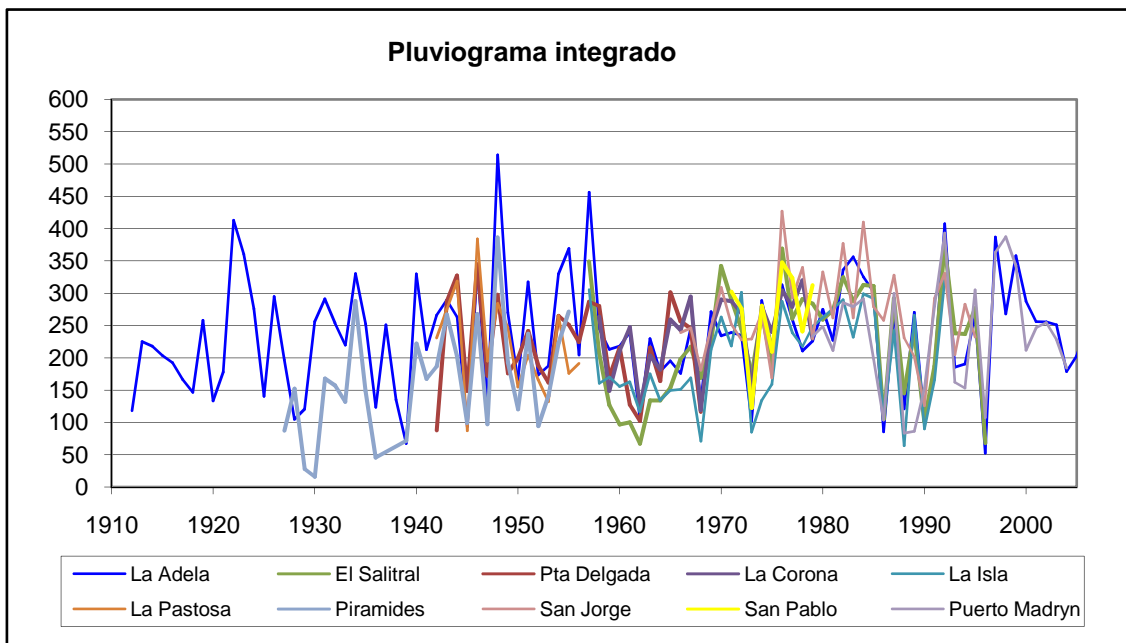


Figura 3.1.2: Pluviograma Integrado

De la grafica se desprende también que la mayor parte de los valores se posiciona en el rango que va de 150 mm/año a 300 mm/año, con mínimos del orden de los 50 mm/año y un máximo excepcional que supera los 500 mm/año.

Como se mencionó, de todas las estaciones pluviométricas tratadas, fue seleccionada la Ea. La Adela para describir el pluviograma individual ya que resultó ser la que mejor cumplió con los requisitos básicos de representatividad, extensión y garantía. Se trata de una estación ubicada dentro de la zona de estudio (Figura 3.1.1), con un registro continuo de 94 años y para cuyos datos se verificó, bajo el análisis de dobles acumulaciones, un nivel de garantía satisfactorio, (Figura 3.1.3).

Cabe aclarar que si bien se muestra el análisis de dobles acumulaciones para la Ea. La Adela, todas las estaciones citadas en la Tabla 3.1.1 cumplieron favorablemente esta condición y sus gráficas se encuentran en el anexo (Figuras A.3.1.10 a la A.3.1.17).

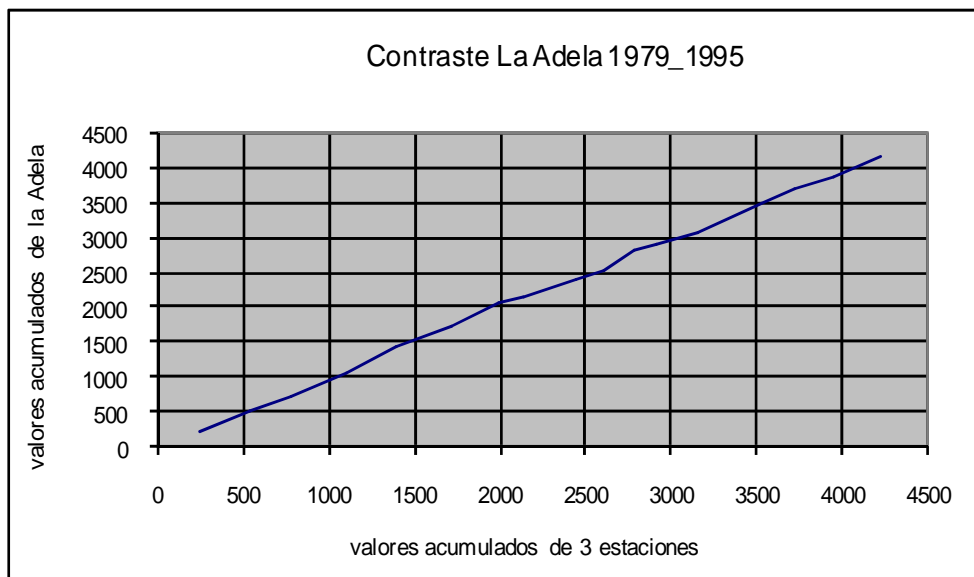


Figura 3.1.3: Gráfica de dobles acumulaciones

Para el período 1912 a 2006 (Tabla 3.1.2), la media anual de precipitaciones se posiciona en 234,4 mm. No obstante existe una gran amplitud en los registros medios anuales, característica reflejada principalmente en los elevados valores respecto de la media local de la desviación estándar, la varianza y el rango. Un caso extremo ocurrió entre los años 1947/1948, donde la variación de un año al siguiente fue de 388 mm (126 y 514 mm respectivamente).

Esta versatilidad en la distribución de las precipitaciones es típica de climas áridos donde un efecto de tormenta puede alterar marcadamente el valor anual esperado.

La franja de valores más frecuentes observable en la grafica se desarrolla entre los 100 mm/año y los 300 mm/año.

Con la intención de suavizar las variaciones puntuales y analizar si existe una tendencia histórica, se incorporó a los pluviogramas la curva de promedios móviles (tomados para 20 años) donde se puede observar (Figura 3.1.4) que no hay una tendencia ascendente o descendente uniforme para todo el periodo sino, que en general se reconocen periodos húmedos o secos alternadamente a lo largo del registro, posicionándose la media móvil por encima de la media normal en los últimos casi 20 años aunque con inclinación descendente hacia el final del período.

Tabla 3.1.2: Estadísticos pluviométricos

<i>Estadísticos La Adela 1912-2006</i>	
Media	234,405579
Error típico	8,91415224
Mediana	235
Moda	218
Desviación estándar	86,8844087
Varianza de la muestra	7548,90047
Curtosis	0,48877779
Coefficiente de asimetría	0,40104253
Rango	461,4
Mínimo	52,6
Máximo	514
Suma	22268,53
Cuenta	95
Nivel de confianza(95,0%)	17,6992578

El análisis de las medias móviles se realizó para todas las estaciones estando sus graficas testificadas en el anexo (Figuras, A.3.1.1, A.3.1.2, A.3.1.3, A.3.1.4., A.3.1.5., A.3.1.6., A.3.1.7., A.3.1.8 y A.3.1.9.) y bajo el mismo formato que el empleado para la estancia La Adela (pluviograma y tendencia móvil en la misma grafica).

Se trata de series que al no superan en ningún caso los 40 años de registro no han permitido calcular medias móviles para pasos veintenales teniendo que recurrir a lapsos de

10 años. En ellas puede apreciarse, al igual que para la serie descrita, que la media móvil se posiciona fluctuante por encima y por debajo de la media sin marcar una tendencia constante, ni dentro de la serie ni en los pequeños periodos coincidentes en el conjunto.

Lo que interesa resaltar de este análisis es la ocurrencia de periodos donde los valores de precipitación se mantuvieron por encima de la media histórica, en los cuales las probabilidades puntuales de infiltración se volverían mayores.

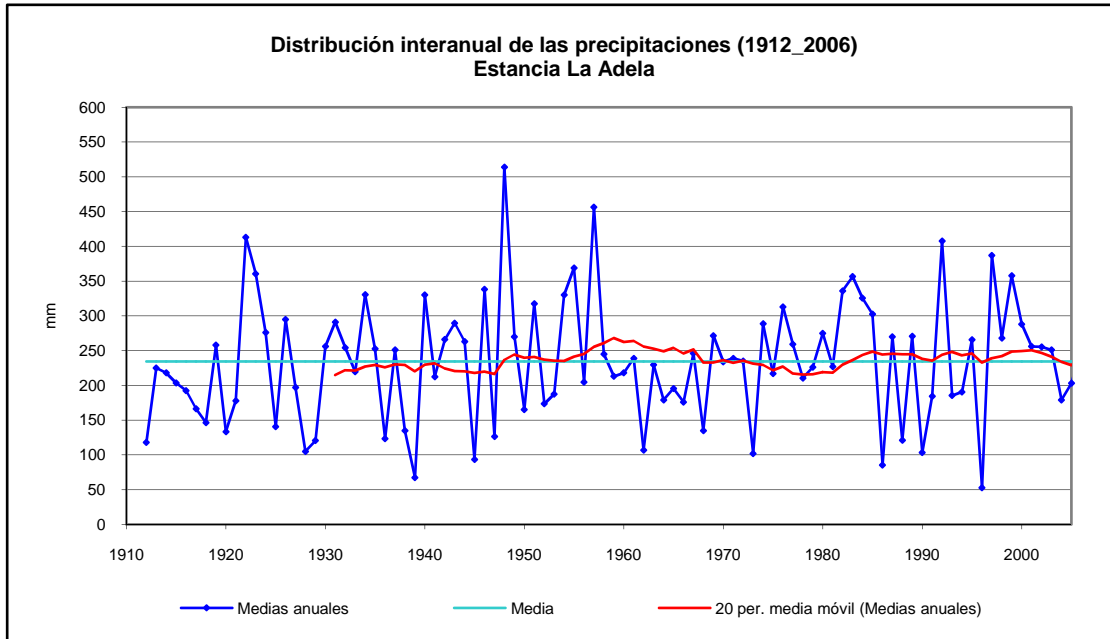


Figura 3.1.4: Pluviograma y tendencias móviles.

Así mismo es importante destacar que los periodos en que las precipitaciones se mantuvieron sobre la media representarían una chance de recarga del acuífero mayor proporcionalmente de lo que representan como extractivos del sistema los periodos por debajo de la media en las zonas altamente permeables y carentes de vegetación (médanos activos), como se verá más adelante cuando se abarquen los procesos de recarga.

De todas formas, es necesario introducir el concepto de precipitación efectiva, aquella que supera el umbral de interceptación vegetal y “mojado” del suelo. Por ejemplo, una precipitación mensual de 20 mm que ocurrió en 20 tormentas de 1 mm cada una no es efectiva. Para Patagonia extrandina y de acuerdo con INTA y Hernández, *et.al.* (2002), estarían en el orden de los 5 mm.

Para superar esta aparente inconsistencia se debería utilizar al interpretar la relación recarga – precipitación, la calificación de lluvias, el registro de precipitación quitando



del cómputo atinente a la recarga aquellos valores que estén por debajo de ese umbral, u otro que lo reemplace pero en general, próximo a la cifra citada para las regiones áridas.

Finalmente se quiere mencionar, en relación a los posibles efectos que el cambio climático podría haber tenido sobre la zona de estudio, que no se evidencia en el registro analizado alguna tendencia marcada.

### 3.1.1.3. Distribución intraanual

Siguiendo la misma lógica empleada para la caracterización de las series anuales, la descripción se ordena en función de los datos de Ea. La Adela (Figura 3.1.5), exponiéndose las graficas de las restantes estaciones en el anexo (Figuras A.3.1.18 a la A.3.1.28).

El análisis de la distribución intraanual se concretó mediante la graficación de las precipitaciones mensuales no solo medias sino también medianas, ya que este es un parámetro de posición que caracteriza mejor que el promedio el régimen de distribución de una localidad. (Scian y Matio, 1975).

Debe recordarse que si se ordenan los datos en forma creciente, la mediana representa aquel valor que divide los datos en dos partes porcentualmente iguales. De esta manera al menos el 50 % de los datos son inferiores o iguales al estadístico. A diferencia de la media muestral no es tan sensible a datos extremos, característica que permite describir mejor la distribución pluvial.

Este comportamiento de media y mediana se clarifica en la Figura 3.1.5 donde si bien no son contradictorios los resultados de una u otra variable para cada mes, es evidente que con la mediana las variaciones son suavizadas permitiendo definir la existencia de una radicación otoño-inviernal de las precipitaciones, con un periodo más lluvioso en el trimestre Mayo – Julio y uno más seco en el trimestre Noviembre- Enero si bien se observa que a partir de Septiembre ya los valores resultan bajos.

Las otras estaciones pluviométricas reflejan en general una distribución similar a la de Ea. La Adela, mostrando en algunos casos las mayores precipitaciones desplazadas levemente hacia los meses de Abril y Mayo.

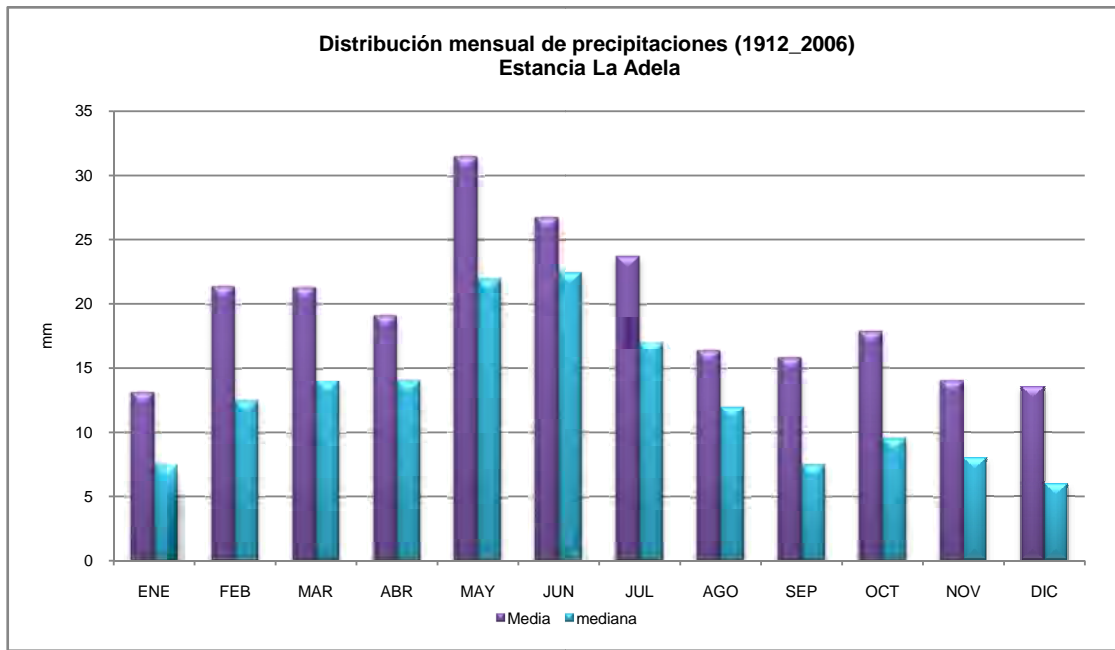


Figura 3.1.5: Distribución intraanual de las precipitaciones

Una vez caracterizada la distribución intraanual, se pretende evidenciar la alta variabilidad que existe entre registros de cada periodo para un mismo mes. El diagrama de Cajas y Bigotes (Figura 3.1.6) expresa justamente esa característica ya que muestra para cada mes el valor medio, la mediana, el segundo y el tercer cuartil y por ultimo algo muy importante para este analisis que son los valores atipicos y los atipicos extremos, tal como se anticipara al tratar la metodología.

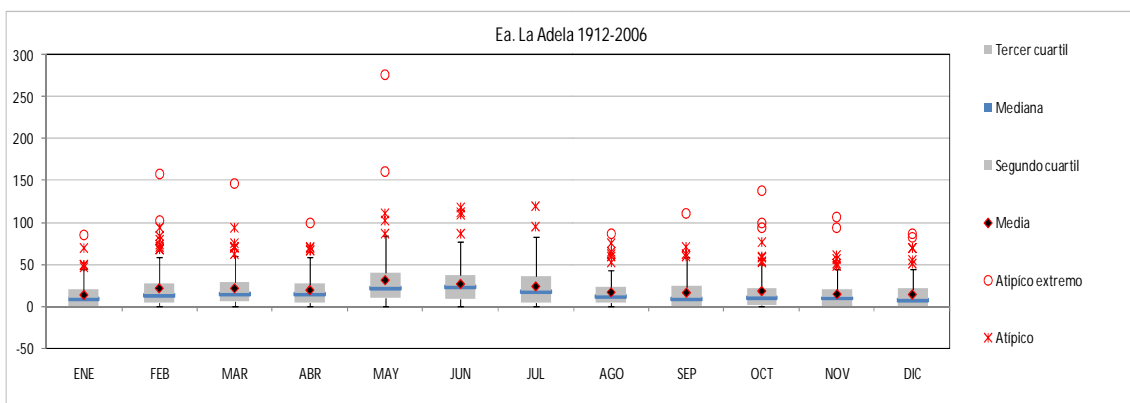


Figura 3.1.6: Diagrama de caja y bigotes. Variación intramensual de las precipitaciones

De la grafica se desprende que:

- existe una alta variabilidad intermensual testificada por los valores atipicos registrado en todos los meses para el periodo analizado.
- Si bien no se han registrado mas de dos valores atípicos extremos en cada mes y en Junio y Julio ninguno, no cabe duda que la fluctación resulta alta.
- Hay registros de valores extremos que se alejan notablemente de la media, tal el caso de los datos de Febrero y Mayo principalmente, siendo el segundo el que denota el caso mas extremo.

En la intención de ejemplificar estas variaciones y teniendo en cuenta la importancia de los eventos de tormenta en el fenómeno de recarga en las zonas áridas, se analizó la recurrencia de precipitaciones mensuales acumuladas de más de 100 mm.

Estos sucesos no exhiben un patrón constante de repetición sino que marcan separación desde 4 meses (año 1948) hasta 24 años.

Pero si se considera el total de eventos en el periodo, emerge una recurrencia de un evento cada casi 10 años.

Así mismo, precipitaciones mensuales acumuladas mayores a 200 mm ofrecen una recurrencia mayor a 94 años, ya que solo aconteció una cuantía de 227 mm para Mayo del año 1948. Estos números no hacen más que confirmar las características heterogéneas de las precipitaciones en el ámbito estudiado.

Al igual que para la distribución interanual, las diferencias existentes entre una estación y otra respecto de la distribución intraanual, se deberían al elevado impacto de los efectos tormenta en los climas áridos, ya que un evento de fuerte precipitación puede generar una variación muy grande en el espacio y en el tiempo de las distribuciones medias. Es por esta razón que se toma la serie más larga de toda la región para la caracterización climática.

### 3.1.2. Temperatura

La consideración de la variable térmica resulta importante no solo para la caracterización climática sino como insumo fundamental para la estimación de la evapotranspiración a partir de formulaciones empíricas que la utilizan.

Los registros de temperatura son mucho más escasos que los de precipitaciones, existiendo solo para la Estación Puerto Madryn una longitud de tiempo considerable de mediciones.

Según esta estación, el valor medio anual es de 13,4 °C, variando entre extremos medidos de 6,4 °C en el mes Julio y 20,4 °C en el mes de Enero.

Como es posible advertir en el termograma de la Figura 3.1.7, las medias mensuales y las máximas y mínimas acompañan el ciclo anual de la temperatura media. El mes de julio tiene la menor temperatura mínima: 1 °C, y el mes de enero la mayor temperatura máxima: 27,5 °C.

Interesa también tener en cuenta los valores térmicos absolutos extremos, que para el período analizado corresponden a una máxima registrada el 18 de febrero de 1987 (40,5 °C), y una mínima de -9,7 °C registrada el 16 de junio de 1995.

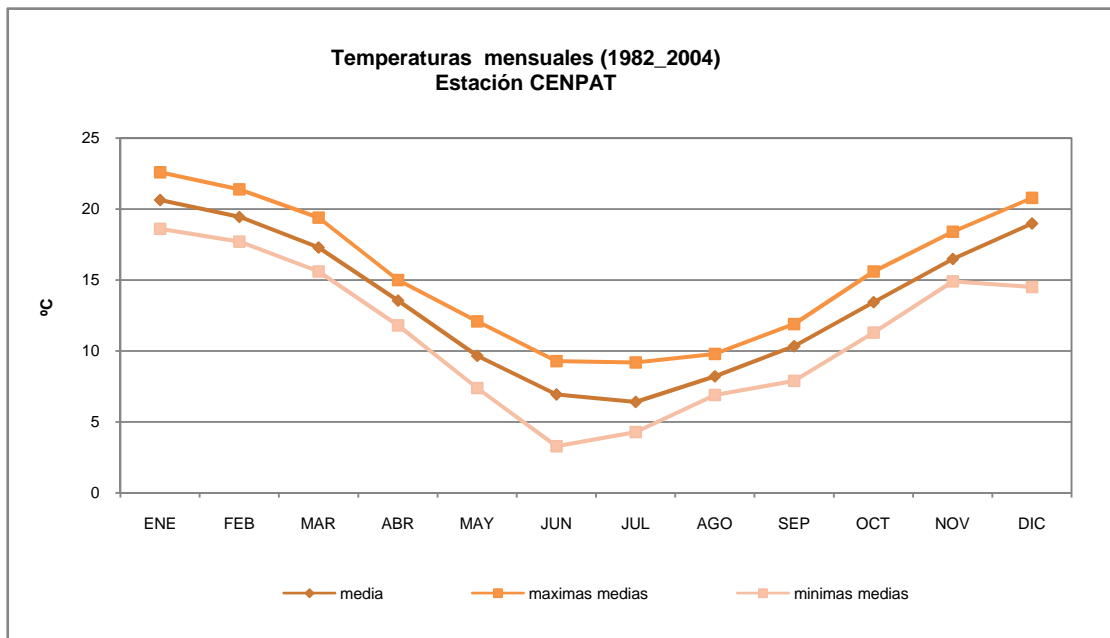


Figura 3.1.7: Termograma CENPAT (1982-2004)

A continuación se muestran en las Figuras 3.1.8 y 3.1.9 los registros térmicos de las estaciones ubicadas dentro del ámbito de la Península.

Puede notarse que las mediciones son muy restringidas en cuanto a los periodos de tiempo que abarcan. No obstante, el comportamiento reflejado en las gráficas es el mismo que para la serie antes descrita.

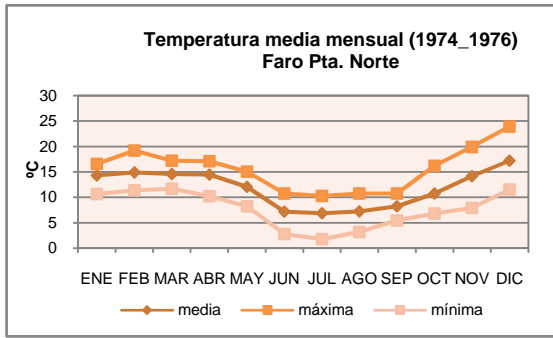


Figura 3.1.8: Termograma. Pta. Norte

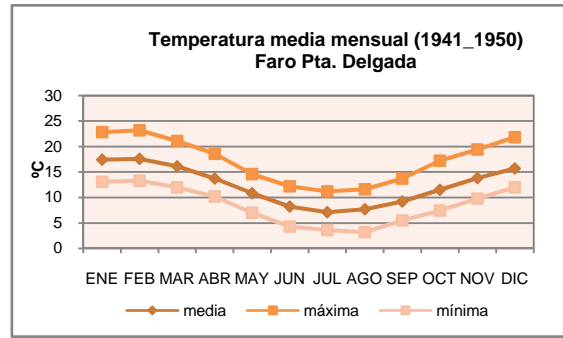


Figura 3.1.9: Termograma Pta. Delgada

Esta similitud entre los distintos termogramas se debe a que Puerto Madryn se encuentra a una latitud próxima con la de la zona de estudio y a que la temperatura es una variable que por su naturaleza es mucho más homogénea que la precipitación. Es por esta razón y porque tiene un registro de tiempo coincidente con el de precipitaciones de la Estancia La Adela, que se utilizaron los datos de temperatura de la estación CENPAT al momento de realizarse el balance hidrológico.

Por último se muestra en la Figura 3.1.10 las temperaturas medias anuales para el lapso 1982-2004 registrado por la estación más arriba mencionada.

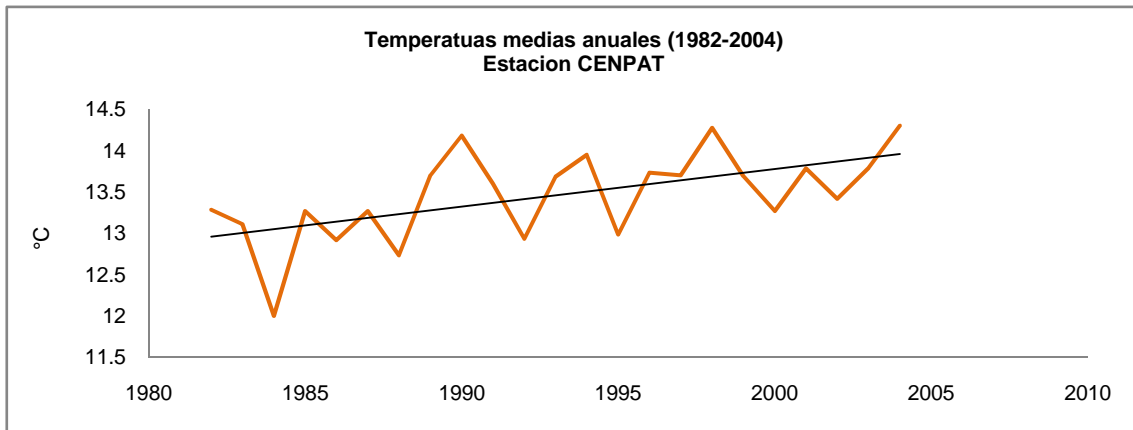


Figura 3.1.10: Temperaturas medias anuales

Se evidencia una tendencia ascendente de la serie y se ha agregado en color negro la línea que expone dicho comportamiento.

### 3.1.3. Viento

La circulación de la atmósfera prevalente en la región está fuertemente influida por la presencia de dos extensos sistemas de alta presión o *anticiclones quasi-estacionarios* ubicados a ambos lados del continente en los océanos Pacífico y Atlántico aproximadamente a los 30°S, y por un cinturón de bajas presiones o *vaguada circumpolar*, localizado aproximadamente en 65°S.

La persistencia de estos sistemas de presión durante todo el año determina una mayor proporción de vientos del Oeste y Sudoeste. Al sur de los 45° S, el flujo medio es marcadamente contraliso. El frecuente cambio de posición de *ciclones y anticiclones migratorios* embebidos en esta corriente dominante, produce fluctuaciones en la dirección e intensidad del viento. (Labraga y Davies, 2008)

Según los datos registrados y analizados por la unidad de investigación de Oceanografía y Meteorología del CENPAT (Labraga, et al.), la velocidad media anual del viento para el período 1982-2002 es de 4,6 m/s (16,6 km/h) con un máximo en diciembre de 5,4 m/s (19,4 km/h) y un mínimo en mayo de 4,1 m/s (14,8 km/h).

Durante todo el año las direcciones dominantes del viento son desde los sectores Sudoeste y Oeste (Figura 3.1.11), totalizando aproximadamente un 38 % en verano y más del 50 % en invierno.

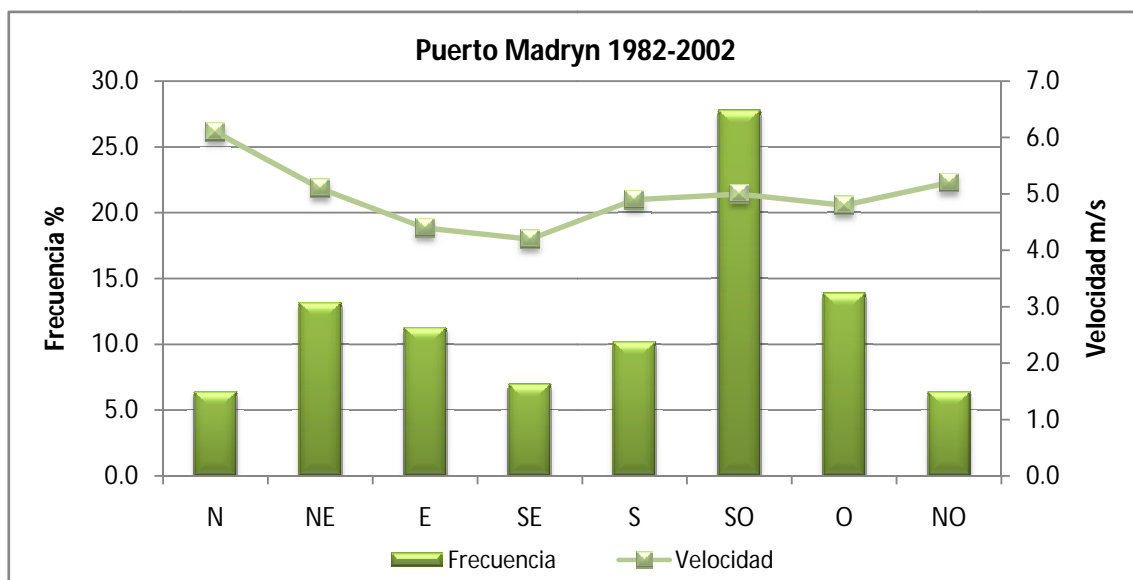


Figura 3.1.11: Velocidad y frecuencia media mensual

En primavera y verano la velocidad media mensual del viento se halla por encima de la media anual. Un estudio del potencial eólico en Puerto Pirámides indica que el promedio anual de velocidad es del orden de 25 km/h (Barros & Rodríguez Seró, 1981).

Esta radicación invernal de las menores velocidades de los vientos tiene particular importancia hidrológica ya que coincide con el periodo del año en el que se producen las mayores precipitaciones, los mínimos de evapotranspiración potencial y los máximos de humedad relativa, lo que genera un impacto positivo en el Balance Hidrogeológico local.

#### 3.1.4. Humedad

Este meteoro es analizado a modo referencial sobre la base de cercanía de la estación meteorológica Puerto Madryn al mar y la probabilidad de algunas diferencias que esto genera respecto de la situación más continental de la zona de estudio, (Figura 3.1.12).

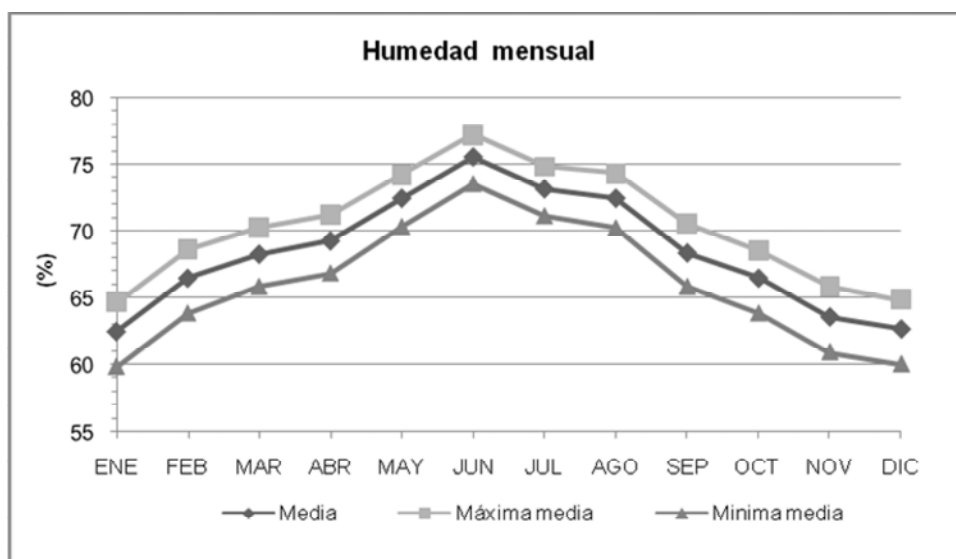


Figura 3.1.12: Humedad media mensual

La estación citada muestra una media anual de 68,4 % y una mensual que varía entre 62,4 % en enero y 75,5 % en junio.

Los valores medios mensuales de la humedad máxima y mínima diaria acompañan el ciclo anual de la humedad media.

El mes de Julio tiene la mayor humedad máxima: 77,2 %, y el mes de Enero la menor de las mínimas: 59,8 %, (Labraga & Davies 2008).

Este comportamiento es el esperado para la región patagónica extrandina, donde los valores de humedad relativa son bajos y su concentración invernal es ayudada por las bajas temperaturas y la menor frecuencia e intensidad de los vientos.

#### 3.1.5. Evapotranspiración

Dado que no existen en la zona mediciones directas de esta variable, y si así lo fuesen serían muy puntuales para la escala, se procedió a estimarla como evapotranspiración potencial bajo el método de Thornthwaite-Mather (1957).

La Evapotranspiración potencial anual estimada por el método mencionado, arrojó un valor de 704 mm/año, estando su distribución intraanual en relación directamente proporcional con la marcha de las temperaturas medias mensuales.

La evaporación real se obtuvo por el mismo método y por tratarse de un clima árido, su monto se corresponde con el de precipitación, 234,4 mm/año, ya que no existe en la práctica humedad disponible en el suelo para satisfacer los requerimientos atmosféricos.

Aunque en los valores logrados de evaporación real, no se tiene en cuenta el viento como factor influyente en el cálculo, es importante resaltar que en un estudio de estimación de la evaporación (Scian & Mattio, 1980) realizado con los datos de la estación INTA Trelew, se vio que no es una variable de peso real en la estimación de este parámetro como suponen otros métodos como el semi-empírico de Penman, en el contexto del balance.

#### 3.1.6. Balance Hídrico

Se reitera aquí que los balances hídricos realizados bajo la metodología Thornthwaite-Mather (1957) no son adecuados para zonas áridas, hecho aclarado por los mismos autores.

No obstante, se ha decidido plantearlo con la finalidad de poder apreciar los déficits hídricos locales y su distribución intraanual, así como también poder obtener índices de evapotranspiración potencial que permitan realizar la clasificación climática.

Bajo estas condiciones se condujeron dos balances hídricos utilizando reservas de agua útil de 25 mm y de 50 mm. Ambos arrojaron los mismos resultados que exponen en la Tabla 3.1.3.



Tabla 3.1.3: Balance hídrico modular 1912-2006 (Thorntwaite-Mather, 1957)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año	
<b>T</b>	20,3	20,37	17,47	15,13	11,2	8,13	6,6	8,2	10,47	13,13	14,17	16,93	<b>13,48</b>	
<b>i</b>	8,34	8,41	6,66	5,33	3,39	2,08	1,52	2,12	3,08	4,3	4,86	6,32	<b>56,41</b>	
<b>ETPd s/a</b>	3,1	3,2	2,5	2	1,3	0,9	0,6	0,9	1,2	1,7	1,9	2,4		
<b>FC</b>	36,6	32,3	32,1	27,6	25,3	22,6	24,6	27,5	30	34,8	36,6	39,5		
<b>ETP</b>	<b>113</b>	<b>103</b>	<b>80</b>	<b>55</b>	<b>33</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>36</b>	<b>59</b>	<b>70</b>	<b>95</b>	704	
<b>P</b>	<b>13</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>20</b>	<b>32</b>	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	232	
<b>P-ETP</b>	-100	-82	-59	-35	-1	6	8	-9	-21	-41	-56	-82	<b>-472</b>	
<b>Ppaa</b>	-320	-402	-461	-496	-497		-11	-20	-41	-82	-138	-220		
<b>Alm</b>	1	1	1	1	1	7	15	10	4	1	1	1		
<b>Valm</b>						6	8	-5	-6	-3				
<b>ETR</b>	<b>13</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>20</b>	<b>32</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	232	
<b>Def</b>	<b>100</b>	<b>82</b>	<b>59</b>	<b>35</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>15</b>	<b>38</b>	<b>56</b>	<b>82</b>	472	
<b>Exc</b>													0	
<i>Precipitación= ETR + Exc : 232=232+0</i>													<i>Def.=ETP - ETR:472=704-232</i>	

Para una evapotranspiración potencial de 704 mm/año, surge un déficit de 472 mm, cuyos máximos corresponden a los meses estivales y los mínimos al periodo Mayo-Agosto, con déficit cero para los meses Junio y Julio.

A juzgar por el resultado del balance, que como se dijo es incorrecto desde el punto de vista estricto por no ajustarse la metodología a zonas áridas, se deduciría erróneamente que no hay ingreso de agua al sistema dado que no hay excesos en ningún mes del año.

Dado que balance expuesto en la Tabla 3.1.3 es un tratamiento modular mensual de las precipitaciones, y con la intención de verificar si se producían variaciones en la distribución de los déficits, se realizó también un balance hídrico de paso diario. Para realizarlo se usó el programa BALSHORT (Carrica 1993).

La estación meteorológica utilizada para realizar este balance fue la de la localidad de Puerto Madryn única en la cual se contaba esa información.

Se calculó para una capacidad de campo de 25 mm, con una reserva inicial igual a cero, textura arenosa y evapotranspiración potencial obtenida bajo el método Thorntwaite-Mather. En la Tabla 3.1.4 se muestran la síntesis anual de los resultados obtenidos.

Analizando los resultados puede apreciarse que la primera diferencia notable respecto del balance modular, es la presencia de excesos en casi todos los años aunque para su cuantía en el análisis temporal debe tenerse en cuenta el concepto de precipitación efectiva.

Tabla 3.1.4: Síntesis anual del balance hídrico diario

Año	Pp	EVTR	Exc
1982	283	163,9	41,9
1983	281	183,6	34,6
1984	295	237,6	57,5
1985	204	135,5	68,6
1986	108	105,9	0
1987	300	193,8	108,4
1988	84	81,8	2,2
1989	90	89,6	0,4
1990	160	132,7	27,3
1991	280	182	97,2
1992	395	211,8	183,8
1993	162	15,3	6,9
1994	154	143,3	10,3
1995	307	229,8	75,9
1996	108	100,3	9,5
1997	366	266,9	97,8
1998	399	141	259,3
1999	346	265,6	80,4
2000	215	180,5	34,6
2001	251	196,1	54,4
<b>PROMEDIO</b>	<b>239 mm</b>	<b>163 mm</b>	<b>63 mm</b>

También resulta un valor anual promedio de exceso, situación que no se generaba en el primer balance mostrado. Esta diferencia radica en la importancia que tienen los eventos de tormenta dentro del fenómeno de recarga que se dan muy esporádicamente y al tomarlos en módulos mensuales quedan ocultos.

En vez, con el balance diario, en los momentos de tormentas se observa cómo se van generando excesos, que sin embargo quedan sometidos al plus posible sobre el umbral de Precipitación efectiva.

Es así como se realizó una segunda corrida del programa ingresando solo aquellas precipitaciones mayores a 5mm y se obteniéndose los siguientes valores medios:

- Precipitación calificada: 185 mm
- Evapotranspiración real: 127 mm
- **Excesos: 58 mm**

Este último dato será retomado al momento de analizar la recarga, así mismo como en el análisis de reservas.

Los balances de paso diario completos se encuentran en el anexo (Tabla A.3.1.29 y A.3.1.30: Balance con el total de las precipitaciones y solo con las calificada respectivamente).

Por último se realizaron dos corridas más con el mismo programa, donde los valores de Evapotranspiración potencial introducidos fueron los calculados según el método de Penman Monteith. En esos casos se obtuvieron valores de excesos de **55 mm** y **50 mm** según el balance fuera realizado con los datos de precipitación o precipitación efectiva respectivamente. Puede apreciarse que los resultados obtenidos se encuentran dentro del orden de aquellos calculados con la evapotranspiración potencial Thornthwaite-Mather.

### 3.1.7. Clasificación Climática

Por su situación geográfica, la península Valdés participa de las características climáticas *áridas* de la Patagonia extrandina, *modificadas localmente* por la interacción entre la atmosfera y la masa oceánica.

El clima local es de tipo Árido, mesotermal con nulo exceso de agua y concentración estival de la eficiencia térmica < 48%: (E B2´d a´) según la clasificación de Thornthwaite (Burgos & Vidal, 1951). Está condicionado por una circulación predo minantemente del Oeste (vientos contralisios) durante la mayor parte del año, que al descargar en la vertiente pacífica de las Cordillera de los Andes, genera una sombra orográfica en la Patagonia extrandina.

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger-Pohl (Geiger y Pohl, 1953), el área de estudio pertenece al tipo climático BWk. (Clima árido con precipitaciones inferiores a 400 mm, siempre con déficit hídrico y temperatura media anual inferior a 18°C).

## 3.2. Geomorfología, Suelos y Vegetación

### 3.2.1. Geomorfología

El objetivo de este apartado se centra en la identificación y mapeo de las principales unidades geomorfológicas (Figura, 3.2.1: Mapa geomorfológico), con el fin de relacionarlas posteriormente al circuito hidrogeológico y a los procesos de recarga-circulación-descarga que caracterizan la zona de estudio.

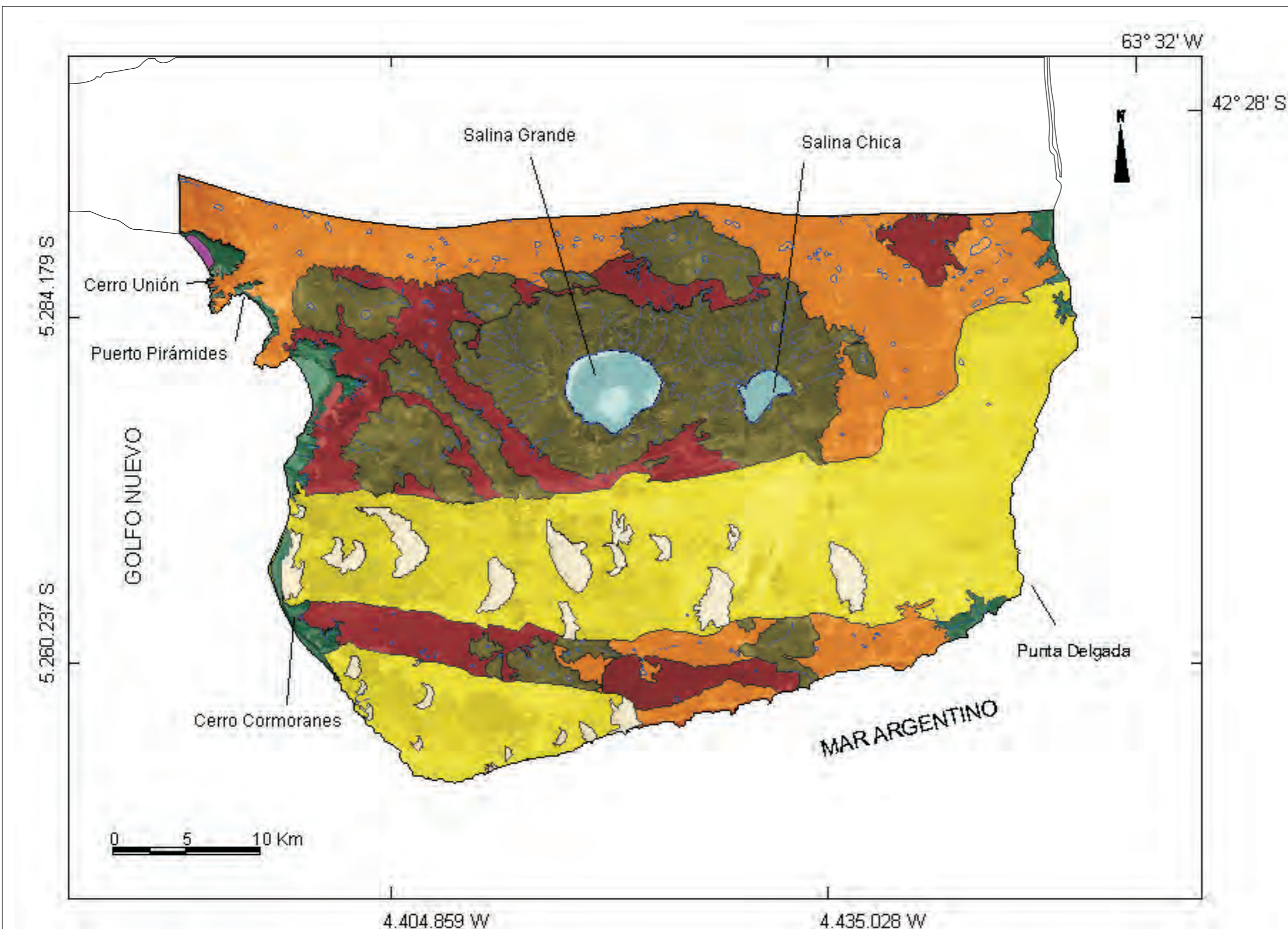


*“Investigación Geohidrológica en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

Ubicación del area de estudio



MAPA GEOMORFÓLOGICO



REFERENCIAS

**Médanos y Mantos arenosos**

- Campos eólicos activos
- Campos eólicos fijos

**Planicies aterrazadas**

- Nivel de terraza II
- Nivel de terraza III

**Depresiones endorreicas**

- Pedimentos convergentes y Bajadas
- Playas

**Zona Costera**

- Formas de erosión
- Formas de acumulación

- Cuerpo de agua efímero
- Curso de de agua efímero

Figura 3.2.1

Las formas analizadas fueron cartografiadas a escala 1:300.000, límite resolutivo fijado por la densidad de información hidrogeológica relevada, y denominadas acorde a la nomenclatura establecida previamente para el área por Súnico (1996).

Bajo esos criterios, se identifican cuatro unidades geomorfológicas mayores:

- Unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos,
- Unidad geomorfológica Planicies aterrazadas,
- Unidad geomorfológica Depresiones endorreicas
- Unidad geomorfológica Zona Costera.

Dentro cada una de ellas se describirán las características morfológicas (extensión y relieve), litológicas, hidrológicas superficiales y se hará mención de los posibles procesos generadores.

La descripción de las unidades se ordenó de manera decreciente en función del área que ocupan, iniciando con la de mayores dimensiones y culminando con la menos representativa.

#### 3.2.1.1. Unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos (MMa)

Integrada por diversas morfologías medanosas que van desde formas simples a complejas, incluyendo tanto a geoformas fijas (vegetadas) como a activas (libres de vegetación). Litológicamente se trata de arenas medianas a finas con escasa participación de la fracción pelítica (Haller, et.al., 2001).

Esta unidad se manifiesta espacialmente al sur de las depresiones de las salinas Grande y Chica disponiéndose a modo de dos importantes franjas arrumbadas en sentido E-W.

La de mayor dimensión (Franja Norte, Figura 3.2.2) ocupa aproximadamente 580 km<sup>2</sup>. Nace al Norte del cerro Cormoranes y se extiende hasta Punta Delgada. La menos extensa (Franja Sur Figura 3.2.2), con unos 110 km<sup>2</sup> lo hace al Sur de aquel accidente, prolongándose hacia el centro meridional. Ambas franjas arenosas están ubicadas al Este del Golfo Nuevo.

Su génesis asociada a procesos eólicos, junto con el posicionamiento a sotavento de la margen oriental del golfo, conducen a asignarle a estos depósitos un origen vinculado

a periodos de mar más bajo, cuando los vientos dominantes del sector Oeste-sudoeste habrían transportado las arenas desde la playa hacia la península.

Debido a la importancia que tiene la presencia o no de vegetación en el análisis de la recarga (evapotranspiración) se ha dividido a esta unidad geomorfológica en dos subunidades: Campos eólicos fijos (vegetados) y Campos eólicos activos (libres de vegetación).



Figura 3.2.2: Características principales de la unidad Médanos y Mantos arenosos

### **Subunidad Campos eólicos fijos**

Está compuesta principalmente por médanos longitudinales y parabólicos entremedio de los cuales se desarrolla un manto arenoso. Esta subunidad abarca más del

90 % de la superficie total de la unidad (Figura 3.2.1). Sus 630 km<sup>2</sup> se hallan estabilizados por medio de una buena cubierta vegetal integrada fundamentalmente por *Hyalis Argentea* (olivillo), *Sporobolus Rigens* (junquillo) y *Stipa Tenuis* (fechilla) que se identifican fácilmente en la imagen satelital gracias a las tonalidades rojizas que manifiestan bajo la combinación de bandas 5-4-2. (Figura 3.2.2).

Las formas medanosas se presentan principalmente a modo de crestas paralelas o subparalelas con dirección aproximada E-W. Este patrón respondería, en su gran mayoría, al anclado sucesivo de los brazos de médanos parabólicos durante su avance. Constituyen de esta forma un patrón originado en condiciones ambientales que rigieron en el pasado y representan la unidad estratigráfica de origen eólico más antigua del cuaternario de la zona (Súnico 1996).

### **Subunidad Campos eólicos activos**

Sumamente importantes desde el punto de vista hidrogeológico, debido a las posibilidades de recarga efectiva que representan, cubren solo 60 km<sup>2</sup> del total del área medanosa. (Figura 3.2.2).

Son geoformas prácticamente libres de vegetación que responden a un rejuvenecimiento del campo eólico antiguo, donde el proceso dominante parece haber sido el desarrollo de numerosos “blowouts” (Súnico, 1996). De morfología relativamente compleja, se presentan como megaparches de dunas activas (Del Valle, et. al, 2008), con dimensiones máximas del orden de 5 km de diámetro por 2 km de frente de avance, dentro de los cuales los mencionados autores han identificado cuatro tipos principales: lineares compuestas, transversales compuestas, en forma de domo compuestas y en forma de domo complejas. Subordinadamente se encuentran dunas parabólicas, crestas barjanoides y mantos de arenas. Se registraron para los megaparches, velocidades de migración del orden de 9m/año (Del Valle, et.al. 2008).

Ambas subunidades carecen totalmente de patrón de drenaje tanto actual como pretérito.

#### **3.2.1.2. Unidad geomorfológica Planicies aterrazadas (Pa)**

Rasgo característico de la Patagonia extrandina en general, también denominado Niveles Gradacionales Terrazados (Cesari, et.al, 1986), ocupan en el ámbito de la zona de estudio 570 km<sup>2</sup>. (Figura 3.2.1). Se trata de un paisaje con morfología plana a cóncava, de

pendientes suaves que oscilan entre valores de 1 % a 2 %, interrumpido en forma asilada por pequeños cerros de baja altura. Algunos ejemplos de estos remanentes de erosión diferencial son el cerro Unión (109 m s.n.m) y el cerro Cormoranes (106 m s.n.m).

Dentro de la zona de estudio, estas planicies se hallan labradas sobre los sedimentos marinos de la *Formación Puerto Madryn*. Están cubiertas por depósitos plio-pleistocenos de los *Rodados Patagónicos* a diferencia de una estrecha franja de sentido latitudinal ubicada en el sector Sur, revestida por un manto eólico cuaternario, y a los sectores más elevados del área.

Dentro de esta unidad, desarrollada en un plano topográfico inferior a las grandes planicies patagónicas, se reconocen tres niveles de terraza para toda la Península Valdés. Sólo los dos inferiores se encuentran dentro del área de estudio, constituyendo las subunidades que se describen a continuación, (Figura 3.2.3).

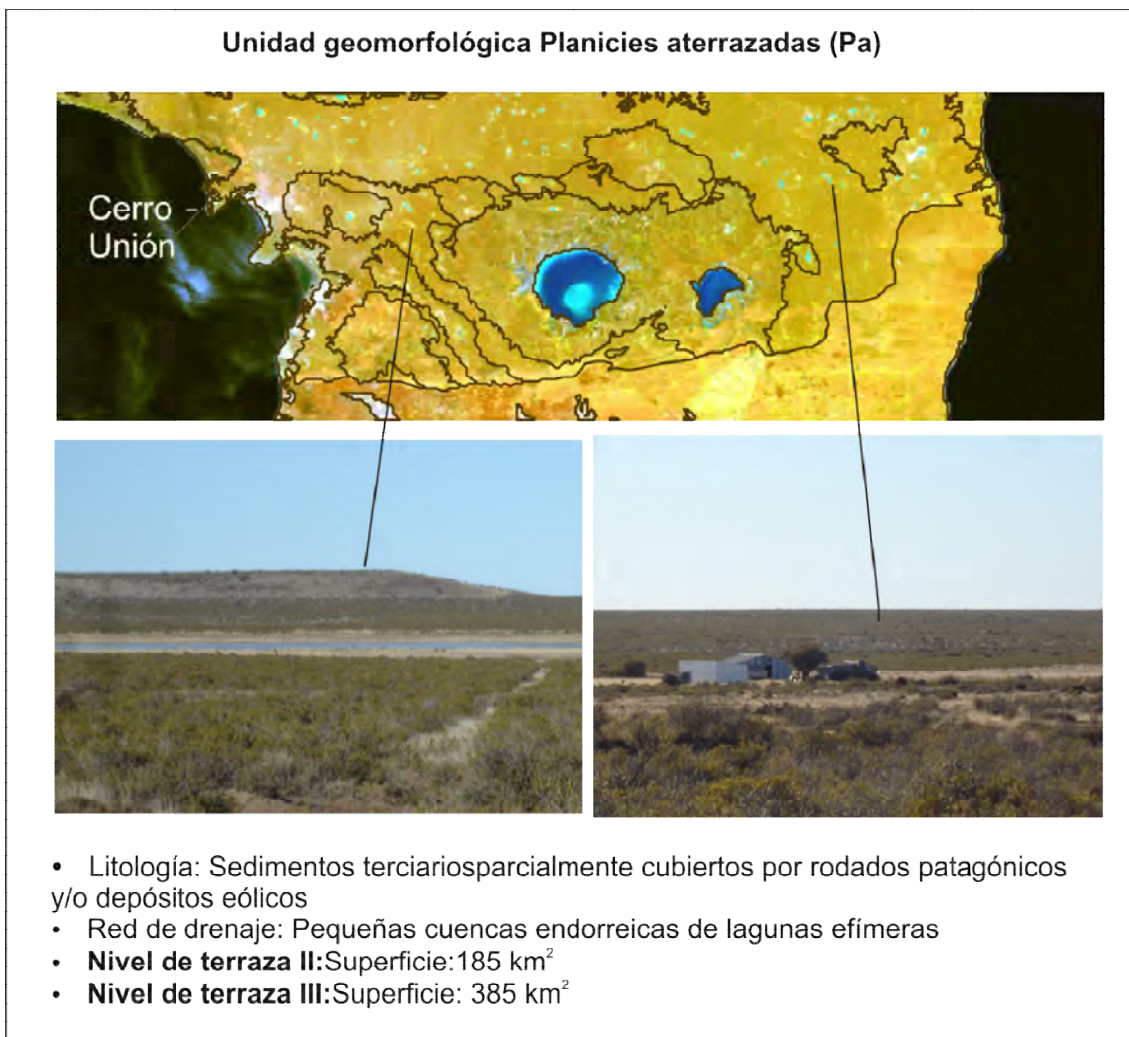


Figura 3.2.3: Características principales de la unidad Planicies aterrazadas



### **Subunidad Nivel de terraza II**

Posicionado entre los 70 y 80 m.s.n.m, se halla distribuido principalmente en el sector suroccidental. Su expansión se encuentra discontinuada por la presencia de dos grandes bajos (salinas Grande y Chica), numerosas depresiones menores, y la unidad geomorfológica MMA. (Figura 3.2.3)

### **Subunidad Nivel de terraza III**

Altitudinalmente comprendido entre las cotas de 50 y 70 m s.n.m. se desarrolla de manera continua sobre el sector Norte y Noreste del área (Figura 3.2.3). Otro asomo de esta subunidad se presenta en las cercanías de la costa atlántica al Sur de la franja medanosa Norte.

Ambas subunidades se caracterizan por incluir numerosas cuencas endorreicas, que debido a las características climáticas imperantes en la región muestran en su interior pequeños cuerpos lacustres de régimen transitorio, (Figura 3.2.1).

#### **3.2.1.3. Unidad geomorfológica Depresiones endorreicas (De)**

Existen dos tipos de Depresiones endorreicas, las pequeñas, poco profundas con forma elíptica y, las de grandes dimensiones, más profundas con morfología irregular.

Los pequeños bajos se encuentran distribuidos por toda la península y están labrados sobre los distintos niveles de terraza, desarrollados a partir de la erosión de los rodados y en parte de los sedimentos terciarios. Muestran pendientes suaves y un diseño de drenaje centrípeto que en su interior da lugar a cuerpos de agua efímeros (Figura 3.2.1). En base a sus dimensiones y morfología se le asigna una posible génesis eólica.

Entre las depresiones de mayor magnitud existen dos bien notables caracterizadas fundamentalmente por presentar grandes playas salinas en su interior (salinas Grande y Chicas) y alcanzar en su lecho cotas topográficas por debajo del nivel del mar.

Ambas forman parte de una gran depresión elongada en sentido E-W y se hallan separadas entre sí por una divisoria constituida de sedimentos terciarios y rodados patagónicos. Son cuencas netamente endorreicas de funcionamiento independiente, con redes de drenaje típicamente centrípetas conformadas por numerosos cursos transitorios.

La cota topográfica del lecho de la Salina Grande es - 42 m s.n.m. y la Salina Chica - 12 m s.n. m. El borde de la depresión que las engloba se ubica a unos 70 m s.n.m., generándose así un desnivel entre el borde y el fondo de hasta 112 m.

Las principales subunidades geomorfológicas reconocidas en estas depresiones o geoformas mayores son, los pedimentos convergentes y bajadas (no diferenciables a la escala de mapeo) y las playas, (Figura 3.2.4).



Figura 3.2.4: Características principales de la unidad Depresiones endorreicas

### **Subunidad pedimentos convergentes y bajadas**

Los pedimentos convergentes son las superficies de erosión, producto de fenómenos de remoción en masa y acción fluvial sobre los sedimentos terciarios y

cuaternarios, que conforman las laderas de los dos grandes bajos. Existe más de un nivel de pedimentación, lo cual refleja una reactivación de la erosión generada por variaciones en el nivel de base, cuyo origen puede deberse tanto a causas climáticas como tectónicas (Alvarez, et. al 2006a).

La litología presente en las márgenes de las depresiones (arena, rodados y limos) facilita el desarrollo de material detrítico aluvional el cual se deposita al pie de las superficies de pedimentación. Este rasgo de acumulación da origen a las bajadas, cuya distribución no es uniforme en todo el contorno de los cuerpos salinos, ya que en muchos sectores es muy reducida o aparece a modo de parches.

### **Subunidad playas**

Las playas constituyen las zonas más deprimidas, son áreas de relieve plano-cóncavo litológicamente compuestas por sedimentos finos (limos, limos arcillosos, arcillas) y evaporitas. En ellas yacen cuerpos de agua con elevado contenido salino proveniente del lavado superficial y subterráneo de los sedimentos marinos terciarios, de la evolución hidroquímica por recorrido de las aguas subterráneas y de la evaporación “*in situ*”. Son lagunas temporarias cubiertas por una delgada capa salina de espesor variable, por debajo de la cual se ha desarrollado un ambiente anóxico y fangoso (Brodtkorb, 1999).

A estas grandes depresiones se le asigna en función de sus grandes dimensiones y profundidades, de su morfología irregular y de la presencia de subunidades que responden a distintos cambios del nivel de base, un probable origen mixto (tectónico + remoción en masa + eólico).

#### 3.2.1.4. Unidad geomorfológica Zona Costera (ZC)

Extendida a modo de una delgada franja paralela al contorno litoral de área, esta unidad se subdivide en función del proceso dominante, en dos subunidades menores: Formas de erosión y Formas de acumulación.

### **Subunidad Formas de erosión**

Caracteriza el contorno de la península una escarpa de erosión representada por superficies de pedimentación, paleoacantilados, acantilados activos y plataformas de erosión de olas. Estas geoformas aparecen labradas sobre sedimentitas Terciarias y depósitos Cuaternarios.

Se mapean únicamente las superficies de pedimentación (dado que la escala no permite mayor detalle), las cuales suelen presentarse asociadas bajadas conformadas por depósitos aluviales y coluviales, (Haller, et.al, 2001). Representan un área de 47km<sup>2</sup> (Figura 3.2.1) y muestran una red de drenaje efímera de morfología dendrítica a subparalela.

El origen de la subunidad se atribuye a una combinación de procesos de remoción en masa, acción fluvial y acción de olas.



Figura 3.2.5: Características principales de la unidad Zona costera

### **Subunidad Formas de acumulación**

Corresponden a esta subunidad pequeñas geoformas constituidas por depósitos de playa y cordones litorales ubicados topográficamente por encima de los 8 m snm. Están

esparcidas a lo largo de la costa del Golfo Nuevo a modo de pequeños asomos que no superan los 2 km<sup>2</sup>. (Figura 3.2.5)

Litológicamente están caracterizados por gravas medianas a gruesas, arenas gruesas y fragmentos de conchillas correspondientes a la *Fm. San Miguel* (Haller, *et.al*, 2001). Consecuentemente con la alta permeabilidad de los materiales que la componen, esta unidad no manifiesta ningún sistema de drenaje.

La génesis de estos depósitos se asocia a un ambiente de playa de alta a mediana energía, sometidos a la acción de olas. (Haller, *et.al*, 2001).

A modo de resumen se plantean los principales rasgos geomorfológicos definidos, con el propósito de retomarlos durante el análisis del circuito hidrodinámico del área. Estos son:

- Dos franjas de Médanos y Mantos arenosos de dirección E-W desarrolladas sobre el sector Sur cubriendo tanto a las planicies aterrazadas como a los bajos. Registran indistintamente médanos o mantos eólicos que pueden estar fijos (vegetados) o activos (desnudos).
- Un sistema de Planicies aterrazadas, de relieve plano-cóncavo correlacionable con el que caracteriza a gran parte de la patagonia extraandina, pero de cota topográfica baja. Labradas sobre los sedimentos terciarios, cubiertas casi en su totalidad por rodados patagónicos e interrumpidas por la presencia de bajos endorreicos.
- Depresiones endorreicas pequeñas de origen eólico y grandes de origen mixto (tectónico + erosión). Ejemplos de estas últimas son los bajos de las Salinas Grande y Chica, diferenciables por contener cuerpos de agua salinos transitorios y alcanzar valores topográficos por debajo del nivel del mar.
- Una Zona Costera donde dominan los procesos erosivos sobre los de acumulación, manifestados principalmente por acantilados activos y superficies pedimentadas.

### 3.2.2. Suelos y vegetación

Habiéndose referido la descripción climática y geomorfológica del área, se introduce a continuación la descripción de los suelos y su vegetación asociada, ambos íntimamente relacionados con los dos tópicos arriba mencionados y dependientes, por supuesto, del material parental.

Si bien ambos temas están desarrollados principalmente a partir de la síntesis de material antecedente, se decide incorporarlos dentro del capítulo resultados a fin de mantener una continuidad en la descripción del medio físico.

Al final se dedicará una parte a la mención de las principales especies vegetales y sus adaptaciones al régimen climático, dada la implicancia que ello tiene dentro del ciclo hidrológico.

### 3.2.2.1 Suelos

Los suelos de la Península Valdés, fueron clasificados, a escala 1:250.000, dentro de 7 unidades cartográficas por Rostagno (1981), de las cuales 6 se encuentran en la zona de estudio.

No obstante esta división, se los puede reunir en dos grandes grupos según la clasificación Soil Taxonomy (1979) (FAO, 2008):

- Aridisoles, suelos de climas áridos, ya sean fríos o cálidos que no disponen durante largos períodos de agua suficiente para el crecimiento vegetal y se caracterizan por un horizonte superficial claro y pobre en materia orgánica, por debajo del cual puede aparecer una gran variedad de caracteres morfológicos de acuerdo a las condiciones y a los materiales a partir de los que se han desarrollado. Se asocian con una vegetación xerófila y escasa densidad de cobertura.

- Entisoles, suelos jóvenes que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. Normalmente no se presentan horizontes diagnósticos debido en gran parte al escaso tiempo transcurrido desde la acumulación de los materiales parentales. Se desarrollan bajo distintos regímenes de humedad, temperatura, vegetación, materiales parentales y edad, siendo los únicos rasgos comunes a todos los suelos de este Orden la ausencia virtual de horizontes y su naturaleza mineral.

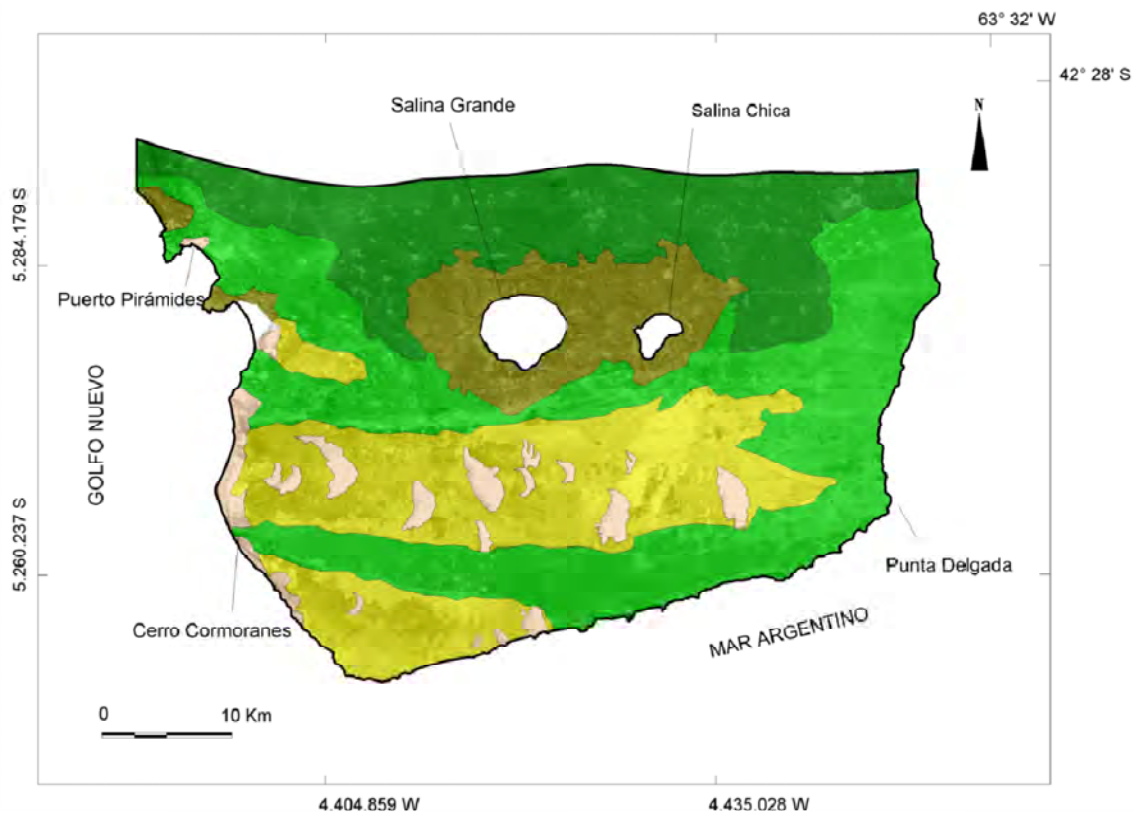
A continuación se hará una síntesis de lo analizado por el mencionado autor, considerando sólo a los suelos dominantes, a fin de ubicar las grandes unidades edáficas (Figura 3.2.6) y haciendo mención conjuntamente al principal tipo de vegetación asociado, ya que depende directamente del tipo de suelo y del régimen de humedad del sitio.

**Unidad Natrargides Xerólicas (Estepa Arbustiva)**

Si bien es la de mayor superficie en el ámbito de la Península no lo es tanto en el área de estudio específica, donde cubre el sector al Norte de las salinas Grande y Chica y central del Istmo Ameghino.

Los suelos dominantes (*Natrargides*), están caracterizados por un horizonte argílico y el complejo absorbente dominado por el ion sodio, siendo ligeramente salinos en superficie a salinos en profundidad. La pérdida de estructura por hinchamiento de arcillas sódicas afecta la permeabilidad de estos suelos.

Se asocian a estos los *Calciorthides*, suelos de perfil AC localizados en las partes convexas del microrelieve.



	Natrargides Xerólicas	Aridisoles
	Calciorthides Xerólicas, Torripsamentos Xéricos	
	Torripsamentos Tipicos	Entisoles
	Torripsamentos Xéricos	
	Sin desarrollo de suelo (médano activo)	

Figura 3.2.6: Mapa de suelos. (Modificado de Rostagno 1981)

La baja velocidad de infiltración de estos suelos, que no alcanza a absorber las precipitaciones en algunos casos torrenciales, favorecen el escurrimiento superficial y la erosión laminar, proceso identificado por una cubierta de rodados que se forma sobre el suelo desnudo a medida que se va perdiendo el material fino.

***Unidad Calciorthides Xerólicos/ Torripsamentes Xéricos. (Estepa Arbustiva, Estepa Herbácea)***

Se extiende al Sur de la Península desde la costa occidental hasta la oriental. Aquí la depositación eólica actual ha afectado gran parte de la unidad, sin llegar a formarse médanos.

En el sector Oeste es similar a la unidad anterior sumándose, en los sectores más afectados por la depositación eólica, los suelos de textura arenosa sin horizonte cálcico, (*Torripsamentes*).

Hacia el Este, la estepa arbustiva va dando paso gradualmente a un pastizal en relación a la mayor influencia de los depósitos de arena.

Los suelos dominantes son los *Calciorthides Xerolicos*, suelos de textura arenosa, con un horizonte cálcico en profundidad y un horizonte superior consolidado, que los hace bastante estables a la erosión. Se encuentran libres de sales solubles y de carbonatos hasta los 70-80 cm.

Poseen a su vez una baja capacidad de campo, permitiendo así que el agua profundice en ellos, quedando de esta manera con menor exposición a la evaporación y con mayor posibilidad de infiltración rápida.

***Unidad Torripsamentes Xéricos (Estepa Herbácea)***

Se extiende en franjas hacia el SW de la Península, tratándose de depositaciones eólicas estabilizadas por un tapiz de vegetación herbácea.

En íntima relación con esta unidad, pero mapeados separadamente, se encuentra el conjunto de médanos activos que avanzan desde la costa y otros que tienen su origen en las arenas fijas por deterioro de la cubierta vegetal.

El carácter arenoso-suelto de los suelos de esta unidad los hacen altamente vulnerables a la erosión eólica, originando pequeños frentes de médanos.



Si bien esto confiere a los suelos una desventaja desde el punto de vista de la susceptibilidad a la erosión, la alta permeabilidad ligada a los mismos actúa a favor de una rápida velocidad de infiltración, siendo prácticamente nulas las aguas de escorrentía superficial, además de estar libres de sales, por lo que constituyen un buen sustrato para la vegetación desde el punto de vista de la economía del agua, dentro de los suelos de régimen arídico.

### **Unidad Torripsamentes Típicos**

Donde directamente afloran los sedimentos terciarios (depresiones de las salinas Grande y Chica y acantilados costeros) no se alcanzan a desarrollar suelos y la vegetación es muy rala o a veces nula. Pero a medida que la pendiente disminuye y el manto de material aluvial se hace más potente, se desarrollan los *Torripsamentes típicos*.

El material originario es un factor que afecta las propiedades de estos suelos de una manera muy marcada. Debido al escaso volumen de las precipitaciones el lavado de las sales es mínimo, lo que hace que hereden las características de los materiales parentales (sedimentos marinos) y se forme un horizonte salino a distintas profundidades.

#### 3.2.2.2 Vegetación

La principal característica de la vegetación es su carácter xerófito y bajo porcentaje de cobertura, fluctuante entre 0 % en la zona de los médanos activos y partes empinadas de los bajos y acantilados, hasta cerca de 80 % en los sitios más favorables.

Dentro del área de estudio, se describieron como tipos de vegetación dominantes (Bertiller, et al., 1980):

- Estepas arbustivas- Herbácea de *Chuquiraga avellanadae* y *Stipa tenuis*, ubicada en las áreas de Planicies aterrazadas. Junto con las especies que caracterizan la clase se pueden mencionar secundariamente a otras como *Schinus polygamus*, *Lycium chilense*, *Piptochaetium napostaense*, *Poa Ligularis*.

- Estepas arbustivas de *Chuquiraga hystrix* y *Chuquiraga avellanadae*. Localizadas en las depresiones de las salinas Grande y Chica y en las zonas costeras. Se encuentran acompañadas, entre otras especies, por *Brachy cladus megalanthus*, *Hoffmanseggia trifoliata*, *Stipa speciosa*, *Stipa humilis*, *Prosopidastrum globosum* y *Condalia microphylla*.

- Estepa herbácea de *Piptochaetium napostaense*, *Stipa tenuis* y *Plántago patagónica*. Se desarrolla entre las franjas medanosas y asocia a estepas arbustivas. Como especies acompañantes se encuentran entre otras a *Chuquiraga avellanadae*, *Paronychia chilensis* y *Bromus uniloides*.

- Estepas herbáceas de *Sporobolus rigens* y *Stipa tenuis*. Su manifestación se relaciona directamente a la unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos. Subordinadamente es posible hallar a *Piptochaetium napostaense*, *Panicum urvilleanum* y *Poa lanuginosa*.

- Estepas subarbustivas de *Hyalis argénte*a. Se desarrollan sobre los suelos arenosos (*Torrripsamentes xéricos*) del sector Sur y se presentan vinculados a las Estepas herbáceas de *Sporobolus rigens* y *Stipa tenuis*.

Es importante destacar que todas estas especies presentan adaptaciones al clima árido, tales como la presencia de pelos, espinas, reducción del tamaño foliar, tallos fotosintetizantes y reducción de estomas entre otras, tema que será retomado en el análisis del circuito hidrodinámico al tratar los mecanismos de recarga.

### 3.3. Geología

Esta temática será abordada principalmente desde el punto de vista litológico puesto que en ese sentido es que se la incorporará al momento de definir la hidrolitología de la zona de estudio.

#### 3.3.1. Geología de Subsuelo

La zona de estudio se enmarca dentro de la denominada Cuenca de Valdés, localizada entre los 42° y 43° de latitud sur y entre los 62° y 64° de longitud oeste con una superficie aproximada de 19.000 km<sup>2</sup> (Urien, *et al.* 1981).

El objetivo de esta sección es mostrar las características generales del relleno de la cuenca sin entrar en mayores detalles dado que el estudio se focaliza en el acuífero freático y este ocupa solo los términos más superficiales de la columna.

La información de subsuelo proviene fundamentalmente de perforaciones ejecutadas en el área. Debido a la escasa prospección realizada en esta región, la información directamente relacionada con la potencia y la litología de los estratos integrantes -principalmente los pertenecientes al Paleozoico y Mesozoico- es relativamente pobre.

No obstante se posee la valiosa información procedente del pozo YPF PV Ch es-1 desarrollado en la zona de Punta Delgada y los análisis realizados a partir de sus testigos por Masiuk, *et.al.* (1976), Bianchi (1984) y Carames, *et.al.* (2004), como así también el estudio geofísico realizado por Kostadinoff (1992).

Las perforaciones de exploración realizadas específicamente en el marco de la Tesis, descritas en el acápite hidrogeología, junto con las observaciones de campo permitieron componer sobre la base de los antecedentes, el esquema geológico local, referido fundamentalmente a los terrenos terciarios y cuaternarios, por las razones ya mencionadas.

Desde el punto de vista estructural, su génesis queda involucrada en el contexto de las cuencas perimetrales al Macizo Nordpatagónico y al “Positivo Bonaerense”, afectadas por esfuerzos de cizalla con participación de fallas de rumbo. Estas fracturas fueron reactivadas en función del tiempo o bien se originaron durante las primeras dislocaciones gondwánicas y posterior deriva continental (fines del Jurásico y Cretácico), que imprimieron a los valles las características de fosas o valles rift fisurales (Bianchi, 1984).

La columna geológica de la Cuenca de Valdés según datos de subsuelo estaría integrada, de abajo hacia arriba, por:

1) Devónico: areniscas diagenizadas y pelitas de aproximadamente 800 metros de espesor. Estos sedimentos se consideran coetáneos con los del Grupo Sierra Grande;

2) Pérmico Tardío – Jurásico Temprano: intrusiones de cuerpos plutónicos, coladas y horizontes de composición piroclástica;

3) Jurásico: lutitas negras correlacionables con sedimentitas de la cuenca del Golfo San Jorge asignadas al Jurásico Tardío. Los contactos infra y suprayacentes se desconocen;

4) Cretácico: alternancia de pelitas, areniscas rojizas y tobas de unos 1500 metros de espesor, asignadas al Cretácico Tardío. Estos depósitos serían correlacionables con los de la Formación El Fuerte (Cuenca del Colorado);

5) Paleoceno-Mioceno: pelitas y areniscas finas. Son comunes, principalmente en los niveles más basales, los bancos conglomerádicos y los niveles de calizas y glauconitas. (Palazzesi, 2008) Este intervalo (Paleoceno-Mioceno) ha sido caracterizado en cuatro tramos principales en base a diferencias micropaleontológicas (Masiuk, *et.al.* 1976). Los dos superiores (porción superior del tramo 350-630 mbbp y tramo comprendido entre 55-350

mbbp) serían correlacionables con las formaciones *Gaiman* y *Puerto Madryn* respectivamente, aflorantes en el área.

### 3.3.2. Geología de Superficie

Si bien existen diversos trabajos de índole geológica en la región, no se pretende en este trabajo entrar en un detalle mayor al alcanzado en la hoja geológica ya que la escala de la investigación no lo requiere y sería abundar en una información poco útil al momento de integrarla a los conceptos hidrogeológicos.

Considerando que la hoja geológica es en sí misma un trabajo de síntesis y elaboración de la información precedente, a la cual al momento de la elaboración sus autores incorporaron investigaciones propias, se ha decidido tomarla como punto de referencia y de partida para la descripción de la geología del sector (Figura 3.3.1: Mapa geológico), complementada con las observaciones de campo, tal como se adelantara en el ítem metodológico.

Por otra parte, las mayores discusiones y disquisiciones que se han venido sucediendo están principalmente relacionadas al contenido fosilífero, la edad y la nomenclatura estratigráfica asignada a las formaciones terciarias que no es el eje que se pretende seguir en este tema.

En líneas generales, los autores de los trabajos más antiguos tendieron a definir unidades con sentido cronoestratigráfico, utilizando términos como “Patagoniense”, “Entrerriense” y “Rionegrense. Posteriormente la tendencia fue definir unidades litoestratigráficas, en el marco del Código Argentino de Estratigrafía (Comité Argetino de Estratigrafía, 1992), de donde surgió la nomenclatura de *Formación Gaiman* y *Formación Puerto Madryn*.

#### 3.3.2.1. Estratigrafía

##### **Cenozoico- Neógeno**

La geología aflorante de la península Valdés, y más precisamente la referida al terciario, ha sido estudiada por numerosos autores, entre los que se encuentran Darwin, (1846), el primero en recorrer el área con propósitos científicos Ameghino, (1890) quien realizó observaciones geológicas en la región, Ihering, (1907) quien analizo el material fosilífero, y Windhausen, (1921), Rovereto, (1921), Frenguelli J. , (1926) y Feruglio, (1950) que llevaron a cabo estudios geológicos de inestimable valor como guía (Haller, *et.al.*,

2001). Haller (1979, 1980) presentó un cuadro estratigráfico del sector situado al Oeste de la región aquí descripta. En 1987, Scasso y del Río hicieron una interpretación de la estratigrafía terciaria de la comarca, y finalmente en el año 2001 fue publicada la hoja geológica de la Península Valdés a escala 1.250.000 (Haller, *et.al.*, 2001).

### Formación Gaiman (Oligoceno Superior)

La unidad más antigua aflorante en la región está conformada por pelitas de naturaleza cinerítica asignadas al denominado ciclo Patagoniano y designadas como *Formación Gaiman* por Haller & Mendía, (1980).

La nominación de esta unidad, correlación y asignación de pisos ha sido motivo de numerosas discrepancias entre los distintos investigadores que abordaron el tema. La tabla 3.3.1 tomada de Del Río, (2000) es una síntesis de la estratigrafía propuesta para las sedimentitas aflorantes en la península Valdés, donde se muestran algunos de los resultados de aquellas disquisiciones.

Tabla 3.3.1 Síntesis de la estratigrafía propuesta para las sedimentitas aflorantes en la península Valdés (Del Río, 2000)

DARWIN 1846	DOERING 1882	F.AMEGHINO 1898- 1905		ROVERETO 1913- 1921	WINDHAUSSEN 1921	FRENGUELLI 1926		FERUGLIO 1949	HALLER 1981	SCASSO Y DEL RIO
FORMACION PATAGONICA	PISO PATAGONICO MEDIO	F. ARAUCANA	RIONEGRENSE (continental) RIONEGRENSE (marino)	ARAUCANO	FORMACION ARAUCANA	F. ARAUCANA	PUELCHENSE	RIONEGRENSE	FORMACION PUERTO MADRYN	FORMACION PUERTO MADRYN
		F. ENTRERRIANA	PARANENSE	ENTRERRIANO (Aonikense)	FORMACION ENTRERRIANA	F. ENTRERRIANA	RIONEGRENSE (marino) RIONRGRENSE (continental) ENTERRIENSE AONIKENSE	ENTRERRIENSE		
		F. PATAGONICA	LEONENSE	LEONENSE	FORMACION ARAUCANA	F. PATAGONICA	LEONENSE	JULIENSE	FORMACION GAIMAN	PATAGONIENSE

Estudiaron también estratos correlacionables con la *Formación Gaiman*, autores como Bertels, (1970), Di Paola & Marchese, (1973), Camacho, (1974, 1979, 1980),

Expósito, (1977), (Camacho & Fernandez, (1956), Cortés, (1979), Giménez, (1977), Haller M. J., (1979), Núñez, et al., (1975), Riggi, (1979a, 1979b, 1980), y Sepúlveda, (1978).

Está constituida por fangolitas cineríticas con escasos niveles arenosos finos intercalados. En general es de colores claros y presenta una estructura maciza, aunque puede observarse una laminación normal o lenticular en algunos bancos. Las bioturbaciones son frecuentes, con abundantes marcas de organismos perforantes.

El contenido fosilífero es escaso tratándose de moldes de turrítelas, ostreas, pinnas, *Mytilus*, escasos pectínidos y decápodos y restos de vertebrados marinos acumulados en cuerpos lenticulares pequeños, que debido al tipo de fosilización y el mal estado de conservación no han sido clasificados sistemáticamente, (Scasso & del Rio, 1987).

La base de esta unidad es desconocida en el ámbito de la península Valdés. Hacia el poniente se apoya sobre las calizas de la *Formación Arroyo Verde* (Haller & Mendía, 1980) de edad eocena media a tardía. Esta cubierta mediante discordancia de erosión por la *Formación Puerto Madryn*.”, (Haller *et.al*, 2001).

Si bien no se registraron afloramientos de esta unidad estrictamente en la zona de estudio, se decidió incorporarla dentro de la geología aflorante porque sí lo hace (aunque sus afloramientos son escasos) en el resto de la península, habiéndoselos identificado en las barrancas que limitan al golfo San Matías por el Sur y en la zona del Istmo Ameghino.

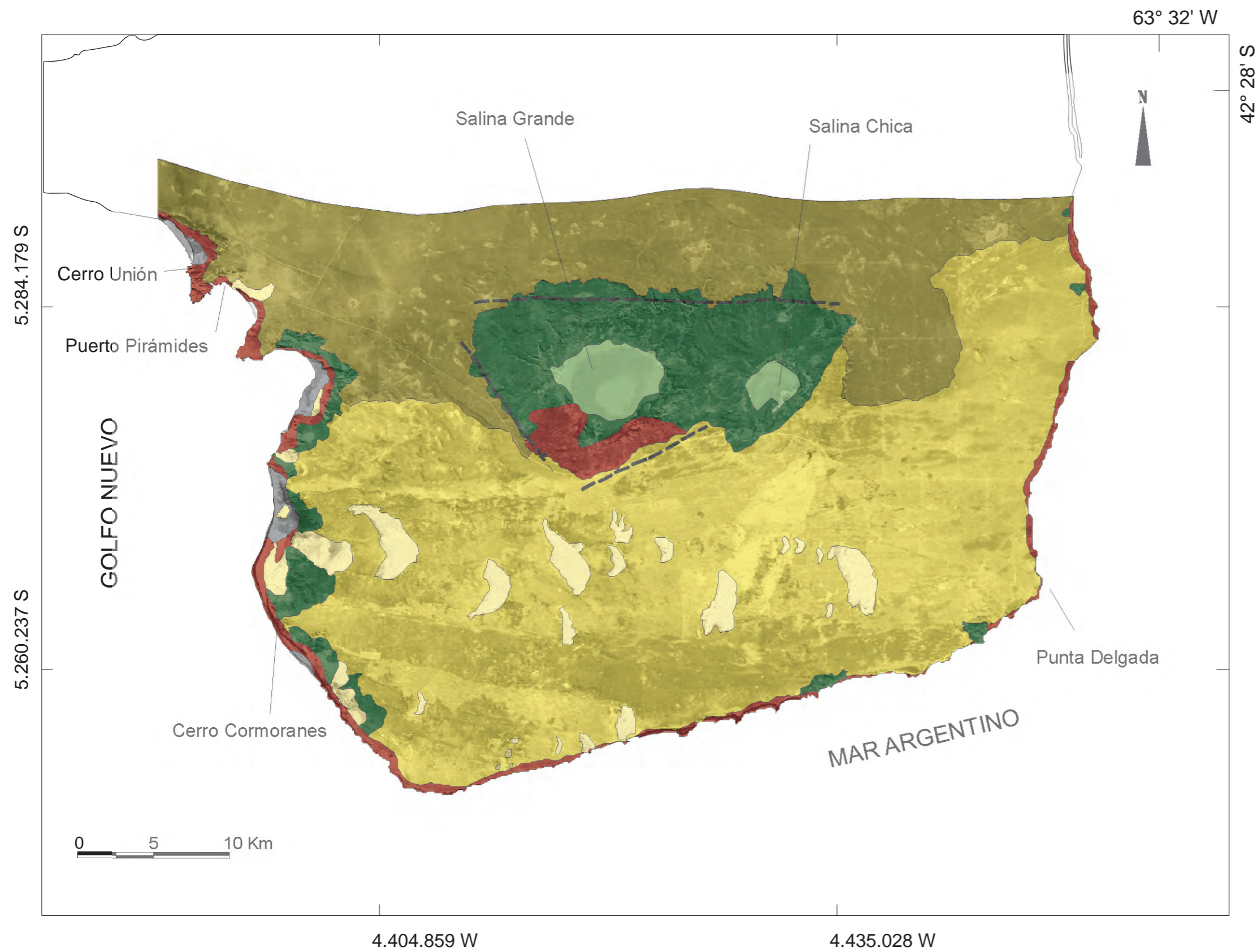
Por otro lado, la importancia de esta formación radica en que constituye el piso de la *Formación Puerto Madryn* que es la que alberga la unidad acuífera en estudio.

#### *Formación Puerto Madryn (Mioceno)*

La *Formación Puerto Madryn*, (Haller, 1979) fue descrita en los alrededores de la ciudad homónima y está constituida por una intercalación de 150 metros de espesor de areniscas finas de colores grises y amarillentos, pelitas y limolitas blanquecinas (Figura 3.3.2), y por potentes espesores coquinoideos con matriz arenosa o limosa, (Figura 3.3.3).

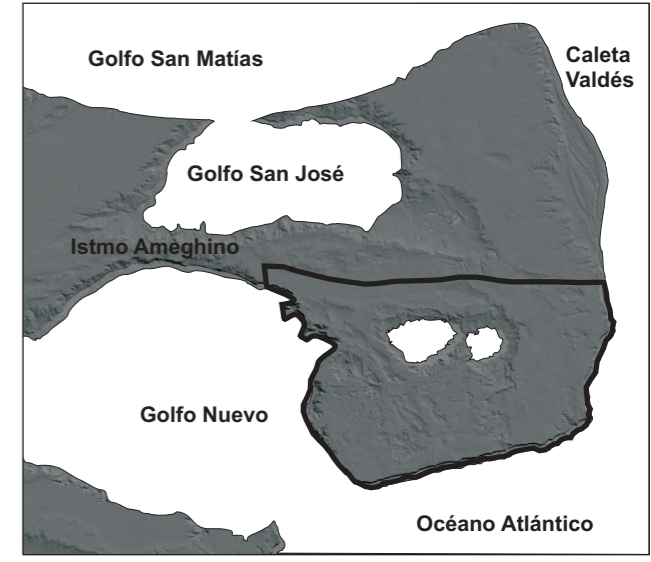
El techo lo constituyen los *Rodados Patagónicos* y se apoya sobre las cineritas blanquecinas de la *Formación Gaiman*.

Sus afloramientos (Figuras 3.3.4 y 3.3.5). Se encuentran principalmente lo largo de los acantilados que rodean a la Península Valdés.



*“Investigación Geohidrológica en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

Ubicación del area de estudio



MAPA GEOLÓGICO

REFERENCIAS









	Depósitos de aluvio y coluvio		Gravas Holocénicas
	Depósitos eólicos actuales		Rodados Patagónicos
	Depósitos eólicos antiguos		Terciario
	Depósitos de bajos y lagunas		Falla inferida

Figura 3.3.1

Hubo muchas diferencias de criterio entre los numerosos investigadores en cuanto a su nominación y división en pisos, situación que se muestra en la tabla 3.3.1. La mayoría de ellos propuso diversas divisiones de carácter cronoestratigráfico basadas en el contenido malacológico de estos horizontes sedimentarios.



*Figura 3.3.2: arenas grises con intraclastos pelíticos y estratificación entrecruzada en artesas observada en los acantilados de la Caleta Valdés.*



*Figura 3.3.3: nivel coquinoideo observado en el bajo de la Salina Grande.*





Figura 3.3.4: afloramiento en los acantilados de Punta Delgada

Scasso y del Río (1987) definen un único ciclo sedimentario marino que abarca a las unidades denominadas “Patagoniense” (Fm Gaiman), “Entrerriense” y “Rionegrense” (Fm. Puerto Madryn) describiendo para esta última seis facies en función de su litología, contenido fosilífero, bioturbación, estructuras sedimentarias y geometría:

*Facies 1: Areniscas conglomerádicas y coquinoideas (conchillas fragmentadas)* color gris a pardo amarillento, con clastos mal seleccionados, Son muy comunes los intraclastos pelíticos. En el caso de las coquinas la matriz es siempre tamaño arena y por lo general gruesa. La geometría es generalmente lenticular, conformando lentes muy aplanados de varios cientos de metros de longitud y hasta 6 m de espesor. Interpretación: depósitos residuales en canales de marea.



Figura 3.3.5: afloramiento en la zona centro-Sur del área de estudio

*Facies 2: Coquinas de organismos no transportados. (Ostrea y Glycymeris).* También hay delgados bancos con ostreas que presentan escaso retrabajo. La matriz es arena muy fina a limo (41 % arena muy fina; 26 % limo; 33 % arcilla). Además es frecuente la presencia de niveles ricos en yeso, en parte de origen epigenético. Los bancos presentan geometría lenticular, con un espesor máximo de 0,4 m. Interpretación: bancos y barras submareales e intermareales.

*Facies 3: Coquinas con matriz pelítica y pelitas asociadas, color castaño y pardo amarillento.* Los fósiles que las constituyen no superan en ningún caso el 70 % del total de la roca, siendo por lo general de alrededor de un 30 %. Son depósitos formados principalmente

por ostreas, pectínidos, pectínidos y turrítelas o brachiopodos, ostreas y turrítelas o constituidos solamente por equinodermos. Los fósiles presentan escaso retrabajo. Presentan a menudo cemento carbonático. Los bancos netamente coquinoideos no superan los 0,5 m de espesor y pasan gradualmente hacia arriba a pelitas arenosas algo tobáceas con fósiles dispersos. La repetición de estos “ciclos” llega a constituir espesores de hasta 6m. Los depósitos presentan geometría mamiforme con regular continuidad lateral. Interpretación: depósitos de tormenta (tempestita) acumulados por debajo de la base del tren de olas de buen tiempo.

*Facies 4a: Pelitas laminadas o masivas y tobas.* Las pelitas son de color blanco (secas) y verde oscuro, gris pardo o castaño en húmedo. Compactas, masivas y algunas veces presentan laminación paralela. Aparecen niveles de tobas color gris claro (cineríticas) a castaño o pardo amarillento, friables y en general suelen presentar aspecto masivo o estratificación convoluta. El contenido de fósiles es escaso, se registran generalmente moldes. También hay restos vegetales (tallos y hojas pequeños). Interpretación: depósitos marinos de plataforma interna acumulados por suspensión.

*Facies 4b: Areniscas y pelitas interestratificadas* Alcanza buen desarrollo en toda la zona, principalmente en la parte superior de la *Formación Puerto Madryn*. Las areniscas son de color gris a castaño amarillento y las pelitas blancas (secas) y pardas, verde oscuras o castaño oscuras (húmedas). Las areniscas presentan grano fino a muy fino, contienen abundante matriz limo arcillosa. Ambas litologías se interestratifican en bancos de 1 a 5 cm de espesor. La estratificación es horizontal o en forma de amplias artesas. Esta facies presenta desarrollos verticales cercanos a los 15 m con gran continuidad lateral. Interpretación: barras mareales, o planicie de mareas sometidas a exposición sub-aérea.

*Facies 5: Areniscas con estratificación entrecruzada de mediana y gran escala* Areniscas líticas de color gris, gris azulado o castaño amarillento, friables, de granometría arena fina a gruesa, con selección variable. Las estructuras sedimentarias más comunes son estratificación entrecruzada planar y en artesas de mediana y gran escala. Entre juego y juego de estratificación entrecruzada suelen aparecer niveles pelíticos delgados. Cada juego presenta espesores que fluctúan entre 0,3 y 1 m. Estos cuerpos presentan base neta, erosiva con forma convexa y techo plano alcanzando espesores de hasta 8 m (en promedio 2 a 3 m) y rápido acuñaamiento laterales algunas decenas de metros. Interpretación: depósitos de corrientes de marea (barras de marea).

*Facies 6. Areniscas con matriz pelítica y pelitas* de coloración variada (grises, verdes, castaño oscuras, pardas y negras). Yeso, caliche y concreciones de óxido de hierro. Interpretación: paleosuelos.

### *Modelo depositacional*

Scasso & del Rio, (1987) proponen que "...la sedimentación ocurrió en un mar somero de plataforma y con una marcada tendencia regresiva...", donde los sedimentos iniciales se habrían depositado en un fondo marino por debajo de la base del tren de olas (facies 4a "Patagónica") conformando una monótona secuencia pelítica con fuerte bioturbación. Postulan para el límite de esta unidad con las facies suprayacentes la existencia de superficies de omisión que marcan la disminución temporaria en la tasa de sedimentación a mínimos.

Paulatinamente este ambiente se habría tornado más somero y comenzado a ser influenciado por tormentas, cuyos depósitos (facies 3) son más frecuentes en la parte media de la secuencia.

Paralelamente en los sectores costeros se comenzaba a desarrollar una extensa red de arroyos y canales de marea de magnitud variable, cuyos depósitos más notables (facies 1 y 5) se encuentran en la zona sur del golfo Nuevo y podrían indicar un **sistema estuárico**, con aporte fluvial proveniente del Sudeste. Interpretan que las mareas regularon la sedimentación bajo la forma de lenguas arenosas submareales e intermareales (facies 4b) separadas entre sí por canales (facies 5 y 1) y asociados a barras y bancos arenosos y limosos submareales que contenían comunidades de organismos (facies 2).

En la parte superior de la secuencia aparecen con mayor frecuencia depósitos que atribuyen a planicies de mareas (facies 4b) y consideran los autores que los niveles de paleosuelos de las facies 6 indican la emersión de los terrenos ocurrida posiblemente a fines del Mioceno y por lo tanto la finalización del ciclo sedimentario.

### **Neógeno – Cuaternario** (Haller et. el., 2001)

#### *Rodados Patagónicos (Plioceno superior – Pleistoceno inferior)*

Se denominan "rodados patagónicos", de acuerdo a al criterio enunciado por Fidalgo & Riggi, (1970), a los depósitos de grava arenosa que coronan la superficie mesetiforme más elevada que puede observarse en la península.

Se apoyan en discordancia erosiva sobre las sedimentitas de la *Formación Puerto Madryn*. Están cubiertos en general solamente por un suelo esquelético con escasa vegetación y pequeños túmulos de material arenoso, pero también se los ha localizado en zonas con cobertura arenosa importante.

Los afloramientos observados sobre la margen Sur de la Salina Grande exponen claramente el contacto entre los rodados y los sedimentos terciarios, (Figura 3.3.6).



*Figura 3.3.6: contacto de la los Rodados Patagónicos y la Formación Puerto Madryn*

Estos depósitos se distribuyen por los remanentes de la planicie de agradación más antigua, que se encuentran en el sector central del Istmo Carlos Ameghino y en la comarca central de la península Valdés según se expone en el anexo, Figura 3.3.1: Mapa geológico. (Haller *et.al*, 2001).

Están conformados por bancos de conglomerados polimícticos (vulcanitas silíceas, andesíticas y basálticas) que presentan una notable continuidad lateral y estructura masiva cuando la granulometría es uniforme y estratificación irregular cuando existen intercalaciones de gravas más finas o arenosas, (Figura 3.3.7).

El tamaño de los clastos disminuye progresivamente hacia el Este quedando el más frecuente en el orden de los 150 mm. (Fidalgo & Riggi, 1970). La fábrica es variable, desde clasto sostén a matriz sostén, donde la matriz es areno-arcillo-limosa o también llamada como limos loesiformes (Frenguelli J. , 1926).



Figura 3.3.7: Rodados Patagónicos.

Se encuentran cementados en parte con un material de naturaleza carbonática. Los clastos están bien redondeados y son predominantemente subsféricos a subelongados. En ocasiones aparecen bancos de areniscas loessoides de color castaño en la base. La potencia de esta unidad alcanza los 3 m de espesor (Haller, *et.al*, 2001).

El ambiente de depositación correspondería a un medio áqueo (Cortelezzi, *et.al*, 1968), donde el régimen fluvial dispersante habría sido de alta energía, con variaciones del sistema de flujo durante el ciclo de sedimentación, (Beltramone & Meinster, 1993).

### **Cuaternario**

#### *Formación Caleta Valdés (Pleistoceno superior)*

Siguiendo con el orden planteado por Haller, correspondería hablar de los depósitos de la *Formación Caleta Valdés*, pero cabe aclarar que esta es unidad solo esta descrita para el sitio homónimo, no incluido en la zona de estudio. Por esto, y siguiendo con el orden planteado por los autores de la hoja geológica, se describen a continuación los depósitos holocenos.

### Formación San Miguel (Holoceno)

En 1981 Haller denomina con este nombre a los depósitos de gravas y arenas con abundantes fragmentos de valvas de moluscos ubicados a poca altura por encima de los depósitos de playa actuales, (Figura 3.3.8).



Figura 3.3.8: depósitos de gravas ubicados por detrás de la playa actual.

Con ese mismo criterio asignaron a dicha formación a todos los depósitos de playa y cordones litorales elevados de las márgenes de la Península Valdés y de los golfos que la circundan, (Haller *et.al*, 2001).

Esta unidad se manifiesta, dentro del área de estudio, en forma de reducidos asomos a lo largo de la costa del Golfo Nuevo (Figura 3.3.1: Mapa geológico) al pie de paleoacantilados.

La *Formación San Miguel* está compuesta principalmente por gravas medianas a gruesas, acompañadas por matriz de gravilla, arena gruesa y fragmentos de bivalvos, Figura 3.3.9. La litología de estos rodados corresponde a vulcanitas mesosilíceas con distintos grados de alteración y muy subordinados a plutonitas y sílex. Son gravas redondeadas y subesféricas de tamaño guijarro, (Haller *et.al*, 2001).

El ámbito de depositación correspondería a un subambiente de playa de alta a mediana energía, sometidos a la acción de olas.



*Figura 3.3.9: depósitos de gravas, arenas y conchillas.*

### *Depósitos eólicos*

En el sector centro- Sur de la zona (Figura 3.3.1: Mapa geológico), se desarrollan depósitos formados por acción eólica, donde se distinguen unos levemente más antiguos, colonizados por la vegetación (Figura 3.3.10), sobre los que se desarrollan médanos más modernos y actualmente activos. (Figura 3.3.11)



*Figura 3.3.10: médanos activos ubicados al Este de la localidad de Puerto Pirámides*





Figura 3.3.11: médanos vegetados en las cercanías de Punta Cormoranes.

Litológicamente se trata de arena mediana a fina con participación de fracción pelítica y muy escasa fracción tamaño grava. La composición es cuarzo feldespática, con escasa participación de vidrio volcánico y fragmentos de origen orgánico. La fracción pesada está compuesta por turmalina, epidoto, piroxeno y anfíboles.

Estos depósitos se habrían originado a partir de la erosión eólica de los sedimentos del terciario aflorantes en los acantilados de la margen oriental del Golfo Nuevo y su posterior transporte por los vientos predominantes provenientes del sector Oeste y Sudoeste. Para los médanos actuales se ha planteado un origen por retrabajo in situ de los sedimentos de los médanos más antiguos (fijados por vegetación) y su retransporte eólico por los vientos dominantes arriba mencionados, (Del Valle, *et.al*, 2000).

#### *Sedimentos finos de bajos y lagunas*

Las depresiones endorreicas de la península tienen sus fondos cubiertos por sedimentos muy finos (limos, limos arcillosos y arcillas) y asociados a éstos se encuentran depósitos evaporíticos, que se hacen marcadamente manifiestos en las salinas Grande y Chica (Figura 3.3.1: Mapa geológico).

Dado su interés comercial, estos depósitos, han sido explotados en numerosas oportunidades, remontándose el registro más antiguo de extracción (para la Salina Grande), a 1896.

Las salinas Grande y Chica (Figuras 3.3.12 y 3.3.13 respectivamente) fueron estudiadas, por primer vez en 1962 por Re y Brodtkorb con la intención de determinar sus reservas para ser utilizadas luego en el proceso de elaboración de soda Solvay, (Re & Brodtkorb, 1962).



*Figura 3.3.12: margen Sur de la Salina Grande*



*Figura: 3.3.13: borde Sureste de la Salina Chica*

Ambas salinas se encuentran en una depresión con cotas de base diferente para cada caso. La Salina Grande tiene su fondo a 40 bajo el nivel del mar y la Salina Chica a 12 metros bajo el nivel del mar.

Esas bases están constituidas por un material limoso acuoso, de coloración negro verdusca, sobre el cual los cuerpos salinos “flotan”, consecuentemente ese material se encuentra debajo y alrededor de los cuerpos salinos, (Brodtkorb, 1999).

Litológicamente están compuestos por una sucesión de capas de sal de color blanquecino con intercalaciones oscuras de limo, cenizas volcánicas y fangos en estado de descomposición. Según los estudios de Brodtkorb, la composición de la sal de los distintos niveles está representada principalmente por Halita (NaCl) para la Salina Grande (con una proporción mayor al 90 % en promedio) y por Halita (NaCl) y hasta un 35 % de Glauberita ( $\text{Na}_2\text{Ca} \cdot (\text{SO}_4)_2$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para la Salina Chica.

El modelo genético está relacionado con la inicial generación de los bajos y la subsecuente afluencia de agua superficial y subterránea con contenido salino producto del lavado de los sedimentos del terciario marino, que al llegar al depocentro, por tener ésto características endorreicas, se evaporan concentrando la sales en superficie. Este proceso es actual, por lo que se descarta que sean depósitos evaporíticos fósiles, y cumple un ciclo anual, dónde la concentración de sales se produce en el momento de mayor evaporación, coincidente con los meses de verano (históricamente el momento de cosecha del mineral).

#### *Depósitos indiferenciados de aluvio, coluvio y de bajos y lagunas*

Son depósitos no consolidados de color gris claro a castaño claro, cuyo tamaño de grano corresponde a arena fina a mediana, mezclada con proporciones variables de limos, arcillas y algunos rodados dispersos, (Haller *et.al*, 2001).

En el área de estudio se los localiza en las bajadas hacia el Golfo Nuevo y hacia los bajos endorreicos, (Figura 3.3.1: Mapa geológico).

Son acumulaciones relativamente delgadas y tienen su origen en el material procedente de la erosión de las distintas unidades geológicas aflorantes en la zona.

### **3.3.3. Tectónica y Estructuras**

Uno de los estudios más antiguos realizados sobre esta temática fue el de Rovereto, donde señaló que los golfos San José y Nuevo se formaron por acción tectónica, lo mismo que las salinas Grande, Chica, el Gran Salitral, el bajo del Gualicho y la Caleta Valdés, (Rovereto, 1921).

Posteriormente Kostadinoff reafirmo los conceptos de Rovereto determinando mediante exploración geofísica y geomagnética, la existencia de un pilar tectónico en el basamento de la península.

Según aquel estudio, los golfos San Matías, San José y Nuevo resultarían de fallas del basamento, fenómeno complementado por erosión hídrica y eólica. Señaló también que las mayores fallas se encontrarían en los bordes del pilar y teniendo en cuenta que han mantenido su actividad hasta la actualidad, es posible hayan originado a las Salinas Grandes, Chica y al gran Salitral. Simultáneamente sostiene que las principales puntas ubicadas en el perímetro de la península serían consecuencia de estos movimientos, (Kostadinoff, 1992).

A una escala más local, se ve que las estructuras de la comarca son sencillas, representadas principalmente por fracturas, ascensos y descensos, que según Haller *et. al.* (2001), estarían originadas por los movimientos diastróficos que se sucedieron durante el Cenozoico.

Las fallas son de características subverticales, con rechazos máximos de 4 metros y rumbo submeridional. Acompañan a estas juegos de diaclasas con el mismos rumbo e inclinación.

Debido a la cubierta cuaternaria que corona toda la región, las estructuras previas a este último período quedan ocultas por aquellos depósitos y solo pueden apreciarse en los acantilados costeros y en las márgenes de los bajos que contienen a las salinas Grande y Chica.

El análisis geomorfológico realizado, colaboró con la idea de un origen tectónico para las salinas ya que se pudo observar la morfología de los bajos, con bordes abruptos, tanto en planta como en perfil, que apoyan la idea de fallas originarias de dichas geoformas. También se detectaron lineamientos asociados a las salientes o puntas que acompañan el perímetro de la Península.

Cabe aclarar que no se realizó un análisis más profundo de las fracturas porque éstas no mostraron, en el análisis de campo, tener relevancia en el ciclo hidrológico debido a tratarse de un acuífero en medio poroso y sin permeabilidad secundaria fehacientemente constatada.

### 3.4. Hidrología Superficial

La comarca en estudio se caracteriza hidrológicamente por la ausencia de cursos de agua permanentes tanto autóctonos como alóctonos, siendo su única manifestación hídrica superficial la presencia de dos grandes cuerpos lacunares transitorios (salinas Grande y Chica) y pequeños cuerpos de agua efímeros.

El límite de la cuenca “*sensu strictu*” de las Salinas grande y Chica, definido a partir del mapa topográfico, coincide con la línea imaginaria que bordea el bajo que contiene a ambas, respecto a la planicie circundante. En el mapa geomorfológico (Figura 3.2.1) se insinúan las vías de drenaje que conforman un avenamiento centrípeto de carácter transitorio efímero, activado en ocasión de precipitaciones extraordinarias dado el exiguo régimen pluvial imperante.

Según Cintrón-Molero y Schaeffer-Novelli (2002), las Salinas Grande y Chica se clasifican dentro de la unidad de paisaje endorreica, en el subsistema de cuencas áridas a hiperáridas donde  $P < ETP$ . Los cuerpos de agua dentro de estas cuencas son inherentemente inestables, hipersalinos y están sujetos a desecación completa o se encuentran secos la mayor parte del tiempo.

Atendiendo a la clasificación de humedales propuesta por Manzano (2005), desde el punto de vista hidrológico, se los pueden clasificar como de descarga, recarga o de flujo a través de ellos.

Los de descarga son aquellos en los que la fuente de aporte principal es el agua subterránea y la pérdida se da por evaporación o flujo superficial. Si la evaporación es el flujo de salida dominante, el humedal puede evolucionar a un salar o lago playa. Los de recarga, son aquellos en los que el flujo de salida principal es la infiltración. En los de flujo a través, la recarga de agua subterránea es la principal fuente de aporte y la infiltración el principal proceso de pérdida.

Este caso y por su conformación fisiográfica endorreica, de trata de un tipo distinto, con un ingreso mixto de amplio predominio subterráneo y pérdidas exclusivamente consuntivas.

### 3.5. Hidrología Subterránea

La hidrología subterránea o geohidrología es la disciplina que trata la fase terrestre del ciclo hidrológico. Se la divide para su descripción y análisis en **hidrogeología** (características del medio físico, es decir las relacionadas al tipo de roca/sedimentos, sus

estructuras y las relaciones entre ellos), **hidrodinámica** (propiedades del movimiento del agua subterránea, localización y tipificación de aéreas de recarga-circulación-descarga y determinación de parámetros hidráulicos y velocidades de flujo) **hidroquímica** (caracterización cuali-cuantitativa de las aguas) y por último la **hidrología isotópica**.

Se analizarán en primera instancia, los aspectos hidrogeológicos que otorgan el marco físico al medio acuífero y luego se continuará con la caracterización hidrodinámica del circuito geohidrológico y su correlato con las hidroquímicas e isotópicas.

### 3.5.1. Hidrogeología

Como se adelantara en el apartado metodológico, se analizarán en esta sección las características hidrogeológicas del medio físico, más específicamente las relacionadas a la capacidad de recibir, almacenar y transmitir el agua de las distintas unidades litológicas.

A modo de introducción, es necesario resaltar que se trata en todos los casos de acuíferos en medio poroso, no habiendo sido identificados para la zona otros en medio fisurado , al menos en la secuencia conocida.

La descripción esta ordenada en función de la permeabilidad de la formación, yendo de mayor a menor y finalizando, en concordancia con este criterio, con las de características acuicludas.

Luego de dicha tipificación se presenta una síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de los datos de perforaciones.

Al final de la sección se muestra, en un diagrama en tres dimensiones, la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas que se describen a continuación.

Antes de calificar y describir las distintas unidades desde el punto de vista hidrolitológico, cabe una crítica acerca de las perforaciones que se utilizaron para reconocer la secuencia de estas unidades en el subsuelo.

#### 3.5.1.1. Perforaciones

A partir del análisis de los registros de antiguas perforaciones y de las realizadas en el marco de esta tesis, se sintetizan a continuación, las características más relevantes desde el punto de vista hidrogeológico de cada uno de los sondeos.

Se describirán en primera instancia los datos emergentes de los registros antecedentes y luego los que surgen del análisis de los perfiles de pozos realizados en el marco de esta investigación.

### Perforaciones históricas

De los 9 (nueve) perfiles históricos recopilados, 4 (cuatro) se localizan dentro de la zona de tesis (“Puesto los Médanos”) y los 5 restantes en la periferia (“El Centenario”, “Casilla del Medio”, “El Martillo”, “El Indio” y “Los Orientales”. (Figura 3.5.1)

Las ubicadas estrictamente dentro del área de estudio corresponden a las realizadas por la Dirección General de obras Hídricas y de ellas se cuenta con la interpretación gráfica (perfiles) del cutting de perforación (Anexo, A.3.5.1. Perforaciones puesto los Médanos).

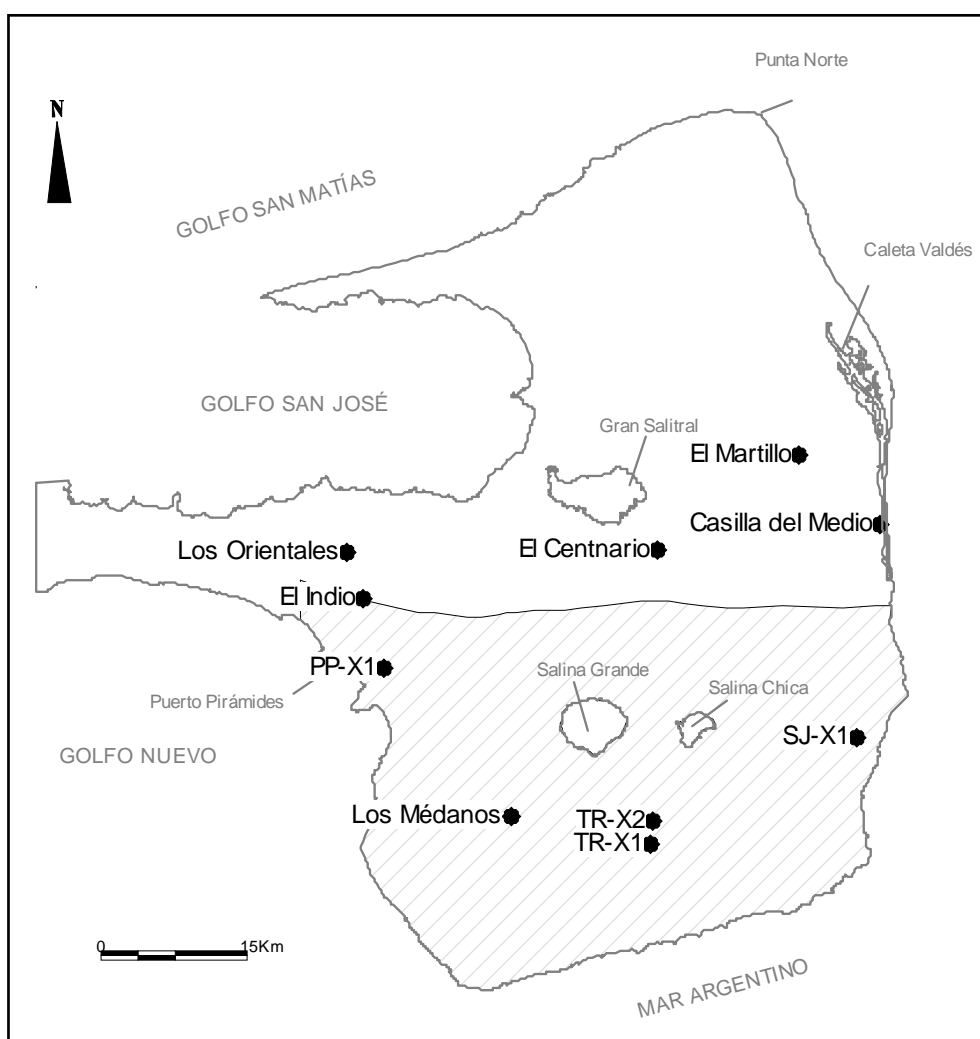


Figura 3.5.1: Mapa de ubicación de los perfiles de perforación

Alcanzan entre 70 y 90 metros de profundidad y se encuentran distribuidas sobre la zona de médanos en un radio de menos de 0,5 km, hecho favorable por una parte ya que permitió la realización de ensayos de bombeo con pozo de observación, y desfavorable por otra dado que en función de la escala de trabajo, al momento de regionalizar la información, hubo que tomarlos como un solo punto.

Por proximidad entre los sondeos y la similitud de sus perfiles, se ha decidido describirlos de manera integrada.

Comienzan con un nivel arenoso en la mayoría de los casos interrumpido por una capa de rodados dentro de los primeros 5 metros. Continúa con estratos de arenas, tobas y arcillas típicas de la *Formación Puerto Madryn*.

Aproximadamente a los 50 m aparece el **primer nivel acuífero productivo**, constituido por una intercalación de tobas arcillosas y arenas. Luego continúa una secuencia de arcillas con algunas intercalaciones de tobas arcillosas hasta alcanzar después de los 65 m (en 1 de los sondeos después de los 75 m), el **segundo nivel acuífero**. Los registros de las perforaciones finalizan por debajo de este último luego de atravesar entre 2 y 3 metros de arcillas.

Las 5 (cinco) perforaciones externas al área, (Anexo A.3.5.2, A.3.5.3, A.3.5.4., A.3.5.5., A.3.5.6.), resultaron muy útiles, desde el punto de vista del marco hidrogeológico regional, ya que superan los 150 m de extensión vertical, alcanzando la más larga los 674 m bpb permitiendo obtener un conocimiento más acabado del sistema en profundidad.

Dos de ellas, “*El Indio*” y “*Los Orientales*” (Anexo, A.3.5.2, A.3.5.3, respectivamente), se ubican al norte de Puerto Pirámides sobre la zona del Istmo Florentino Ameghino.

La primera inicia con un nivel de 6 m de conglomerados continuando luego con arcillas e intercalaciones de arenas hasta alcanzar el **primer nivel acuífero**, entre los **63-72 m**, dentro de una intercalación de pelitas y psamitas fosilíferas.

Se sucede en adelante una secuencia de arcillas y esporádicos bancos de arenas y conchillas hasta llegar al **segundo nivel acuífero** ubicado, de los 216 a 245 m, dentro de una intercalación de arenas y arcillas. El registro finaliza a los 249 m, luego de atravesar 4 m de arcillas.

El perfil de “*Los Orientales*” muestra de 0 a 44 m una intercalación de arcillas y arenas con predominancia de las primeras volviéndose hacia el final del tramo más arenoso dando lugar al **primer nivel acuífero** que llega hasta los 50 m dónde inicia nuevamente un



tramo predominantemente arcilloso que se prolonga hasta los 75 m. A partir de allí se localiza el **segundo nivel acuífero** conformado principalmente por arenas, que se extiende hasta los 105 m. Por debajo la secuencia está constituida por arcillas y arcillas arenosas dispuestas alternadamente hasta los 345 m, donde termina la perforación.

Las otras tres perforaciones (“*El Centenario*”, “*Casilla del Medio*” y “*El Martillo*”) se ubican al Norte de la zona de estudio, en las inmediaciones de la Caleta Valdés.

El registro del sondeo “*El Centenario*” (Anexo A.3.5.4.) alcanza los 150 m. Comienza con 20 m de arenas, conglomerados y arcillas intercaladas, para luego continuar con un paquete de arcillas hasta los 36 m donde aparecen las arenas del **primer nivel acuífero**. Estas se desarrollan por 3 m, interrumpiéndose y a los 39 m reemplazadas por arcillas y tobos que se prolongan hasta los 144 m. Entre los 144 y los 148 m se identificó el **segundo nivel acuífero** contenido en arenas limosas fosilíferas. Seguidamente el perfil termina con 2 m de arcillas.

La perforación “*Casilla del Medio*” (Anexo A.3.5.5.), con sus 674 m representa el sondeo más profundo realizado en la historia de las exploraciones para aguas de la Península Valdés. La columna empieza con intercalaciones de arenas y arcillas que entre los 35 y 37 m se manifiestan más arenosos y conforman el **primer nivel acuífero**. Continúan arenas, arcillas y arcillas tobáceas hasta los 172 m donde se atraviesa un estrato de 3 metros de arenas limosas fosilíferas que contienen el **segundo nivel acuífero**. Desde los 175 m y hasta que termina la perforación, el registro litológico está compuesto por arcillas y arcillas tobáceas.

Por último, el sondeo “*El Martillo*”, (Anexo A.3.5.6) de 255 m de profundidad atraviesa 50m de conglomerados y niveles arenosos hasta que alcanza las arenas fosilíferas que contienen el **único nivel acuífero** registrado. Por debajo continúan arcillas hasta los 102 m, luego un nivel de 4 m de arenas conglomerados y arcillas y finalmente culmina con arcillas y arcillas arenosas.

### ***Perforaciones realizadas en el marco de esta investigación***

Se realizaron en diciembre de 2008, cuatro sondeos de exploración cuyo objetivo fue la descripción detallada del perfil hidrogeológico y la localización y caracterización hidrogeológica del primer nivel acuífero productivo.

La elección de los sitios estuvo signada por la necesidad de información de subsuelo y por las posibilidades de ocurrencia de agua en cantidad y calidad deseables.

Bajo esos criterios se seleccionaron las estancias El Trébol y San Jorge (perforaciones TR-X1, TR-X2 y SJ-X1 respectivamente), (Figura 3.5.1).

Paralelamente se optó por posicionar un sondeo (PP-X1) en las inmediaciones de la localidad de Puerto Pirámides (Figura 3.5.1), con el objetivo particular de evaluar la disponibilidad de agua subterránea utilizable en las cercanías de dicha población.

El sondeo SJ-X1 (Anexo, Figura A.3.5.7.), ubicado al este de la Salina Chica en la zona más distal del área medanosa alcanzó una profundidad de 56 m. Comienza con 7 m de arenas y escasos conglomerados, seguidos de un potente espesor interestratificado de limo-arcillitas tobáceas, psamitas finas tobácea y algunos niveles fosilíferos, que se extiende hasta los 51 m. Luego aparecen las arcillas plásticas que determinan el fin la perforación. El nivel freático se alcanzó a los 46,0 m

La perforación TR-X1 (Anexo, Figura A.3.5.8.) localizada sobre la línea de migración de los médanos activos, inicia su perfil con 50 cm de arenas que seguidamente pasan a un nivel arcilloso de 1 m por debajo del cual aparecen los *Rodados Patagónicos* con una potencia de 1 m. Continúa una secuencia de intercalaciones de arenas limos y escasos niveles tobáceos que se extienden hasta los 8 m. El perfil sigue con 3 metros de arenas y luego se interrumpe, a los 11 m, debido problemas de acceso al sitio por parte de las maquinarias.

El pozo TR-X2 (Anexo, Figura A.3.5.9.), localizado en el área medanosa principal, muestra un perfil que en líneas generales contiene un porcentaje arenoso mayor que el del SJ-X1. Se inicia con dos metros de arenas y luego una secuencia de limo-arcillitas cineríticas que se extienden hasta los 11 m. A partir de esa profundidad se desarrollan, hasta los 42 m, psamitas con intercalaciones de coquinas y limolitas subordinadas. Por último se atravesaron dos metros de arcillas plásticas que definieron la finalización de la perforación. El nivel freático fue localizado a los 29,90 m bbp.

La última perforación realizada, PP-X1 (Anexo, A.3.5.10.) fue localizada en función del área medanosa que estuviese más cercana a la localidad de Puerto Pirámides y que tuviera una dimensión mayor a la de los pequeños depósitos costeros. Bajo ese criterio se la ubicó a barlovento de una duna de 2 km<sup>2</sup> sobre un terreno arenoso a aproximadamente 2,5 km al NE de Puerto Pirámides.

El perfil comienza con una intercalación de arenas y arcillas de 17 m de potencia, donde se atraviesa un conglomerado coquinoideo de 4 m de espesor. Continúa hasta los 32 m con arenas limo-arcillosas que pasan a limo-arcillitas arenosas. Luego aparecen arenas conglomerádicas y arenas medias, ambas con conchillas y matriz limo-arcillosa que se

extienden hasta los 40 m. Por debajo de este último nivel, la granulometría de los estratos disminuye y domina una secuencia de 6 metros de arenas limosas e intercaladas con limo-arcillitas. Entre los 46-54 m se desarrolla un banco de psamitas finas muy bien seleccionadas, luego aparecen pelitas y finalmente un nivel de un metro de arcillas plásticas que a los 58 m ponen fin a la perforación.

El nivel freático no fue detectado en el momento de la perforación, se cree que debido a la impermeabilización de las paredes de la perforación dada la alta cantidad de arcilla y matrices arcillosas en los sedimentos atravesados.

La perforación se interrumpe, a la profundidad mencionada, ya que la cercanía al mar y el contexto salobre de las aguas subterráneas circundantes descartaban la posibilidad de ocurrencia de niveles acuíferos de buena calidad más allá de los primeros metros.

De la interpretación de los perfiles se deduce que:

- los depósitos cuaternarios ocupan una pequeña fracción de la columna sedimentaria,
- el manto de *Rodados Patagónicos* se extiende por debajo de los depósitos eólicos cuaternarios y lo hace con espesores muy variables, fluctuantes entre 6 m. y 0 m.,
- la *Formación Puerto Madryn* está presente en profundidad en toda el área de estudio y contiene al menos un nivel acuífero productivo,
- los niveles acuíferos contenidos dentro de la *Formación Puerto Madryn* se encuentran en sedimentos arenosos que en general son de granulometría media a fina, presentan algún porcentaje de contenido fosilífero y se interstratifican con arcillas o tobas arcillosas,
- superado una determinada profundidad, en general entre los 100 m y los 170 m aproximadamente, se verifica una marcada dominancia de sedimentos arcillosos atribuibles a la *Formación Gaiman*,
- existe un nivel acuífero profundo que estaría contenido dentro de una fracción arenosa de la *Formación Gaiman*

#### 3.5.1.2. Acuíferos de alta permeabilidad

Se incluyen dentro de esta categoría a los depósitos eólicos cuaternarios y a la *Formación San Miguel*.

Los primeros cubren aproximadamente 700 km<sup>2</sup>, representando un 40 % del área de estudio. Esto sumado a sus características litológicas (arenas de granulometría media a fina, bien seleccionadas y no consolidadas) los convierte en la unidad hidrológicamente más importante respecto a las posibilidades de infiltración efectiva que genera, en el marco del clima árido dominante en la región.

Se han registrado en interdunas ubicadas dentro de la franja medanosa principal “ojos de agua” (manantiales) con vegetación indicativa de niveles saturados permanentes que testifican el comportamiento acuífero de la unidad, (Figura 3.5.2).

Desafortunadamente, estos depósitos ocupan solo la delgada franja superior del perfil y su espesor reducido y variable es una limitante al momento de considerar su potencialidad como huésped de niveles acuíferos productivos.



*Figura 3.5.2: Nivel freático aflorante en una Interduna.*

Dentro de los sedimentos eólicos cuaternarios, también se encuentran los médanos costeros, que si bien presentan una alta permeabilidad son muy escasos y de dimensiones poco significativas en el marco regional. No obstante son localmente importantes ya que albergan, como se verá más adelante, reservas de agua de posición somera (2-3 m) y relativamente buena calidad en un marco de aguas salobre.

Los depósitos de la *Formación San Miguel* conforman una unidad de reducidas dimensiones, distribución local y restringida a la franja a la franja litoral comprendida entre la playa y los acantilados, no alcanzando a cubrir el 1% del total del área.

Está compuesta por sedimentos no consolidados de clastos psefíticos, redondeados y con matriz de gravilla, arena gruesa y fragmentos de bivalvos. Estas características indudablemente permiten clasificarla como un acuífero de alta permeabilidad.

La profundidad de los niveles freáticos medidos en esta unidad fue siempre menor a 6 metros.

### 3.5.1.3. Acuíferos de permeabilidad media a baja

Bajo esta calificación se encuentran agrupados los depósitos indiferenciados de aluvios, coluvios, de bajos y lagunas, los "*Rodados Patagónicos*" y la *Formación Puerto Madryn*.

Cubren a modo de delgada lámina las márgenes de los bajos endorreicos y las bajadas al mar, ocupando una superficie de que representa aproximadamente el 12 % del área total.

De naturaleza granulométrica heterogénea, constituidos por gravas, arenas, y limos, es esperable que reflejen idéntica variabilidad en la porosidad efectiva. Dado que no se han encontrado niveles saturados que permitan estimar su permeabilidad, se optó bajo un criterio conservador por incluirlos dentro de este grupo.

Los *Rodados Patagónicos* aflorantes ocupan una superficie relativamente importante, alcanzando hasta un 35 % del total y como se expuso en el capítulo anterior, sus espesores no llegan a superar los 3 m.

Estas acumulaciones, desde la óptica granulométrica, se hayan constituidos principalmente por gravas de 1,5 cm de diámetro, con una fábrica variable desde clasto sostén a matriz sostén, ésta última de características areno-arcillo-limosa. La anisotropía emergente, tanto en sentido vertical como horizontal, como así también la que presentan respecto al grado de cementación, generan una cierta incertidumbre acerca de la porosidad efectiva y de la potencialidad acuífera que pudiesen tener.

Dado que no se ha podido localizar un nivel saturado que permita atribuirles un cierto valor de permeabilidad, que se han verificado en muchos casos importantes porcentajes de la fracción fina y sectores cementados, y que los espesores no superan los 3 m, es que se ha decidido incluir a los "*Rodados Patagónicos*" dentro de la clase media/baja

permeabilidad y no dentro la anterior como se podría espera de una unidad con una importante componente de material pefítico.

La *Formación Puerto Madryn*, si bien no tiene una expresión aflorante relevante ya que no alcanza el 4 % del área, posee un importante desarrollo en profundidad.

Como se mencionara oportunamente y se detallará luego en la descripción de las perforaciones, esta formación se haya compuesta por una asociación de facies donde se intercalan distintas litologías.

En líneas generales son arenas, coquinas y pelitas, donde el porcentaje variable de la fracción fina se ve reflejado en el rango de valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos practicados en esta unidad.

Sobre los afloramiento de la *Formación Puerto Madryn*, en la margen Sur de la salina Grande se identificaron niveles saturados a partir de los cuales se originaban manantiales de tipo difuso o “mallines”, manifestados por anegamientos y cambios rotundos en el tipo de vegetación, que pasa de ser rala y de tipo xerófita a densa y típicamente mesófita o incluso hidrófita, (Figura 3.5.3).



*Figura 3.5.3: Mallín en el flanco sur del bajo de la salina Grande.*

Esta situación se repite de manera similar en los relevamientos realizados sobre los acantilados costeros, donde se localizaron “chorrillos”, niveles húmedos y cambios en la vegetación, (Figuras 3.5.4. y 3.5.5.).



Figuras 3.5.4.: "Chorrillos" sobre afloramiento de la Formación Puerto Madryn.



Figura 3.5.5: Manchas de humedad y cambios de vegetación sobre la Formación Puerto Madryn

#### 3.5.1.4. Acuitardos

Dentro de esta clasificación se ubica tanto a los sedimentos finos de la *Formación Puerto Madryn*, como los de la *Formación Gaiman*.

La primera posee en sus distintas facies niveles pelíticos de variados espesores, que van desde delgadas laminaciones intercaladas entre bancos de arenas a estratos con más de un metro de potencia. Estas porciones del perfil, de características arcillosas, se interpreta que tendrían un comportamiento acuitardo.

Para el caso de la *Formación Gaiman*, constituida principalmente por material fino, es de esperar que sus características físicas sean mucho más homogéneas, y exceptuando los limitados niveles psamíticos, que como se describirá más adelante a partir de los perfiles de perforación funcionarían como acuíferos, sería por excelencia la unidad acuitardo del perfil.

#### 3.5.1.5. Acuícludos

Se incluyen dentro de esta categoría a ciertos depósitos cuaternarios de bajos y lagunas y a los niveles más arcillosos de la *Formación Gaiman*.

Los primeros, constituidos por limos, arcillas y evaporitas, constituyen una unidad de dimensiones aflorantes reducidas, no llegando a alcanzar el 4 % del área analizada.

No obstante su limitada manifestación, conforman la principal área de descarga interna del sistema.

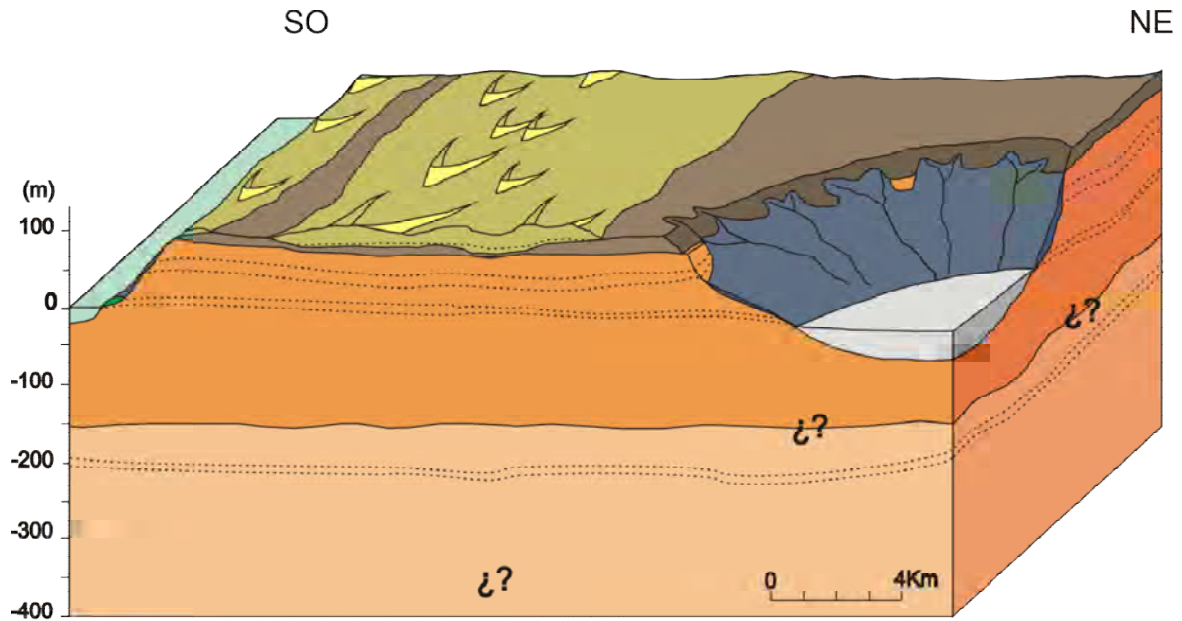
Respecto a la formación terciaria, se interpreta a partir de los perfiles de antiguas perforaciones que los niveles más potentes de arcillas plásticas actuarían realmente como acuícludos.

De la descripción hidrogeológica hasta aquí realizada surgen los siguientes corolarios:

- Más del 95 % de la superficie total abarcada se encuentra cubierta por unidades hidrogeológicas capaces de recibir, alojar y transmitir agua (acuíferos de alta, media y baja permeabilidad)
- Dentro de las unidades aflorantes, dominan los acuíferos de alta permeabilidad, representando un escenario ideal para la infiltración efectiva.
- Solo el 4 % de la comarca en estudio se haya cubierta por sedimentos de características acuícludas.



En base a descripción de las unidades aflorantes y a las evidencias aportadas por los perfiles de perforación, pudo reconstruirse parcialmente la hidrogeología del subsuelo y esquematizar en un diagrama en tres dimensiones Figura 3.5.6 la relación de las distintas unidades.



Unida Geológica	Clasificación hidrogeológica
Depósitos eólicos	Acuíferos de alta permeabilidad
Formación San Miguel	
Rodados Patagónicos	Acuíferos de media/baja permeabilidad
Depósitos de aluvio y coluvio	
Formación Puerto Madryn	Acuíferos de media/baja permeabilidad
Formación Gaiman	
Sedimentos finos de bajos y lagunas	
	Acuíferos/Acuícludos

Figura 3.5.6: Block diagrama esquemático de la disposición espacial de las unidades geológicas y sus atributos hidrogeológicos.

Finalmente, de la integración de lo expuesto anteriormente se concluye que el sistema geohidrológico estaría conformado por:

- una Zona No Saturada (ZNS) correspondiente a los depósitos cuaternarios (predominantemente arenas, gravas y limos) y según la posición topográfica, parte de los sedimentos terciarios,
- un acuífero freático contenido, según la posición espacial, en estos mismos depósitos o exclusivamente en las arenas de la *Fm. Puerto Madryn*, (explotado fundamentalmente en la región),

- uno o más acuíferos semiconfinados/confinados, limitados por estratos arcillosos o limo-arcillosos en la misma formación o en la *Fm. Gaiman* infrayacente (acuitardos/acuícludos),
- Un hidroapoyo dado por el potente espesor de sedimentos con características acuícludas de la infrayacente *Formación Gaiman*.

### 3.5.2. Hidrodinámica

El análisis de esta temática se desarrollará según una secuencia que acompaña el sentido del movimiento del agua en la fase subterránea del ciclo hidrológico.

Se iniciará con la caracterización de la Zona No Saturada (ZNS) para continuar luego con la Zona Saturada (ZS). Dentro esta serán abordados los temas siguiendo el recorrido del flujo desde las zonas recarga hacia las de descarga.

Previo a avanzar en la descripción e interpretación de circuito hidrodinámico se cree conveniente presentar a continuación los resultados de los ensayos hidráulicos practicados tendientes a determinar los parámetros y variables que se requieren para poder dimensionar el fenómeno.

#### 3.5.2.1. Ensayos hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de los niveles acuíferos de la *Formación Puerto Madryn*, se obtuvieron mediante ensayos de bombeo en perforaciones de diámetro convencional (Figuras 3.5.7), condición que permitió aplicar los métodos de Theis, Hantush, Jacob y recuperación de Theis según se contara o no pozo de observación como se describiese en el acápite metodológico 2.2.5.2.

En el caso del nivel acuífero localizado en los depósitos eólicos cuaternarios, la única posibilidad fue realizar ensayos en pozos de gran diámetro (Figura 3.5.8) por lo cual el método analítico utilizado fue el de Papadopoulos & Copper.

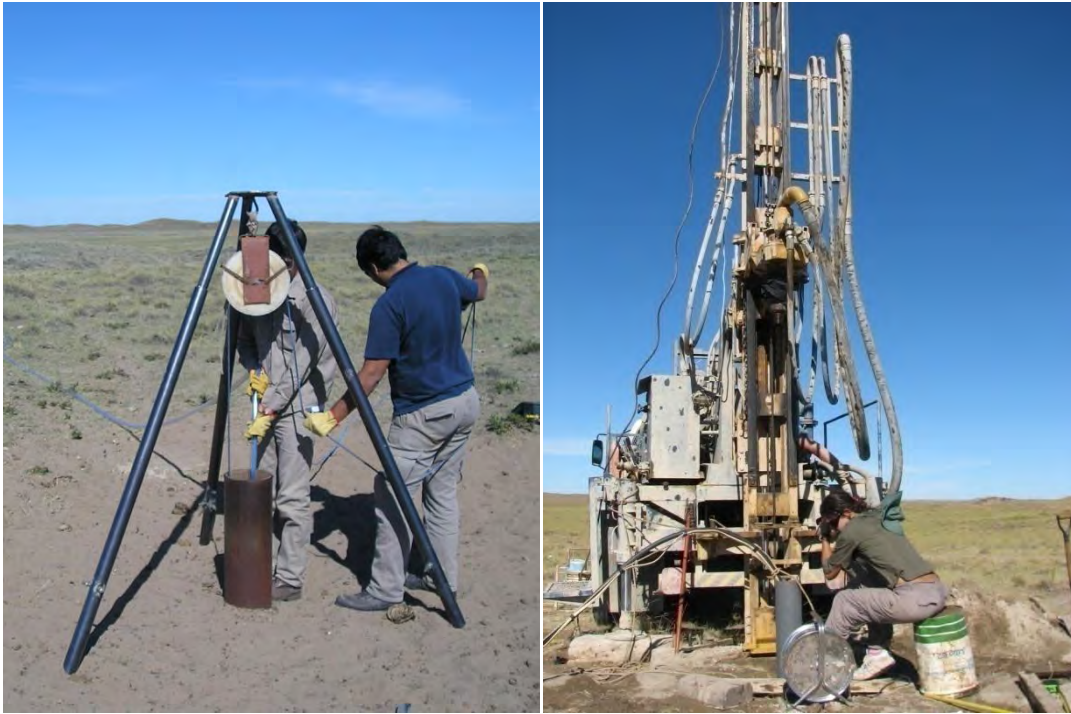


Figura 3.5.7.: Ensayos de bombeo en el pozo de diámetro convencional



Figura 3.5.8.: Pozos de gran diámetro

A continuación se exponen (Tabla 3.5.1) los resultados obtenidos según la aplicación de los diferentes métodos de análisis resueltos por el programa ACUIFER TEST

(excepto el Papadopulos- Cooper efectuado manualmente) para cada uno de los casos. Las gráficas que posibilitaron estos resultados están incluidas en el anexo (Figuras A.3.5.11. a la A.3.5.17.).

Tabla 3.5.1: Ensayos hidráulicos

	T (m <sup>2</sup> /día)	K (m/día)	S	T vertical (1/día)
<b>POZO 141 (depósitos eólicos)</b>				
PAPADOPULOS	44,88	24,99		
<b>POZO SJ-X1 (Fm. Puerto Madryn, 1er. Nivel acuífero)</b>				
THEIS (recuperación)	5,24	4,99 x 10 <sup>-1</sup>		
<b>POZO TR-X2 (Fm. Puerto Madryn, 1er. Nivel acuífero)</b>				
THEIS (recuperación)	7,91 x 10 <sup>-1</sup>	4,08 x 10 <sup>-2</sup>		
<b>POZO P14 (Fm. Puerto Madryn, 2do. Nivel acuífero)</b>				
THEIS (recuperación)	5,51	2,75		
<b>POZO PO14 (Fm. Puerto Madryn, 2do. Nivel acuífero)</b>				
THEIS	2,10 x 10 <sup>1</sup>	1,05 x 10 <sup>1</sup>	2,32 x 10 <sup>-4</sup>	
JACOB	3,58 x 10 <sup>1</sup>	1,79 x 10 <sup>1</sup>	1,61 x 10 <sup>-4</sup>	
HANTUSH	2,03 x 10 <sup>1</sup>	1,01 x 10 <sup>1</sup>	2,13 x 10 <sup>-4</sup>	1,58 x 10 <sup>-3</sup>

### 3.5.2.2. Zona No Saturada (ZNS)

La zona No Saturada, de aireación o vadosa, corresponde a la porción vertical del perfil de subsuelo situada entre la superficie freática y la del terreno.

Se trata de un sistema multifásico conformado por las fases sólida (partículas o clastos del terreno más la masa radicular), líquida (agua) y gaseosa (Oxígeno, CO<sub>2</sub>, vapor de agua), cuya importancia dentro del análisis hidrodinámico radica en que ocurren precisamente en ella los dos fenómenos principales y de vector vertical en la fase terrestre subterránea del ciclo hidrológico, la evapotranspiración y la infiltración, ambos de carácter esencial para el conocimiento de la recarga de los sistemas acuíferos, (Hernández M. A., 2001).

Ocurren también en la ZNS las manifestaciones más relevantes de atenuación natural de la contaminación en el medio subterráneo, tanto de carácter geoquímicas como

microbiológicas. Dentro de las primeras pueden mencionarse la oxidación y precipitación de metales pesados, la complejación de compuestos orgánicos, el intercambio iónico y la hidrólisis. En el caso de las segundas, la microvida aeróbica que lleva a cabo la degradación o digestión de contaminantes biogénicos así como también ocurrencia de la fijación del Hierro por parte de bacterias aeróbicas, (Hernández M. A., 2001).

Como se verá más adelante, al tratar el capítulo correspondiente a la hidrología ambiental, el espesor de la ZNS adquiere particular importancia en el análisis de la vulnerabilidad del acuífero freático.

### **Espesores**

A continuación se describen, a partir de los mapas de isopropundidad del nivel freático (equipotencial de la ZNS), los distintos rangos de espesor que caracterizan a esta franja del terreno, en función del espacio y del tiempo.

La primera apreciación que surge de analizar conjuntamente las representaciones gráficas de los periodos 2005, 2006, 2007 (Anexo figuras A.3.5.18, A.3.5.19., A.3.5.20 respectivamente), y 2008 (Figura 3.5.9.) es la similitud que muestran en cuanto a la distribución general de los espesores de la ZNS.

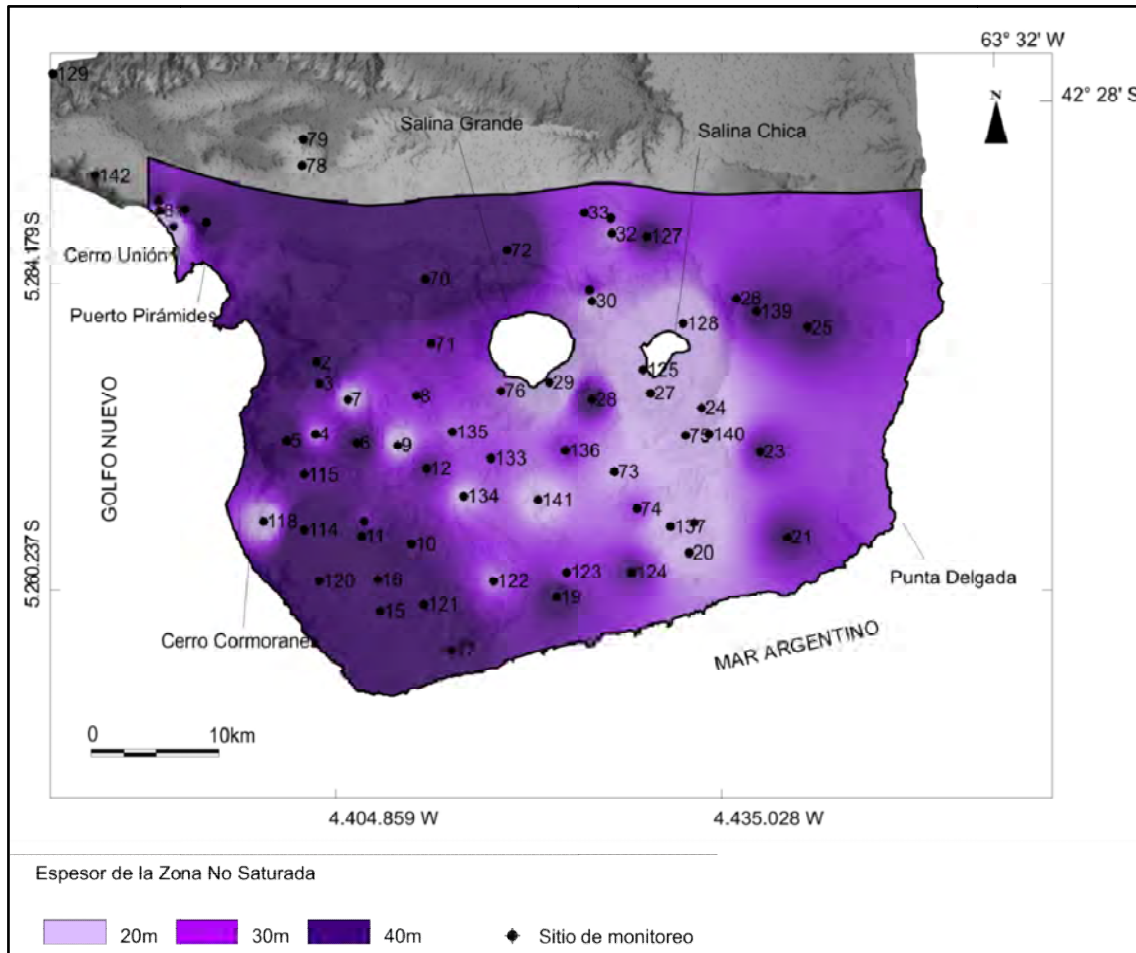
De manera regional, puede dividirse el área en tres sectores de diferentes características en cuanto a la potencia de la ZNS (Figura 3.5.9.):

1. Sector occidental, caracterizado por presentar espesores superiores a 40 m y los máximos de toda el área de estudio, con valores importantes de 70 m, 66 m y 65 m para los pozos 120, 72 y 2 respectivamente.

Se desarrolla al Noroeste, Oeste y Suroeste de la salina Grande, abarcando completamente lo que se definió en el apartado geomorfología como la subunidad Nivel de terraza II. También cubre parcialmente la subunidad Nivel de terraza III y una porción de la unidad Médanos y Mantos arenosos.

2. Sector central, identificado por espesores variables desde 0 a 30 m. Se localiza en las inmediaciones de los bajos de las salinas Grande y Chica, principalmente al Sur de esta última. En este sector se encuentran los mínimos regionales, correspondientes a los manantiales y mallines (sitios de muestreo 27, 29 y 76) ubicados en la margen Sur de ambas depresiones. Otros sitios con potencias reducidas corresponden a los pozos 75 y 137 (profundidades de 5 m y 10 m respectivamente), localizados en áreas deprimidas cubiertas por médanos.

3. Sector oriental, con espesores intermedios fluctuantes entre 30 m y no más de 45 m. Se desarrolla en el ámbito al Noreste, Este y Sureste de la Salina Chica y limita al Este con el Océano Atlántico. Espacialmente, coincide con la subunidad geomorfológica Nivel de terraza III.



Si bien los cuatro años analizados responden la regionalización planteada, es necesario resaltar que el mapa correspondiente al relevamiento 2005 muestra en general valores levemente menores en cuanto a la profundidad del nivel del agua, a diferencia de los otros años donde la imagen perceptible es prácticamente idéntica.

### Fluctuaciones freáticas

Una vez caracterizada regionalmente la ZNS se procedió a describir y analizar las fluctuaciones de la superficie freática entre mediciones anuales sucesivas y máximas absolutas para el periodo 2005- 2008.

El carácter anual de las mediciones, permite estudiar las grandes oscilaciones, ya sea debidas a estacionalidad de régimen, a los bombeos, a recarga natural o variaciones en la explotación, siendo difícil en general determinar cuál o cuáles han sido los causantes de las fluctuaciones observadas. Es necesario tener en cuenta que pese al bajo caudal proporcionado por los pozos, la continuidad de la explotación por molinos puede influir en las oscilaciones.

Las oscilaciones del nivel freático no son otra cosa que las variaciones en la potencia de la ZNS. Partiendo de un análisis general, y tomando como base el mapa de las **máximas variaciones absolutas** del nivel freático para el período 2005- 2008 (Figura 3.5.10.), se puede notar que toman valores entre 0 y 10 m siendo lo más frecuente hallarlas del orden de 0 m a 5 m.

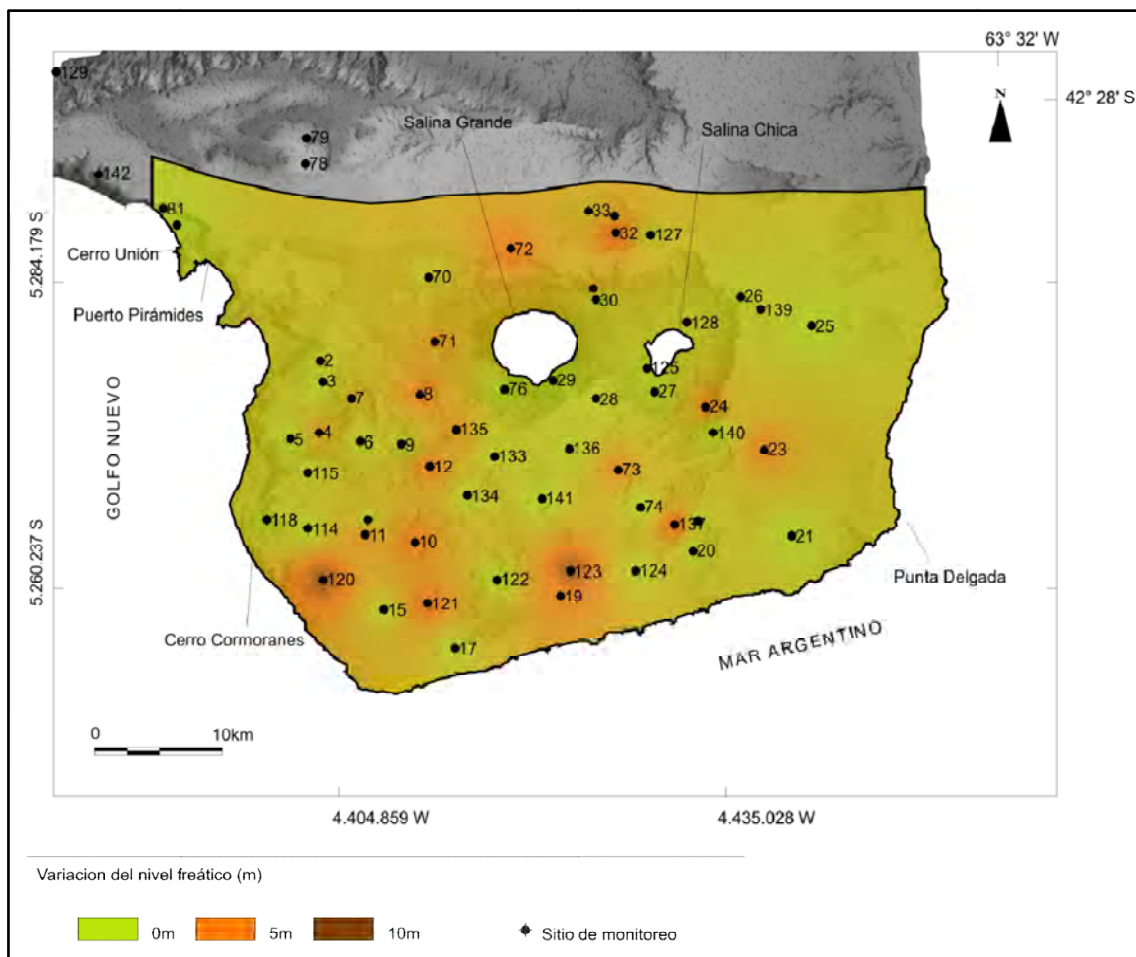


Figura 3.5.10: Máximas fluctuaciones absolutas del nivel freático

En cuanto a su distribución espacial, si bien no exhiben un patrón definido, se aprecia que en general los máximos se localizan en el sector meridional.

Del mapa de **fluctuación de niveles de noviembre 2005 a octubre 2006** (Figura 3.5.11) se denota que existió un aumento de las alturas piezométricas del orden de los 5 m localizadas principalmente en el sector Sur, en coincidencia con la zona medanosa principal.

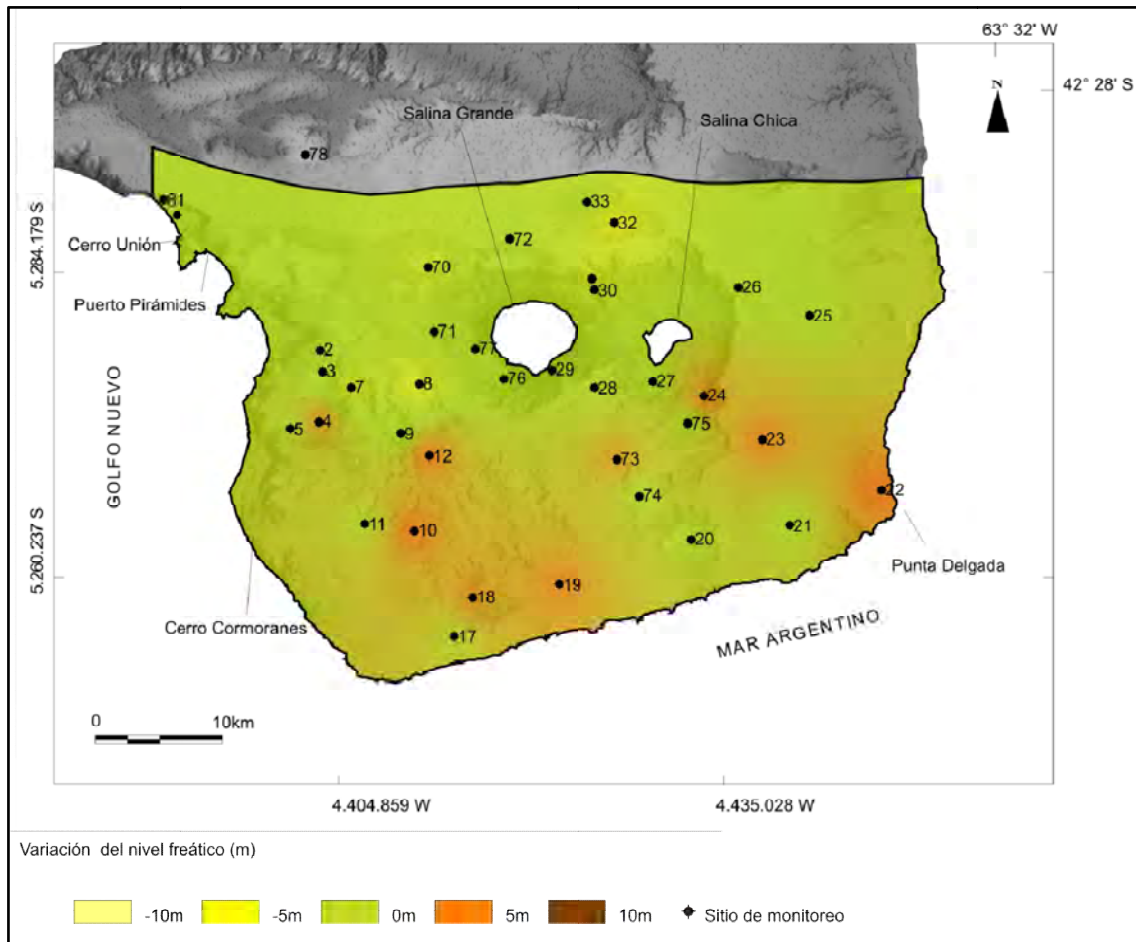


Figura 3.5.11: Fluctuación de niveles de 2005 a 2006

Puesto que se cuenta con la información pluviométrica procedente de la Ea. La Adela para los años 2005 y 2006, es posible analizar dicha fluctuación en función de las precipitaciones, tal como se muestra en el diagrama columnar reproducido en la (Figura 3.5.12).

El año 2005 registró un total de lluvias de 203 mm, valor levemente por debajo de la media histórica (234 mm), pero con una distribución intraanual contrapuesta a la tendencia general para el área dado que el mes más lluvioso se radica en el periodo estival.

Por el contrario, el año 2006 exhibió una media anual de 251 mm, posicionándose por encima de la histórica y con una distribución intranual similar a la regional, pero con un valor anómalo para el mes de Julio.



Este incremento del aporte meteórico por encima de la media histórica para el año 2006, sumado a su máximo mensual de posición invernal donde la evapotranspiración es mínima, representan una combinación favorable para el ingreso de agua al sistema. Caso inverso se presenta en el año 2005 cuando no solo la precipitación fue menor a la de la media, sino que el máximo pluviométrico ocurrió en Diciembre, donde las altas temperaturas y el aumento de las horas de insolación acrecientan la evapotranspiración en detrimento de la recarga.

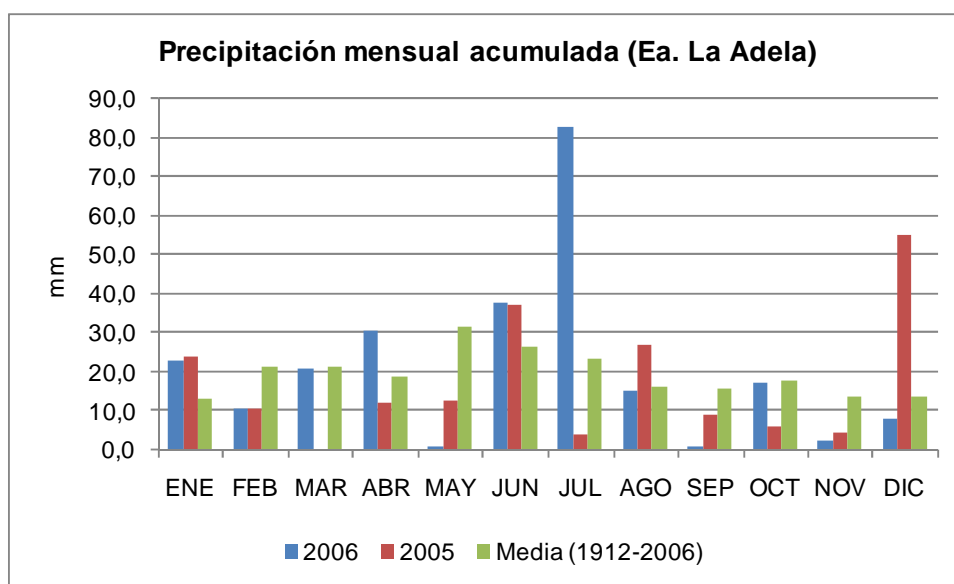


Figura 3.5.12: Precipitación mensual acumulada años 2005 y 2006

Este contraste de situaciones podría ser la causa de la variación positiva de los niveles freáticos observada para el lapso 2005- 2006.

Para el período **octubre 2006 a junio 2007** (Figura 3.5.13) puede distinguirse que en general no hubo cambios significativos de los niveles, habiéndose solo percibido un aumento en cuatro pozos, todos ellos ubicados en la periferia de la zona estricta de estudio (pozos 114, 33, 49 y 124).

Comparativamente con el lapso 2005- 2006, los dos últimos periodos (Figura 3.5.13 y 3.5.14) presentan en líneas generales fluctuaciones negativas de las alturas piezométricas, que como se verá a continuación también se corresponden con los registros pluviométricos.

Dado que no se poseen datos de lluvias de la Ea. La Adela para los dos últimos años, se utilizan los de la estación CENPAT (Puerto Madryn), que como fue mencionado en el apartado hidrometeorología son comparables con los de la zona de investigación.

En la figura 3.5.15 se grafican las precipitaciones mensuales acumuladas en la localidad de Puerto Madryn para los años 2006, 2007 y 2008. En primera visión se aprecia la similitud de estos registros con los de la Ea. La Adela, puesto que las medias mensuales siguen el mismo patrón y el año 2006 registró un pico pluviométrico en el mes de Julio.

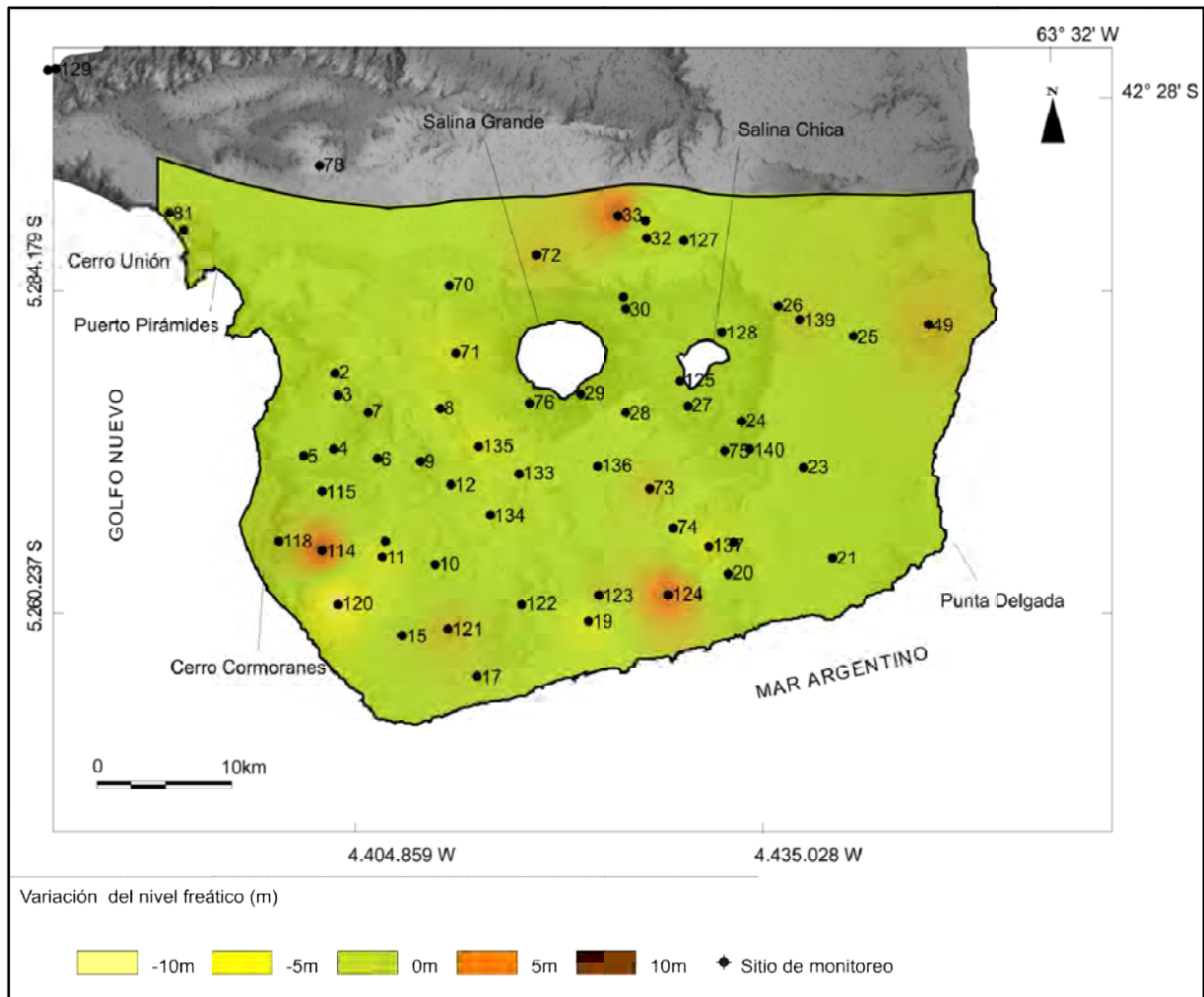


Figura 3.5.13: Fluctuación de niveles de 2006 a 2007

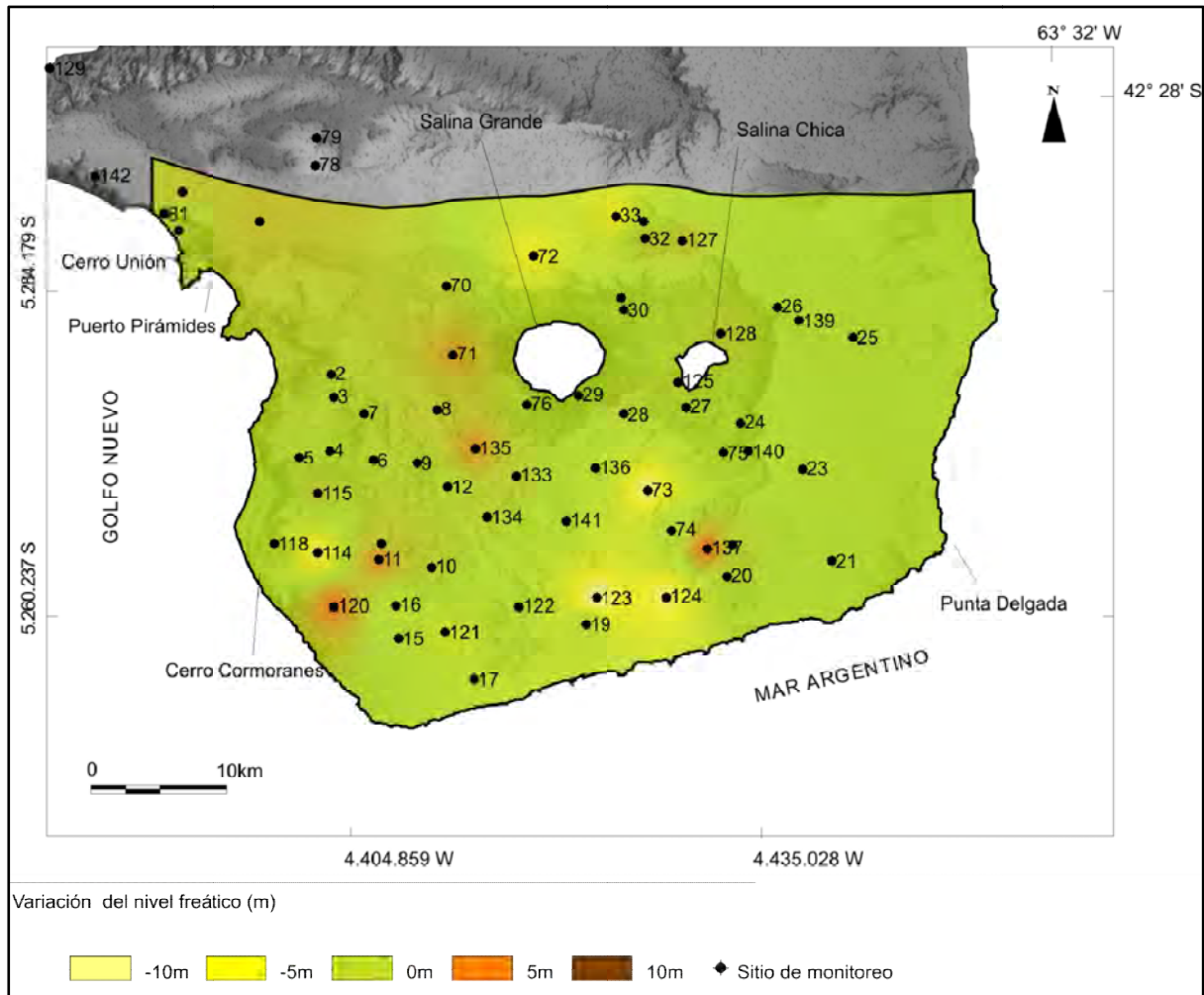


Figura 3.5.14: Fluctuación de niveles de 2007 a 2008

En cuanto al año 2007, se advierte que no ofrece ningún valor anómalo y que su distribución tampoco sigue la registrada históricamente. Por su parte en el año 2008, si bien las precipitaciones acuerdan con la distribución de las medias, no denotan ningún pico pluviométrico significativo.

Es conducente aclarar que el total anual de lluvias caídas en ambos años (145,8 mm para 2007 y 116,2 mm para 2008) están francamente por debajo de la media histórica. Estos datos serían concordantes con la tendencia a la disminución progresiva de los niveles medidos desde el año 2005 al 2008.

Para poder otorgar un orden de magnitud a la variación potenciométrica debida al aporte meteórico, se consideró la precipitación media histórica (234 mm) y dividiéndosela por la porosidad efectiva media (0,125), obteniéndose de esta forma un valor 1,4 m. Esta

magnitud da una idea de la máxima fluctuación posible si consideráramos hipotéticamente que toda la lluvia hubiese ingresado al acuífero.

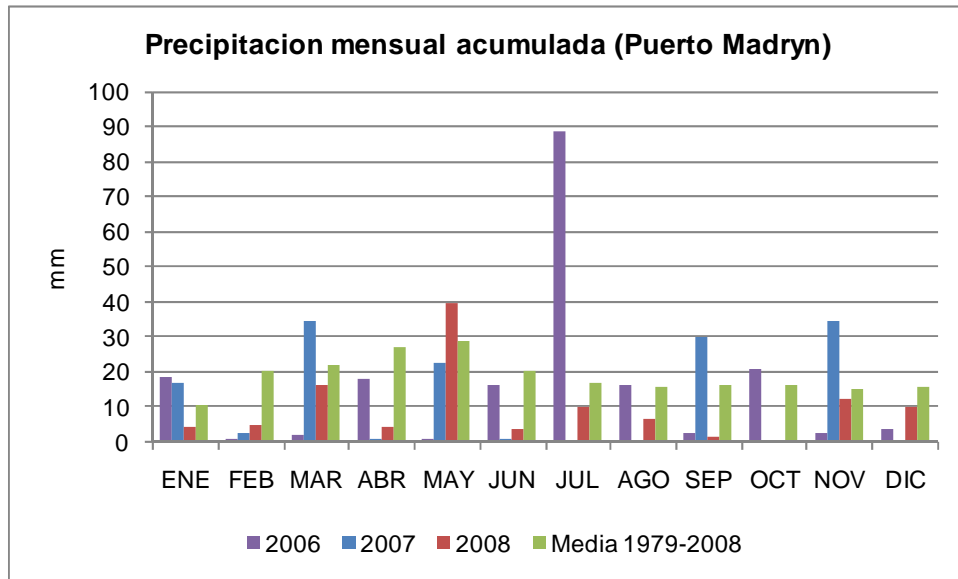


Figura 3.5.15: Precipitación mensual acumulada años 2006, 2007 y 2008

No obstante y dado que se registraron fluctuaciones mayores a esta cantidad, es dable razonar que no podrían ser atribuidas exclusivamente a las precipitaciones puesto que la gran mayoría de los pozos son sometidos a bombeo, con la salvedad más arriba planteada respecto al régimen extractivo.

La explotación del acuífero, destinada al consumo ganadero, es suplementaria de la presencia de agua en las lagunas efímeras. Por lo tanto la necesidad de bombeo de agua subterráneas se produce fundamentalmente en los años más secos donde aquellas no son capaces de atender los requerimientos. En dichos momentos se producen lógicamente las mayores variaciones de nivel.

Independientemente de la extracción, se observó que aquellos pozos someros que alumbran los acuíferos cuaternarios (arenas y gravas) como los denominados 81, 82 y 9 no presentaron fluctuaciones significativas y que por el contrario, la gran mayoría localizada en el acuífero terciario, de características limo-arenosas, ha tenido variaciones del nivel del orden de los 5 m.

Este dispar comportamiento de uno y otro acuífero se debería, en principio, a la diferencia granulométrica que presenta el material, mostrando las arenas una franja capilar reducida que no supera el metro y los limos en cambio ante determinados estímulos han fluctuado con valores que superan los 5 m.

### 3.5.2.3. Zona Saturada (ZS)

La Zona Saturada corresponde al perfil del terreno localizado directamente por debajo del nivel piezométrico y que se caracteriza por presentar todos sus intersticios ocupados por agua.

Se desarrollarán a continuación los aspectos cuali-cuantitativos del circuito recarga-circulación-descarga, que caracterizan hidrodinámicamente al acuífero freático en estudio.

#### **Recarga**

La posible localización del fenómeno de recarga se reconoce a partir de la configuración de la red de flujo hidrodinámica y de las características físicas de la comarca, identificándose un tipo de recarga autóctona directa para el acuífero freático y una autóctona indirecta, a través del mismo, para los niveles acuíferos inferiores.

Para aquellos acuíferos terciarios registrados en las perforaciones históricas en niveles cercanos a los 250 m bbp se supone una recarga profunda si es que ocurre localmente, o de carácter exógeno (alóctona), no analizada por escapar a la esencia del tema bajo investigación.

#### *Cuantificación*

A pesar de que la recarga constituye el proceso más importante dentro del circuito hidrodinámico, puesto que es la función de ingreso de agua al sistema, sigue siendo hasta la actualidad uno de los tópicos que mayores dificultades acarrea al momento de intentar cuantificarlo, especialmente en las regiones áridas donde los insumos necesarios para su estimación son en general insuficientes y el régimen climático plantea una complejidad evidente.

El área de estudio, dada la configuración de sus límites (al Norte una divisoria de aguas subterránea y el resto del perímetro constituido por la zona costera como borde negativo), descarta la posibilidad de aporte subterráneo alóctono para el principal acuífero en estudio, y a sabiendas que no existe agua importada al sistema, solo queda como alternativa para justificar la presencia local de caudales subterráneos reconocibles, el aporte meteórico.

Se considerarán inicialmente el resultado aportado por los métodos utilizados para dimensionar la recarga y a continuación, los mecanismos actuantes responsables de que este fenómeno ocurra en una comarca de características áridas.

En función de los datos climatológicos disponibles y de las mediciones piezométricas realizadas, se intentó cuantificar esta variable bajo los métodos balance hidrológico del suelo y fluctuaciones piezométricas.

- **Balances hidrológicos**

El balance hidrológico modular, tanto a nivel regional como de suelo, sigue siendo el método más difundido y utilizado para el cálculo de recarga (Carrica, 2009), excepto en regiones áridas donde pierde virtualidad.

Tal como se explicara en el apartado hidrometeorología, los balances de suelos **modulares mensuales** (Tabla 3.5.2.: Balance hídrico modular), solo fueron utilizados con la intención de localizar la distribución intraanual de los déficits y excesos y clasificar climáticamente la región, y no para cuantificar la recarga dado que como es sabido en el caso de la expresión de Thornthwaite (1948), el propio autor descalifica su empleo para climas extremos, donde por otra parte no existe cobertura vegetal completa ni de tipo mesófito.

En general, cualquier método empírico o semiempírico modular mensual o anual que se utilice en comarcas áridas o semiáridas para estimar la evapotranspiración real, va a arrojar un estado deficitario y por ende, estaría descartando numéricamente la posibilidad de recarga autóctona en los sistemas acuíferos del lugar (Hernández, 2005b).

A diferencia de los balances modulares mensuales, los de **paso diario** registraron excesos para casi todos los meses, tanto en el efectuado con el total de las precipitaciones como en el que sólo consideraron las lluvias calificadas (mayores a 5 mm).

Se incluye a continuación (Tabla 3.5.2), la síntesis anual del balance de paso diario realizado con las lluvias calificadas del lapso 1982-2001 y para una reserva de agua útil del suelo de 25 mm tal como se adelantara en el apartado 2.2.1.9.

Si se considera la precipitación media histórica (239 mm) de la estación utilizada, puede apreciarse que la **recarga estimada** por este método representa el **24 % de total de lluvias** caídas en el período considerado y un 31 % del neto calificado.

Tabla 3.5.2: Síntesis anual del balance de paso diario

Año	Pp calificada	EVTR	Exc
1982	235	138,5	97,5
1983	219	135,1	84
1984	208	173	35
1985	149	97,2	51,9
1986	61	58,9	0
1987	261	169,6	93,5
1988	50	50	0
1989	61	61	0
1990	108	90,1	17,9
1991	229	145,3	82,3
1992	337	173,3	163,9
1993	118	111,8	5,4
1994	92	82,3	9,5
1995	257	185,5	69,8
1996	85	78,5	9,2
1997	281	195,7	83,9
1998	345	113,2	234,2
1999	287	217	69,9
2000	131	115,3	14,8
2001	181	150,2	30,8
<b>PROMEDIO</b>	<b>185 mm</b>	<b>127 mm</b>	<b>58 mm</b>

- Análisis de las fluctuaciones de los niveles freáticos

Para poder realizar una buena estimación de las reservas reguladoras a partir del análisis de la fluctuación de niveles de la superficie freática, es óptimo contar una serie de piezómetros con registros continuos y que lógicamente, no estén mayormente afectados por la extracción, dado que ello enmascararía las variaciones naturales.

Desafortunadamente no se cumplen rigurosamente para el área, ninguna de las dos condiciones, ya que los registros son de paso anual y la gran mayoría de los pozos son para uso ganadero como se mencionara, con descarga continua por los molinos, aunque con reducido caudal

Existen 3 pozos en desuso (3, 5 y 118) alejados de la influencia de otros en explotación, donde las oscilaciones máximas de niveles medidos entre los distintos años (0,38 m 0,28 m y 0,61 m respectivamente) podría atribuirse a fluctuaciones naturales y fueron por lo tanto utilizados para los cálculos correspondientes.

Si se considera el valor medio hipotético de la altura (420 mm) multiplicado por la porosidad efectiva estimada (0,125), se obtiene un valor de altura de la lámina de agua de 74 mm, lo cual representaría aproximadamente el 30 % de las precipitaciones medias históricas.

En función de la recarga estimada a partir de los excesos del balance de paso diario (58 mm) y de la obtenida por el método de fluctuaciones piezométricas (74 mm), se observa una correspondencia bastante buena entre ambos métodos de cálculo lo que permitiría corroborar que las hipótesis asumidas para su aplicación resultarían válidas o al menos las más plausibles.

Si bien dentro de los métodos de **cálculo de la recarga** más utilizados en zonas áridas y semiáridas se encuentran, con las dificultades ya discutidas, los balances hidrológicos y el análisis de las fluctuaciones piezométricas, existen otros también de uso frecuente, como lo son la medición de pérdidas de caudal en cursos influentes y manantiales, los modelos numéricos, los métodos empíricos y los trazadores naturales (Carrica, 2009), que dadas las características hidrogeológicas del área o los datos disponibles hasta el momento, no han podido ser realizados por falta de información suficiente para el modelo hidrogeológico reconocido "a priori".

#### *Mecanismos de recarga*

La ocurrencia de recarga efectiva en comarcas donde existe un manifiesto déficit hídrico modular podría deberse, entre otros, a los siguientes mecanismos: reducción real de las pérdidas consuntivas, infiltración rápida, concentración rápida, recarga diferida, influencia de cursos perdedores y mecanismos concurrentes, (Hernández, 2005b).

De los identificados por dicho autor, se describen y ejemplifican a continuación solo los presentes en el área de estudio, ya que dos de ellos no cuentan con los elementos físicos indicados, como pendientes con acuífugos de base (concentración rápida) y cursos de agua, como ya se mencionara.

- Reducción real de las pérdidas consuntivas

Las características áridas de la patagonia extrandina, definen un tipo de vegetación (xerófita) que presenta diversos caracteres adaptativos a la falta de agua (Rolando, *et.al.* 1998) entre ellos:



- Arbustos áfilos o con hojas pequeñas o escamiformes, envoltura resinosa, pelos, cutículas engrosadas, estomas modificados, espinas (*Chuquiraga sp.*, *Prosopidastrum globosum*, *Condalia microphylla*), (Figuras 3.5.16. y 3.5.17 ).
- Hojas plegadas o convolutas y cutículas gruesas (*Stipa, sp.*, *Sporobolus rigens*), (Figura 3.5.18. y 3.5.19.).



Figura 3.5.16: espinas y reducción foliar



Figura 3.5.17: afilia



*Figura 3.5.18: hojas convolutas*



*Figura 3.5.19: hojas convolutas*

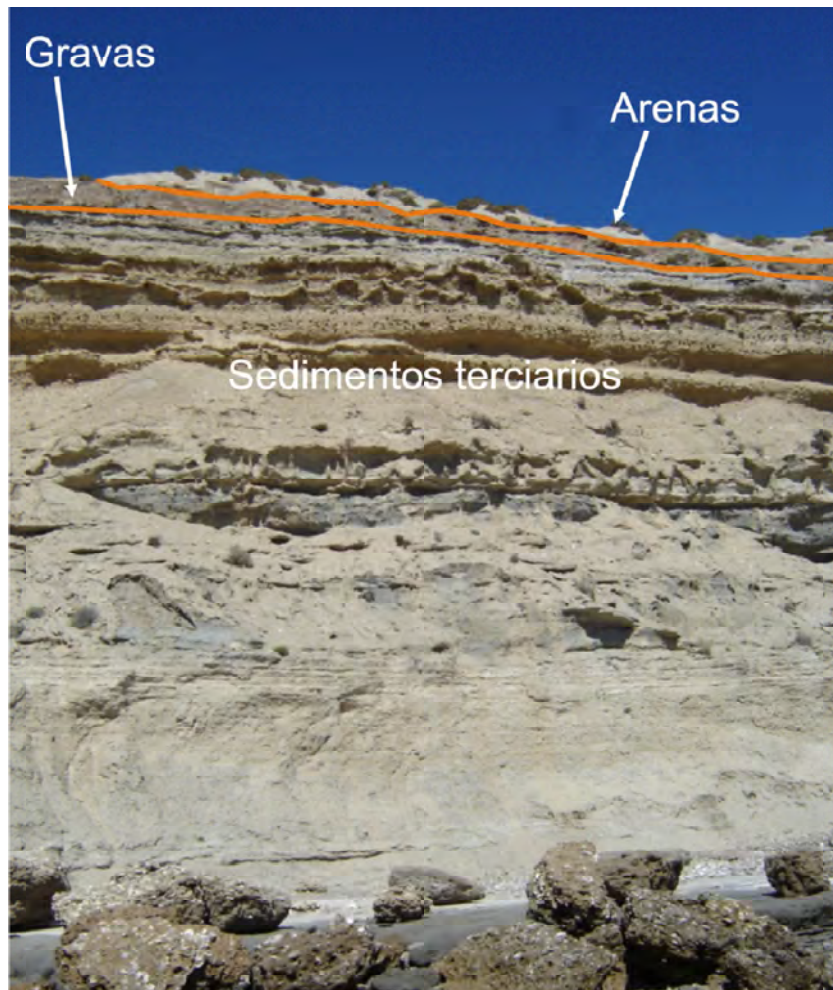
Estas modificaciones minimizan la evapotranspiración optimizando las reservas de agua de la planta. De ese modo, a pesar de las escasas precipitaciones, las xerófitas utilizan el agua fisiológicamente necesaria y la restante continúa el tránsito por la ZNS como agua grávida con destino a la zona saturada.

A estas adaptaciones hay que sumarle que la cobertura vegetal rara vez alcanza el 80 % siendo lo más frecuente encontrar valores del 60 % y llegando casi a 0 % en los médanos activos.

- Infiltración rápida

Este mecanismo tiene lugar cuando los materiales geológicos superficiales son de alta permeabilidad, de manera que el agua de infiltración inicial es en consecuencia sustraída rápidamente al efecto consuntivo y se transforma en infiltración efectiva, alcanzando la zona saturada, que generalmente es profunda, (Hernández, 2005b).

La geología superficial de la zona de estudio, se caracteriza por la presencia de materiales clásticos de granulometría media a gruesa (arenas eólicas, gravas glaciafluviales, depósitos de aluvio y coluvio) depositados directamente por encima de los sedimentos terciarios, tal como puede observarse en el acantilado costero expuesto en la Figura 3.5.20.



*Figura 3.5.20: depósitos de granulometría media a gruesa sobre sedimentos terciarios*

Los depósitos eólicos correspondientes a la unidad geomorfológica médanos y mantos arenosos desarrollada en todo el sector Sur del área (Figura 3.2.1: Mapa geomorfológico), conforman una unidad de alta permeabilidad primaria que, yace por encima de los Rodados Patagónicos que cubren los sedimentos terciarios, o directamente sobre estos últimos.

Entre las unidades medianosas hay que diferenciar entre los depósitos eólicos antiguos (fijados por vegetación) (Figura 3.5.21) y aquellos activos que carecen completamente de vegetación o desarrollo edáfico (figuras 3.5.22 y 3.5.23. ), ya que si bien ambos representan optimas condiciones para la infiltración rápida, los segundos constituyen las máximas oportunidades de que dicho mecanismo tenga lugar.



*Figura 3.5.21: Médanos vegetados. Sur de Península Valdés*

Esta conformación vertical del perfil hidrogeológico permite que la precipitación que alcanza una superficie altamente permeable, descienda rápidamente hacia la formación terciaria dando lugar a la recarga del acuífero.



Figura 3.5.22: Médanos activos Sur de Península Valdés (Foto: Gentileza Andrés Jhonson)



Figura 3.5.23: Médanos activos del Sur de Península Valdés. (Foto: Gentileza Andrés Jhonson)

En la figura 3.5.24, se esquematiza el sector del perfil hidrogeológico donde se presentan las mejores condiciones de que este mecanismo sea efectivo.

También concurre a este mecanismo la generalmente baja capacidad de retención de agua de los suelos típicos de regiones áridas (*Aridisoles* o *Entisoles* u otros carentes de un horizonte retentivo), que con sus reducidos valores de capacidad de campo facilitan precisamente la ocurrencia de velocidades de infiltración relativamente altas, (Hernández, 2005b).

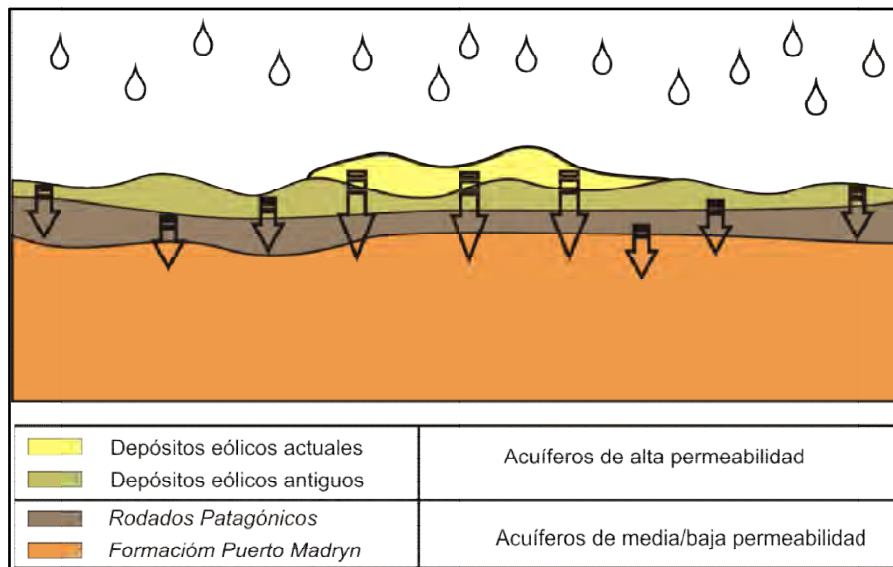


Figura 3.5.24: Infiltración rápida en área medanosa

En el área se encuentran ambos tipos de suelos, los *Aridisoles* asociados principalmente a las planicies aterrazadas, tal como se puede observar en las cavas cercanas a la Salina Grande. Los *Entisoles*, en cambio, se desarrollan sobre los médanos y mantos arenosos del sector Sur, dentro de los que dominan los *Torripsamentes xéricos* definidos por el desarrollo de un horizonte AC de textura arenosa uniforme de entre 60 cm a 1 m, (Rostagno, 1981).

Para suelos similares a los descriptos se mencionan valores de retención específica incluso inferiores a los 10 mm (Ferrer, et.al, 1990), de manera que favorecen la inmediata infiltración.

- Recarga diferida

Es un mecanismo asociado a la permanencia de nieve, heladas y suelos congelados (permafrost) durante la estación invernal y su incorporación más o menos rápida al régimen subterráneo cuando comienza la estación primaveral, (Hernandez, et.al, 2009).

Dadas las condiciones climáticas del área (temperaturas por encima de los cero grados centígrados durante la mayor parte del año, y registros nivales escasos) este es un proceso que ocurriría solo en situaciones muy particulares de grandes nevadas o años excepcionalmente fríos. No tendría por lo tanto mayor trascendencia local en cuanto al monto de aportes efectivos.

- Mecanismos concurrentes

Pudo constatarse la convergencia de los mecanismos de infiltración rápida y de reducción de las pérdidas consuntivas para toda el área ocupada por médanos y mantos eólicos.

En ellos la presencia de arenas sueltas, suelos de muy escaso desarrollo o ausentes además de la vegetación rala y de tipo xerófito representan las condiciones óptimas de recarga para el área.

En la Figura 3.5.25 se esquematiza la mecánica descrita, para el ámbito local.



Figura 3.5.25: Esquema mecanismos concurrentes

### **Circulación**

Se procedió como primer elemento analítico, a una caracterización regional de la red de flujo subterránea para lo cual se elaboró un mapa equipotencial de toda la Península Valdés, a partir de los datos relevados en la campaña 2005 (89 puntos de monitoreo entre perforaciones y manantiales), de la manera descrita en el acápite metodológico 2.2.5.2.

En base al trazado de las curvas equipotenciales, divisorias de aguas subterráneas y filetes de flujo, elementos que se muestran en la Figura 3.5.26. (Mapa equipotencial regional), junto con las características geológicas y geomorfológicas analizadas anteriormente, se condujo a formular las siguientes observaciones:

- Existen dos divisorias importantes, una es aquella que recorre paralela a todo el perímetro de la Península Valdés, separando la descarga exorreica (vertiente atlántica y hacia los golfos Nuevo, San José y San Matías), de aquella endorreica con destino final en los bajos centrípetos de El Gran Salitral y de las Salinas Grande y Chica. La otra es la que la divide latitudinalmente la zona de investigación a la altura del istmo, en los sectores Norte y Sur.
- Se manifiestan marcadamente dos tipos de hidroformas dentro de un patrón general radial: las tendientes a cilíndricas divergentes y a las convergentes.
- Dentro de las primeras la más conspicua se localiza al Sur del área, coincidente con el área medanosa y la que sigue en orden de importancia, sobre los cordones de rodados de la Caleta Valdés en el área centro oriental.
- Las hidroformas convergentes se localizan principalmente sobre los tres grandes bajos salinos mencionados anteriormente.

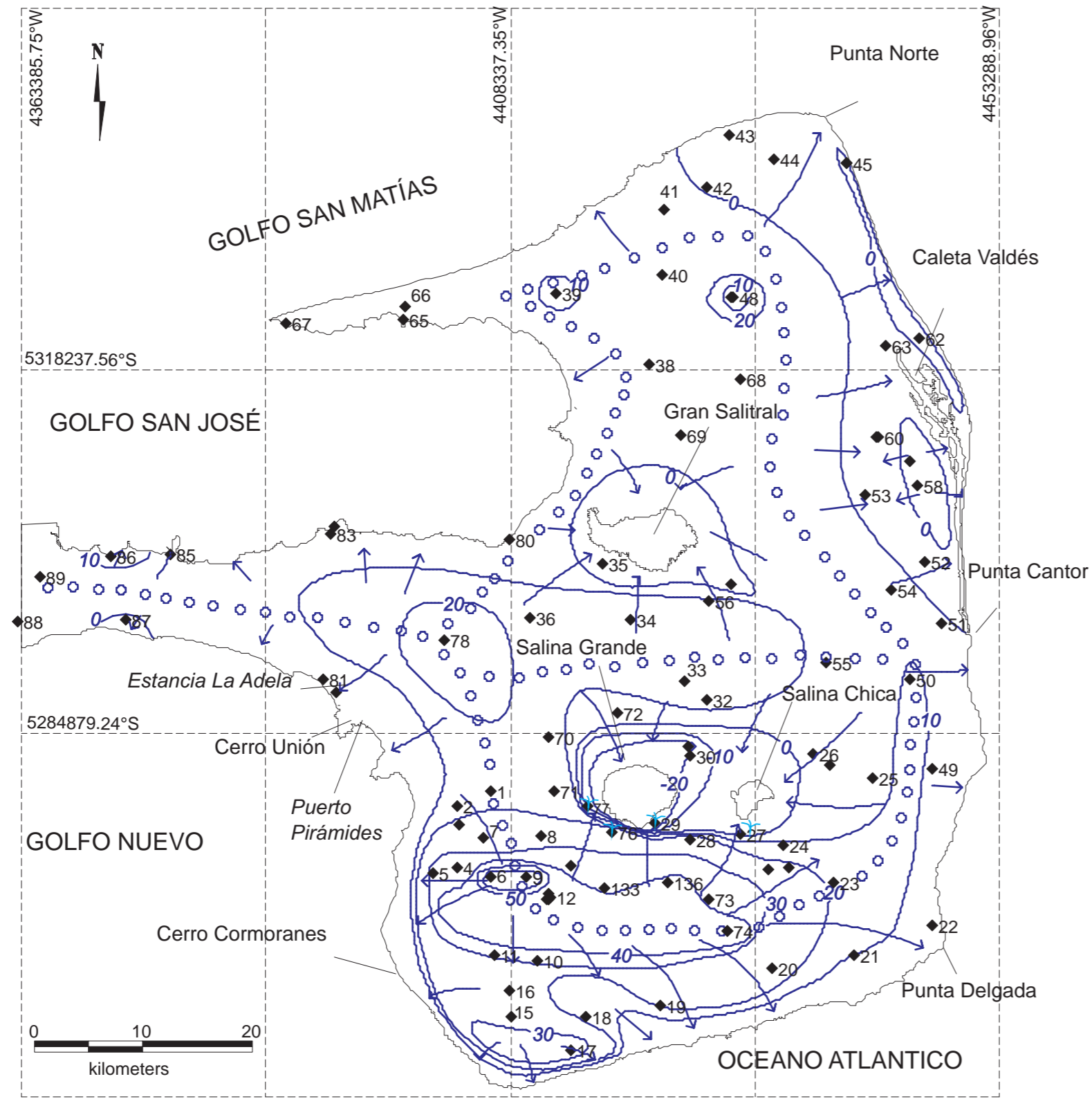
Una vez establecidas las características regionales se pudo avanzar en la definición con criterio hidrodinámico de los límites de la zona de Tesis, dándole de esta forma el necesario marco regional al comportamiento del agua subterránea y pudiendo continuar entonces con la caracterización específica para el área bajo estudio.

Fue de esta forma como se llegó a la decisión de centralizar la investigación en el sector meridional ubicado al Sur de la divisoria que orientada en sentido Este-Oeste por el centro de la península.

Como se adelantara en el apartado de metodología, se realizaron campañas de densificación y monitoreo de niveles en los años 2006, 2007 y 2008 que acudieron a totalizar una red de 80 puntos de control solo en el sector de investigación, además de los periféricos regionales.

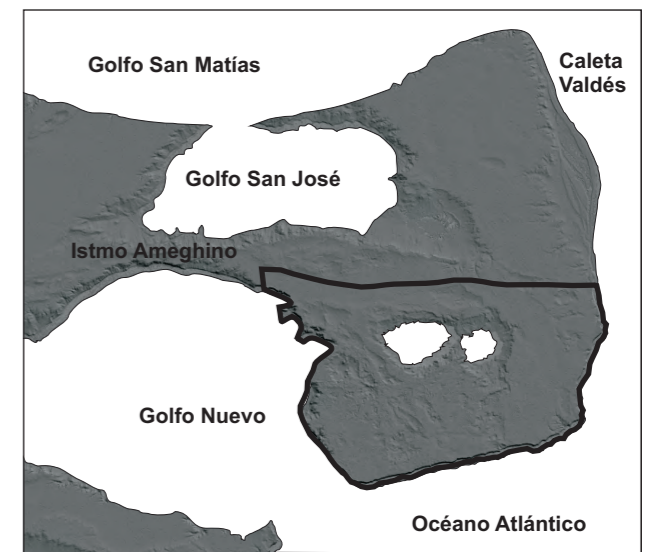
A partir de la información relevada se elaboraron los mapas equipotenciales correspondientes a cada una de las tres posiciones temporales mencionadas sobre cuya base se concretará la interpretación. (Figura 3.5.27: Mapa equipotencial 2008 y en el anexo Figuras A.3.5.21. y A.3.5.22.: Mapas equipotenciales 2006 y 2007 respectivamente).





*“Investigación geohidrología en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

Ubicación del area de estudio

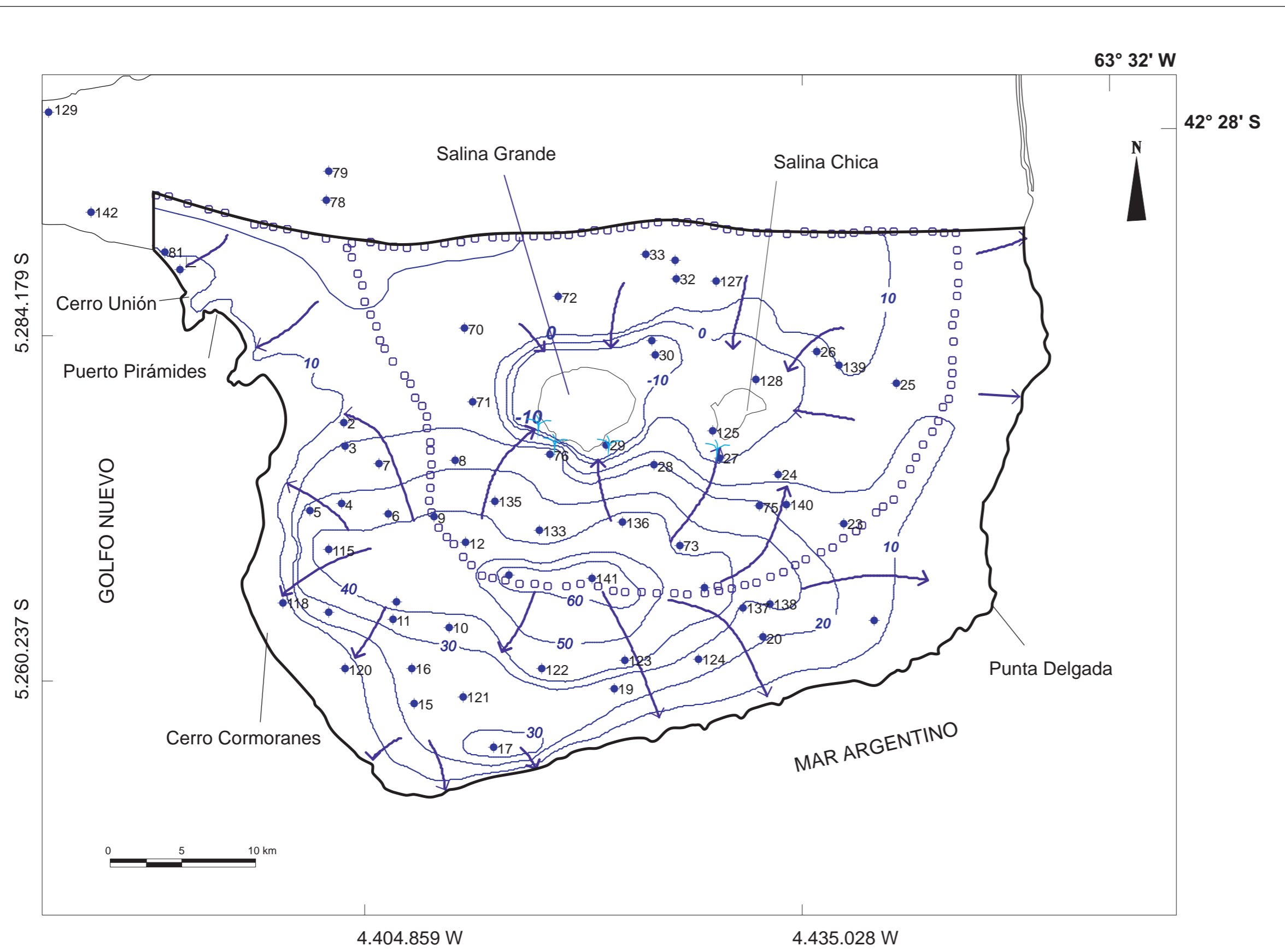


MAPA EQUIPOTENCIAL  
NOVIEMBRE 2005

REFERENCIAS

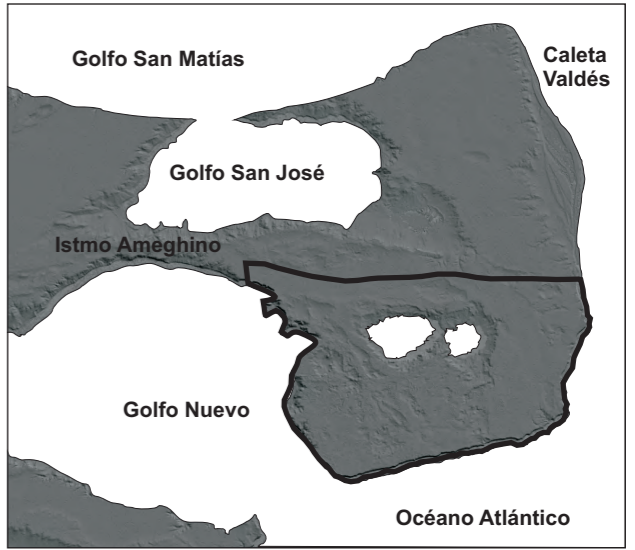
- Curva equipotencial (m s/0IGM) Equidistancia: 10m
- ○ ○ ○ Divisoria de aguas subterráneas
- Filete de flujo
- ◆ Sitio de monitoreo
- ⋈ Manantial

Figura 3.5.26



*“Investigación geohidrología en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

Ubicación del area de estudio



MAPA EQUIPOTENCIAL  
MARZO 2008

REFERENCIAS

- Curva equipotencial (m s/0IGM) Equidistancia: 10m
- ○ ○ ○ Divisoria de aguas subterráneas
- Filete de flujo
- Sitio de monitoreo
- ⋈ Manantial

Figura 3.5.27

Teniendo en cuenta que las protuberancias o depresiones de la superficie piezométrica generalmente responden a pérdidas o aportes locales de agua y más raramente a variaciones de la permeabilidad o de la morfología del sustrato (Castagny, 1975), y además que se trata en este caso de un acuífero en medio poroso de características geológicas (litológicas y morfológicas) relativamente uniformes, se analizarán los diferentes patrones morfológicos reconocibles para acudir a delimitar las áreas de recarga y descarga del sistema.

Del análisis comparativo de las Figuras 3.5.27, A.3.5.21. y A.3.5.22., surge la existencia de un alto piezométrico de morfología predominantemente cilíndrica divergente, ubicado en el sector centro-Sur del área que indica el área preferencial de recarga, ya caracterizado en el inicio de este capítulo.

Con morfología elongada en sentido Este-Oeste, esta hidroforma cubre una superficie del orden de 550 km<sup>2</sup>. Se halla circunscripta por la curva equipotencial de 20 m s/OIGM, alcanzando los máximos valores en la zona central culminando con la isopieza de 60 m s/OIGM.

El agua fluye en esta zona con un gradiente hidráulico medio de 0,62 % fluctuando entre 0,17 % y 1,17 %. Se dirige desde el centro de la hidroforma, coincidente con la divisoria de aguas subterráneas, tanto hacia el Golfo Nuevo como al océano, que constituyen el ámbito de descarga externa o regional del sistema y hacia la zona de las salinas Grande y Chica, que conforman el interno o local.

Coincide claramente esta hidroforma con la unidad geomorfológica de Médanos y Mantos arenosos, tanto sobre los campos eólicos fijos como los activos, donde las mayores alturas piezométricas se localizan sobre la cadena medanosa principal.

Esta elevación piezométrica responde espacialmente a los sitios donde se produce la convergencia de los mecanismos de infiltración rápida y de reducción real de las pérdidas consuntivas, validando de este modo la consideración de ambos en el análisis de la recarga del sistema.

Las principales áreas de circulación quedan entonces definidas entre las zonas medanosas y los grandes bajos, siendo el ambiente de Planicies aterrazadas la geoforma que mejor representa este estadio del circuito hidrodinámico.

El gradiente hídrico (i) promedio es de 0,52%, con máximos del orden de 0,9% periféricos a la hidroforma cilíndrica divergente y mínimos de 0,1% en los sectores Noreste y Noroeste.

Los gradientes aumentan notablemente a medida que el agua transcurre hacia las zonas de descarga, alcanzando en las inmediaciones de los bajos de las Salinas Grande y Chica, valores medios de 1,2% con máximos de hasta el 3%.

#### Velocidad efectiva de flujo

Con los valores de Coeficiente de Permeabilidad (K), de Almacenamiento (S), este último equivalente a la porosidad efectiva ( $\Phi$ ) en acuíferos freáticos, y gradientes hídricos, todos ellos tratados en apartados precedentes, puede estimarse la velocidad efectiva de flujo horizontal en base a la expresión darcyana:

$$V_e = K \cdot i / \Phi$$

Donde:

$V_e$  : Velocidad efectiva [m/d]

$K$  : Coeficiente de permeabilidad [m/d]

$i$  : Gradiente hídrico [ - ]

$\Phi$  : Porosidad efectiva [ - ]

Los valores de  $K$ , obtenidos mediante ensayos hidráulicos tal como se muestra en la tabla Tabla 3.5.1, fluctúan entre  $5 \times 10^{-1}$  y  $4 \times 10^{-2}$  m/d para el primer nivel acuífero localizado dentro de la *Fm. Puerto Madryn*, y el valor de porosidad efectiva se estimó en el orden del 12 %, a partir de tablas, en función de sus características litológicas y granulométricas (Custodio & Llamas, 1976).

Respecto a la permeabilidad especialmente, los valores puntuales estimados por medio de los ensayos, fueron regionalizados de acuerdo a las características hidrolíticas, para arribar a las cifras que a continuación se manejan.

Tomando un valor medio de la permeabilidad y de los gradientes calculados en cada sector, se obtiene para el flujo horizontal del agua subterránea, las siguientes velocidades efectivas de cada uno de los ambientes de recarga- circulación y descarga:

- Recarga:  $V_e = 1,3 \times 10^{-2}$  m/d
- Circulación:  $V_e = 1,1 \times 10^{-2}$  m/d
- Descarga:  $V_e = 2,7 \times 10^{-2}$  m/d

Todos los cálculos de gradientes y de velocidades efectivas medias se muestran en el anexo en la Figura A.3.5.23.

En cuanto al flujo vertical del agua subterránea, no se tienen los elementos necesarios para poder determinarlo, como fuese anticipado al considerar la posibilidad de recarga profunda.

Los escasos perfiles históricos disponibles en la región con esta información, indicarían que en el caso de los acuíferos semiconfinados la transferencia se produciría con sentido descendente, favorecida por una diferencia de carga hidráulica del orden de los 10 m. En los más profundos presumiblemente confinados, no existiría obviamente flujo vertical alguno.

### **Descarga**

Como se anticipara, la descarga regional se localiza en el ámbito del Golfo Nuevo y en el Océano atlántico y, de manera local y endorreica, en las salinas.

No obstante hay que mencionar la descarga consuntiva que se produciría regionalmente de modo directo desde la superficie del suelo hacia la atmósfera, aunque resulta mínima dadas las adaptaciones fisiológicas (vegetación xerófita) y el mecanismo de infiltración rápida anteriormente explicados.

La descarga endorreica se focaliza hacia el Norte, en el bajo que contiene a las salinas Grande y Chica en donde la superficie potenciométrica adquiere una morfología cilíndrica convergente encerrada por una curva piezométrica de 10 m s/0IGM, que desciende hasta los -20 m s/0IGM en el borde de las salinas generándose como se señaló al tratar la circulación, los máximos gradientes de toda la zona.

El agua que fluye desde el área medanosa principal hacia los mencionados bajos, se expresa sobre las laderas Sur (entre cotas topográficas de 0 y -40 m s/0IGM) a modo de **manantiales** (Alvarez *et al.* 2006) (Figura 3.5.28), rasgo hidrogeológico de importancia analítica, o de **manchas de humedad**, (Figura 3.5.29).



*Figura 3.5.28: Manantial*



*Figura 3.5.29: Mancha de humedad*

Los manantiales pueden ser clasificados, según Tolman (1937), como de Mantos clásticos de gran espesor o también conocidos como manantiales de ladera o de Talweg, generados por la intersección del nivel freático con la topografía.

En función de su régimen se presentan tanto de carácter transitorio como perennes, habiéndose registrado en el mapa sólo estos últimos por ser los otros de difícil identificación, ya que se manifiestan principalmente en forma difusa, como mallines en las márgenes de las salinas.

En general, son muy difíciles de aforar dado que se necesitaría realizar una obra de captación que los encauce. Afortunadamente, se contó con la que fuese construida para la vieja toma de agua de Puerto Pirámides, (Figura 3.5.30).



*Figura 3.5.30: Manantial encauzado*

Se midió allí un caudal medio de 154 l/min a partir del cual se lo puede encasillar según la sistemática de Meinzer (1927), dentro de los de orden 5 (entre 38 y 380 l/min).

La identificación más evidente de estos manantiales se logra gracias a las variaciones perceptibles en la vegetación, que en una región de características áridas es fundamentalmente rala y de tipo xerófita, marcando el contraste con sectores densamente poblados por especies de tipo hidrófitas y mesófitas con una diferencia que es fácilmente

individualizable visualmente, como es el caso de las gramináceas en los mallines (Figura 3.5.31).



*Figura 3.5.31: Mallín. Margen Sur de la Salina Grande*

Un rasgo importante para calificar a los manantiales de ladera, es precisamente que la diferencia de densidad y tipo vegetal ocurre a diferentes cotas, a modo de orlas, marcando la variabilidad del punto de descarga.

Se intentó realizar una identificación a partir de la información satelital y de fotografías aéreas, pero lamentablemente la dimensión de los afloramientos de agua es tan reducida que el área involucrada es sensiblemente menor a la registrable a la escala de trabajo.

Con la intención de dimensionar la descarga que se produce hacia los bajos de las salinas Grande y Chica, se calculó el volumen de agua evaporable desde los cuerpos lacunares a partir de la evapotranspiración potencial obtenida de los métodos Penman - Montheit (1267mm/año y Thorntwaite- Matter 704 mm/año).

Se estimó, en el caso de la salina Grande (27 km<sup>2</sup>), un volumen de 19 hm<sup>3</sup>/año según Thorntwaite -Matter y 34 hm<sup>3</sup>/año según Penman –Montieth y en el de la salina Chica (7 km<sup>2</sup>) de 5 hm<sup>3</sup>/año por el primer método y 9 hm<sup>3</sup>/año por el segundo.



En total ambos cuerpos evaporarían potencialmente un volumen del orden de 20 a 40 hm<sup>3</sup>/año y puesto que en el periodo estival se agotan, se debe considerar que el sistema descarga hacia ellos como máximo, un promedio de 30 hm<sup>3</sup>/año.

Paralelamente se realizó el cálculo del caudal de descarga a partir de la ley de Darcy, tomando como perímetro de cálculo a la curva equipotencial cilíndrica convergente de 0 s/0IGM que envuelve a ambas salinas (54 km), gradiente medio de 1,2%, espesor acuífero de 9 m y permeabilidad de 0,27 m/día. Se obtuvo así un caudal medio de descarga, para el bajo que contiene ambos cuerpos salinos, de 0,6 hm<sup>3</sup>/año, magnitud acorde a la estimación anterior puesto que los 30 hm<sup>3</sup>/año representaban el máximo potencialmente evaporable.

La descarga exorreica, producida hacia el Suroeste al Golfo Nuevo y hacia el Sur y Sureste al Océano Atlántico, se manifiesta sobre los acantilados como “chorrillos”, manchas de humedad y cambios de vegetación, fácilmente identificable desde las playas (Figuras 3.5.4 y 3.5.5. mostradas anteriormente al tratar la hidrogeología).

Del mismo modo que para la descarga interna, se estimó para la externa un caudal a partir de la curva equipotencial de 0 s/0IGM que rodea todo el perímetro del área (margen marítimo), con un gradiente medio de 0,8% e iguales espesor y permeabilidad que para el cálculo anterior, en el orden de los 0,9 hm<sup>3</sup>/año.

### 3.5.3. Hidroquímica

En esta sección se tratan las propiedades físico-químicas del agua subterránea y su vinculación con la red de flujo y el medio físico continente, bajo el condicionamiento climático.

Serán analizados en primera instancia el comportamiento de los indicadores hidroquímicos salinidad, pH y alcalinidad para luego abordar el contenido iónico de elementos mayoritarios. La clasificación iónica, se hará teniendo como referencia primaria para el análisis la geoforma a la cual se vinculan y su posición dentro del circuito recarga-circulación-descarga. En cada caso se interpretará su grado de evolución geoquímica en función del fenómeno hidrodinámico.

Las relaciones iónicas, el contenido de elementos minoritarios y la consideración de variaciones temporales completan la caracterización hidroquímica y conducen finalmente a determinar la aptitud del agua para los distintos usos (humano, agrícola y ganadero).

### 3.5.3.1. Contenido salino – Conductividad eléctrica

Un elemento de diagnóstico indirecto muy utilizado al momento de caracterizar la salinidad del agua, es su conductividad eléctrica puesto que se incrementa en función del contenido iónico y consecuentemente, del contenido salino a través de la relación aproximada:

$$\text{Total de sólidos disueltos (TDS)} = \text{Conductividad eléctrica} * 0,7$$

En acuíferos relativamente homogéneos desde el punto de vista hidrológico, la proporción de sales disueltas en el agua aumenta a medida que progresa el recorrido desde las zonas de recarga a las de descarga. De este modo, la conductividad eléctrica pasa a ser una variable muy útil para sustentar el análisis hidrodinámico.

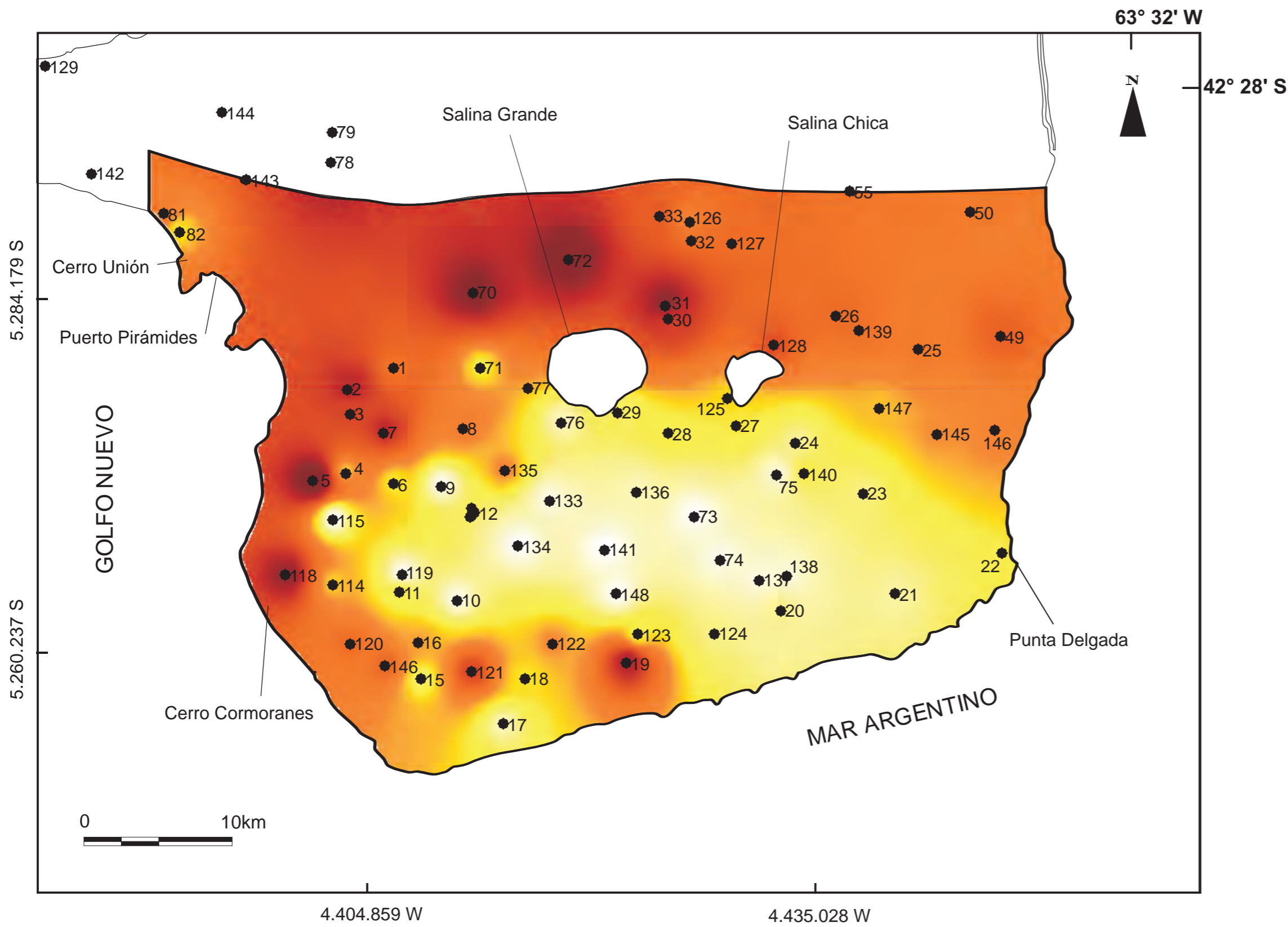
Los mapas de isoconductividad eléctrica realizados para las posiciones Noviembre 2005, Octubre 2006, Junio 2007 y marzo 2008 muestran un comportamiento relativamente semejante entre sí, razón por la cual se eligió la posición más completa (2008) con un total de 72 determinaciones, para abordar la descripción. (Figura 3.5.32., Mapa isoconductividad 2008). El resto de los mapas se muestran en el anexo (Figuras A.3.5.24, A.3.5.25 y A.3.5.26).

La primera característica que se evidencia es la presencia de dos ámbitos claramente diferenciables. Uno de aguas dulces, con conductividades que varían entre los 400 y los 2.000  $\mu\text{S/cm}$  o bien con salinidades conductimétricas entre 280 y 1400 mg/l y otro de características salobres hasta casi salinas con valores que superan los 3.000  $\mu\text{S/cm}$  (2100 mg/l) y alcanzan en sus situaciones extremas los 14.000  $\mu\text{S/cm}$  (9800 mg/l).

#### ***Ámbito de baja salinidad***

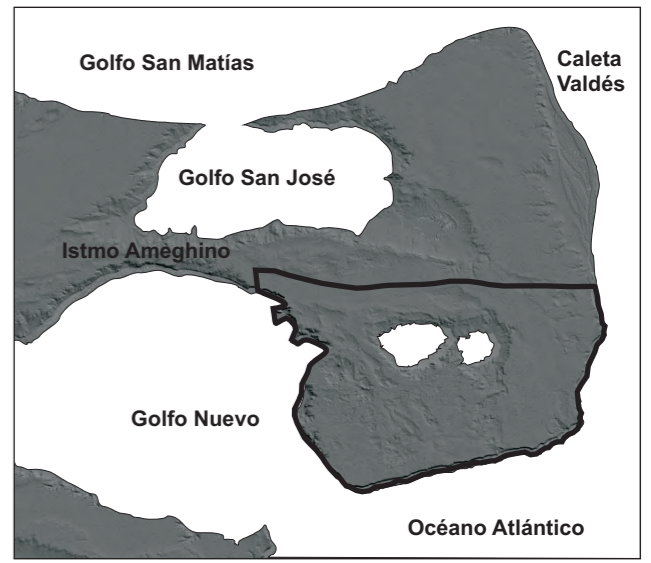
Se desarrolla en el sector Sur del área, coincidentemente con la unidad geomorfológica médanos y mantos arenosos (franja Norte) y con la hidroforma cilíndrica divergente, que fuera definida en el apartado hidrodinámica como la principal área de recarga.

Fue posible constatar que en la parte central de esta zona, se localizan los mínimos conductimétricos, con registros que alcanzan valores de 350  $\mu\text{S/cm}$  (245 mg/l), 446  $\mu\text{S/cm}$  (312 mg/l) y 482  $\mu\text{S/cm}$  (337 mg/l) en los pozos 141, 134 y 115 respectivamente. (Figura 3.5.32., Mapa isoconductividad 2008).



*“Investigación geohidrológica en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

Ubicación del area de estudio



**MAPA DE ISOCONDUCTIVIDAD MARZO DE 2008**

REFERENCIAS

Conductividad uS/cm

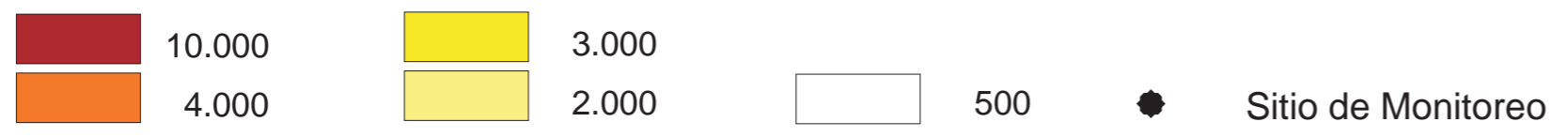


Figura 3.5.32

Analizando el mapa equipotencial 2008 (Figura 3.5.27) conjuntamente con el de isoconductividad para el mismo momento, se observa claramente que los mínimos de conductividad (menores a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) quedan circunscriptos dentro de la curva isopieza de 60 m s/OIGM, y los menores a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dentro de la de 40 m s/OIGM.

De este modo se corrobora un aumento gradual de la salinidad desde el centro hacia la periferia de este sector, coincidente con el sentido de circulación planteado inicialmente al describir la hidrodinámica de la zona de recarga.

Otras situaciones de bajo tenor salino se manifiestan en la franja medanosa ubicada al Sur de la anterior y en los depósitos costeros que bordean el golfo Nuevo (pozo 82).

### ***Ámbito de alta salinidad***

En cuanto a las áreas con conductividades elevadas, se desarrollan en el sector Norte y Oeste del área correspondiendo principalmente a las unidades geomorfológicas Planicies Aterrazadas y Depresiones Endorreicas.

Los máximos valores regionales se localizan sobre el sector Norte de la Salina Grande, pozo 72, con hasta 13.950  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (9765 mg/l) para noviembre de 2005, y sobre otro próximo a la costa del Golfo Nuevo, pozo 5, con 14.280  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (9996 mg/l) para octubre de 2006.

Teniendo en cuenta el análisis hidrodinámico, se verifica que la ubicación general de los valores más elevados corresponde a las zonas de circulación y descarga tanto interna (grandes bajos) como externa (zona costera).

Partiendo del análisis comparativo del mapa de Zona No Saturada (Figura 3.5.9) y del de isoconductividad (Figura 3.5.32) para un mismo periodo (2008), puede notarse la existencia de una marcada coincidencia entre los máximos de una y otra variable, tanto a nivel regional como local. Por ejemplo, para los puntos anteriormente citados, (pozo 72 con 13900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y pozo 5, con 14.280  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se tienen profundidades de la superficie freática (espesor de la ZNS) de 61,6 m y 50,38 m respectivamente.

A modo de síntesis de lo hasta aquí expuesto, puede mencionarse que las zonas de baja salinidad coinciden con las áreas de recarga y las de altos conductimétricos con las de descarga, existiendo una gradación entre uno y otro extremo atribuible al escenario de circulación.

Puede decirse entonces, considerando la génesis de la salinidad como resultado de la disolución de iones del sedimento acuífero durante recorrido del agua por el medio subterráneo, que existe una clara correspondencia entre la red de flujo definida en la sección hidrodinámica y el sentido de recarga, circulación y descarga interpretado a partir de los mapas de isoconductividad. Con menor incidencia, los procesos de hidrólisis, oxidación e intercambio de bases reconocen también su participación en el fenómeno hidroquímico.

#### 3.5.3.2. pH

En líneas generales, el pH de la región toma valores desde neutros a levemente alcalinos, aunque es posible identificar con más detalle dos ámbitos con características diferenciadas, uno con  $\text{pH} > 7,5$  y otro con  $\text{pH} < 7,5$ .

Los primeros fluctúan entre 7,5 y 8,5 disponiéndose de manera coincidente con las áreas medanosas, tanto la zona principal de médanos como los pequeños depósitos costeros.

En el caso de los neutros a levemente ácidos, es posible localizarlos de manera periférica al área medanosa, tomando valores entre 7,5 y 6,5, con los mínimos situados sobre el sector oriental del área.

#### 3.5.3.3. Alcalinidad

Definida como la capacidad de un agua para neutralizar ácidos, mide principalmente el efecto de los aniones  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  en solución.

Puesto que en la zona los pH son en general menores a 8,3, la especie dominante es el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y la alcalinidad queda definida entonces en la práctica por la concentración de este anión (alcalinidad temporaria), al cual se hará referencia en todos los casos.

Como se verá más adelante al tratar el contenido iónico del agua, los valores de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  fluctúan entre 8 meq/l en el área de recarga principal (médanos) y 2 meq/l para la descarga en la zona Norte de la salina Grande.

#### 3.5.3.4. Temperatura

Por tratarse de un acuífero freático, esta propiedad está vinculada fundamentalmente con la variación de la temperatura ambiente.

Las mediciones realizadas presentan algunos inconvenientes para su análisis dado que las condiciones de muestreo no son siempre homogéneas ya que algunos pozos son permanentemente bombeados mientras que otros se encuentran abandonados. A esto se suma el hecho de que las perforaciones de gran diámetro, funcionan como cisternas y esto redundando en muchos casos en un cierto error al medir la temperatura.

Los valores medios regionales registrados, si bien son aproximados, para los distintos momentos del año, noviembre de 2005 con 19,5 °C, Octubre 2006 con 16,7 °C, marzo 2008 con 18,7 °C y agosto/septiembre del mismo año con 13,7 °C, reflejan la tendencia anual de las temperaturas del aire, con los máximos posicionados en los meses estivales y los mínimos en los invernales.

#### 3.5.3.5. Elementos mayoritarios

La determinación de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , y  $\text{Na}^+$  disueltos en el agua, permite la clasificación en función de su contenido iónico, determinando a partir de las relaciones entre los mismos la evolución de su composición química y acudiendo a sustentar la interpretación hidrodinámica del flujo subterráneo regional.

#### **Clasificación iónica**

Con el propósito de identificar de manera regional los distintos tipos iónicos, y sin restar claridad a la expresión gráfica, se realizó una selección representativa de 23 muestras del total de las extraídas en la campaña junio 2007, cuya clasificación iónica se muestra en el diagrama Piper-Hill, (Figura 3.5.33.).

La selección se efectuó en función de cubrir con una densidad suficiente el área, contemplando incluir muestras de las diferentes unidades geomorfológicas.

A fin de facilitar el análisis de la posible existencia de una relación entre la hidroquímica y la geomorfología se procuró, al momento de elegir la leyenda, diferenciar las muestras según la unidad a la cual pertenecieran (Médanos y Mantos arenosos, Depresiones endorreicas, Planicies aterrazadas, Depósitos costeros o asociadas a manantiales).

Una segunda componente tomada en cuenta en la selección de la leyenda, fue de índole hidrodinámica, optándose por resaltar las muestras de agua subterránea que en el mapa equipotencial 2007 se ubicaran sobre la zona de recarga. Se individualizó así a

aquellos pozos localizados en el ámbito de la hidroforma cilíndrica divergente y cuya altura piezométrica supera los 30 m s/0IGM.

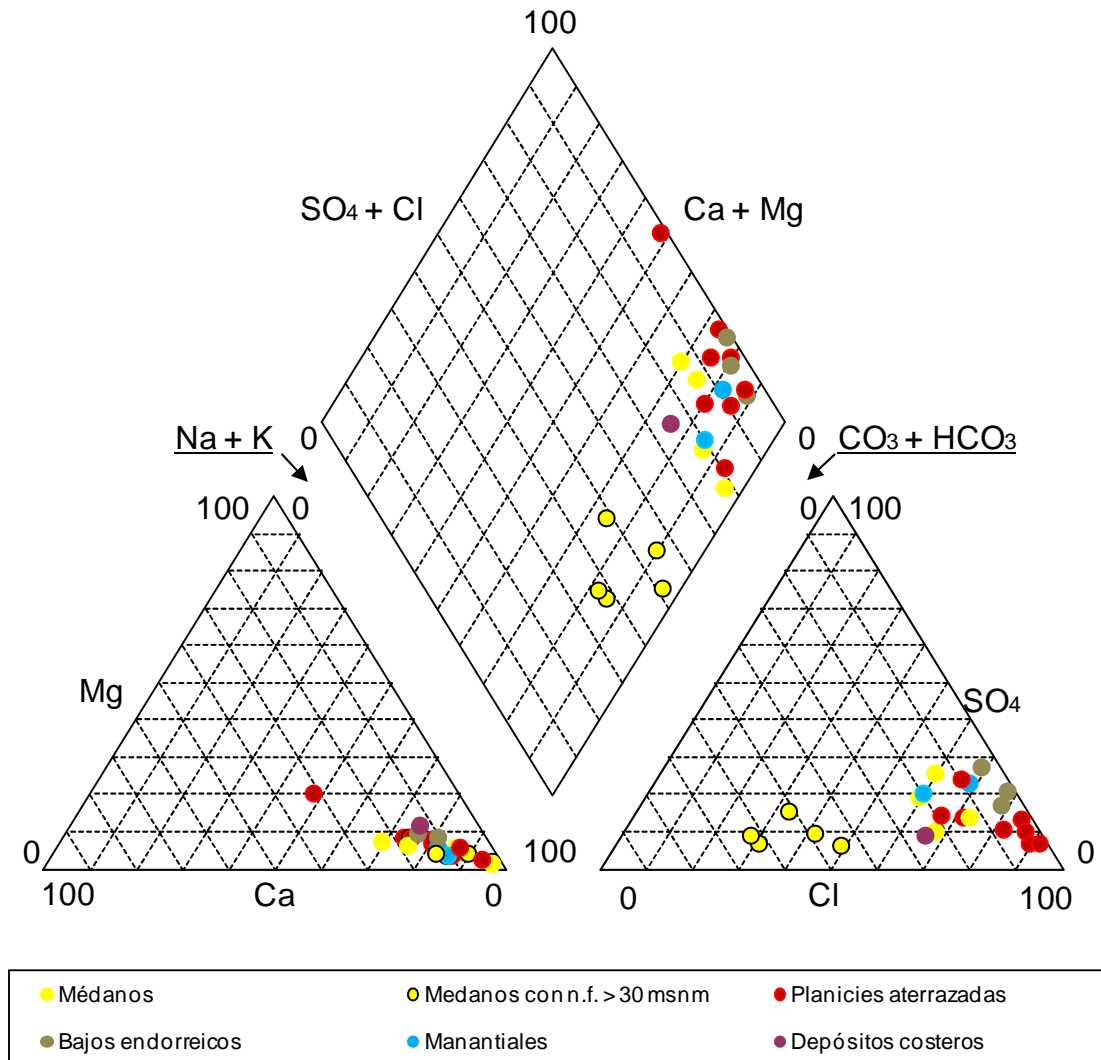


Figura 3.5.33.: Diagrama Piper-Hill de una selección de muestras de los análisis 2007.

Se interpreta de la figura 3.5.33. la existencia dos campos de comportamiento iónico bien diferenciados: uno bicarbonatado sódico a clorurado bicarbonatado sódico correspondiente a las muestras tomadas en la unidad Médanos y Mantos arenosos (círculos amarillos con borde negro) y otro, marcadamente clorurado sódico que representa a otra parte de la misma unidad, a las Planicies aterrazadas, las Depresiones endorreicas, los Depósitos costeros y a los manantiales.

En cuanto a la composición iónica del agua de los depósitos costeros, es levemente más bicarbonatada que la de las depresiones y planicies, pero sin llegar a los valores alcanzados en gran parte de los médanos.

A continuación se muestran para los ambientes mencionados, los diagramas Piper-Hill construidos con el total de las muestras contenidas en cada uno de ellos. Serán descritos siguiendo la secuencia recarga-circulación-descarga definida en el apartado hidrodinámica. Se inicia la descripción en el ambiente medanoso finalizando en el de Depresiones endorreicas.

En la figura 3.5.34 se representa la composición iónica de las muestras tomadas en los pozos localizados sobre la unidad geomorfológica “Médanos y Mantos arenosos”.

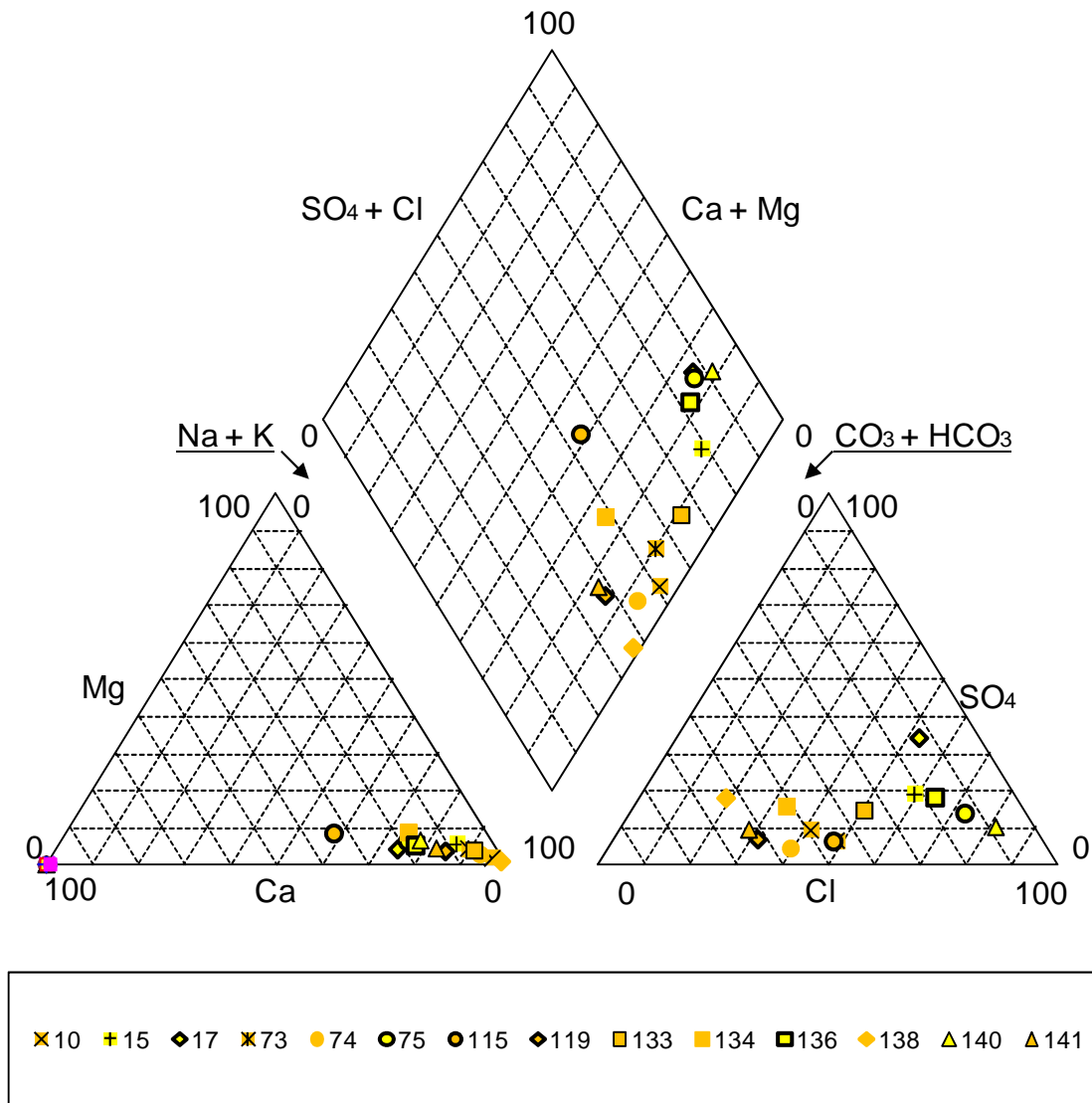


Figura 3.5.34. Diagrama Piper-Hill. Unidad Médanos y Mantos arenosos.



Dentro de ellos se procuró diferenciar las muestras según su relación espacial con las unidades eólicas activas, dado que, como se explicó anteriormente, representan las máximas oportunidades de recarga del acuífero.

Las muestras ubicadas sobre o próximas a la línea de migración de las unidades eólicas activas fueron identificadas con color anaranjado, y las restantes en color amarillo.

En la figura 3.5.34. se identifican dos familias iónicas distintas: una de carácter Bicarbonatado sódico que agrupa a prácticamente a todas las muestras representadas con color naranja (aunque algunas son levemente mas cloruradas) y otra de tipo Clorurado sódico, correspondiente íntegramente a los puntos amarillos.

Otra diferencia entre ambos grupos es su situación dentro del marco hidrodinámico regional. Los pozos que conforman la familia iónica Bicarbonatada sódica tienen una posición central en la hidroforma cilíndrica divergente y con niveles freáticos ubicados superiores a los 30 m s/OIGM. En cambio los de la Clorurada sódica se ubican de manera periférica y a un nivel equipotencial inferior al mencionado precedentemente.

Las aguas correspondientes a la unidad geomorfológica "Planicies aterrazadas" se clasifican en su gran mayoría como cloruradas sódicas, con presencia puntual de Cloruradas cálcicas y Sódico-cálcicas (muestras 5 y 19 respectivamente), tal como se muestra en el diagrama Piper-Hill (Figura 3.5.35.). Si bien el sulfato aparece como anión no dominante, se presenta en mayor proporción que en las Depresiones endorreicas.

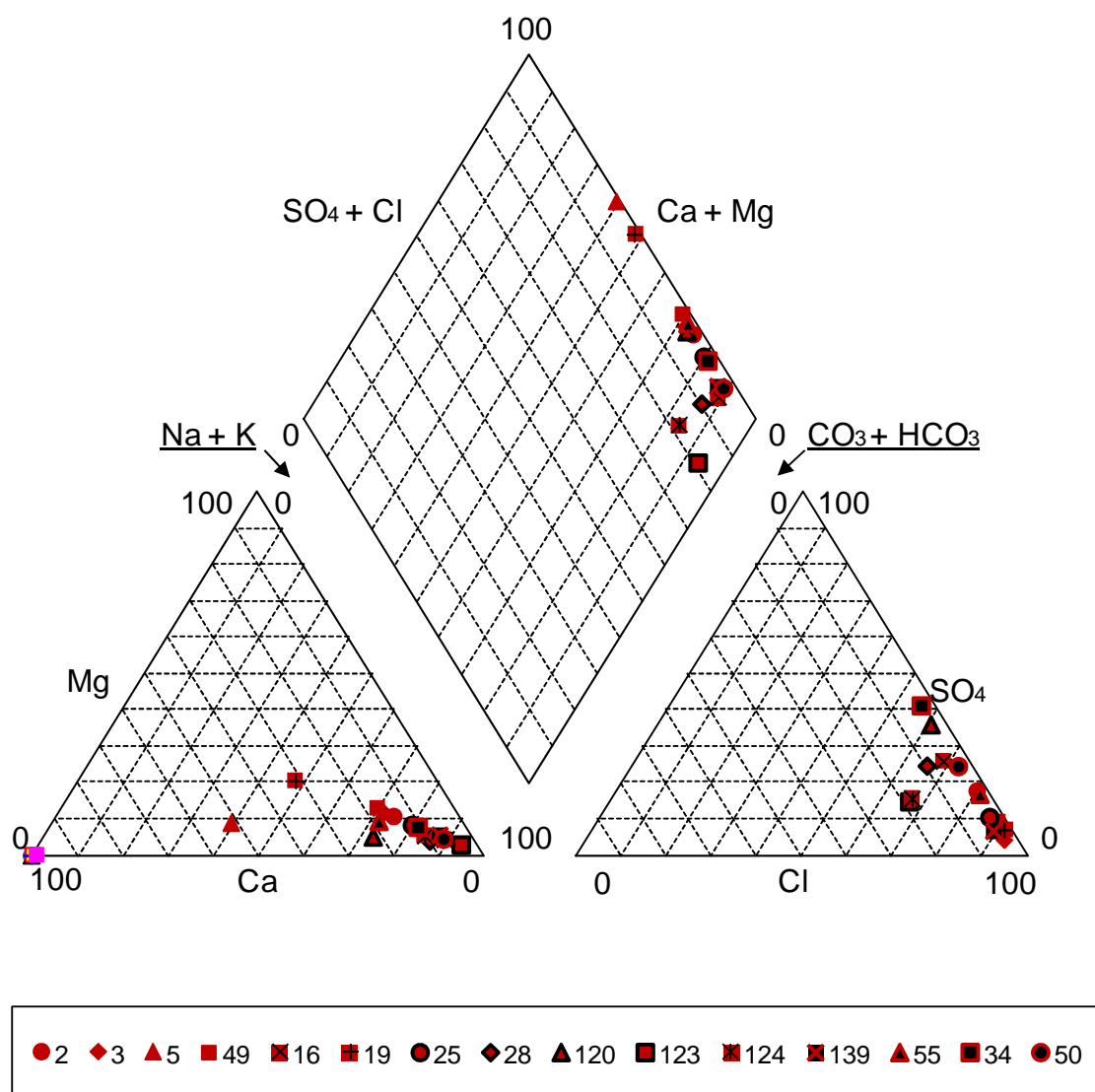


Figura 3.5.35: Diagrama Piper-Hill. Unidad Planicies aterrazadas

En el caso de la unidad geomorfológica “Depresiones endorreicas”, la totalidad de sus muestras clasifican dentro del campo iónico Clorurado-sódico (Figura 3.5.36.). Esta situación se cumple también en los manantiales ubicados sobre su ladera Sur, que como se verá más adelante tienen algunas diferencias respecto del resto.

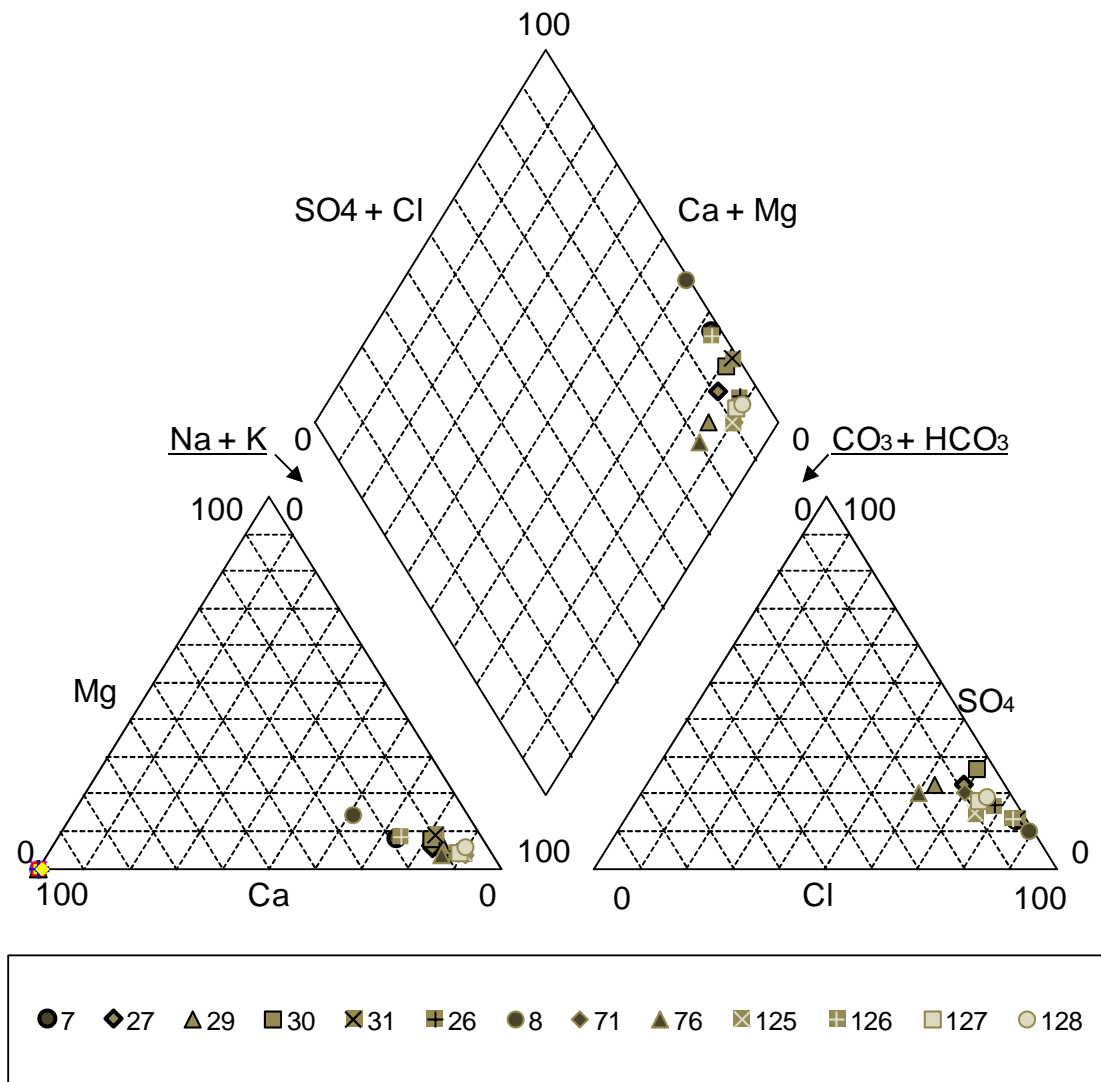


Figura 3.5.36.: Diagrama Piper-Hill. Depresiones endorreicas

### **Evolución de la composición química**

A medida que las aguas transcurren en su recorrido desde el dominio de recarga hacia el de descarga, tienden a ir aumentando su mineralización hasta saturarse en los diferentes iones. Usualmente se satura primero con las sales que contienen al anión  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , incluso desde la infiltración, luego con las que contienen al  $\text{SO}_4^{2-}$ , no precipitando el ión cloruro en el medio subterráneo.

Entre los cationes primero se satura con las sales que contienen al ion Calcio, más difícilmente con las que contienen al Magnesio y por último, las del ion Sodio en general no llegan a saturar, (Custodio & Llamas, 2001).

Para este tipo de interpretaciones son muy útiles los diagramas de Schoeller-Berkaloff dado que permiten observar la relación entre puntos representativos de los iones a partir de la inclinación de la recta que los une. Es así como analizando la pendiente de la rama aniónica se puede interpretar el grado de evolución del agua entre extremos de joven o reciente y madura.

Siguiendo la misma lógica que para la clasificación iónica, se muestra primero un diagrama de un grupo representativo de muestras (Figura 3.5.37.), y luego otros para cada uno de los ambientes geomorfológicos. Para su mejor visualización y comprensión se decidió mantener los mismos colores que en las gráficas Piper-Hill.

La característica más sobresaliente al observar la representación regional de las muestras es el incremento de la concentración de todos los iones excepto el bicarbonato, desde los médanos hacia las depresiones quedando como situación intermedia las planicies y los manantiales, comportamiento que estaría en relación directa con el sentido del flujo expresado en los mapas hidrodinámicos.

Para el caso particular de los Médanos y Mantos arenosos, la gráfica (Figura 3.5.38) muestra una pendiente positiva en el segmento sulfatos- bicarbonatos, condición que caracteriza a aguas vinculadas a un proceso de recarga reciente. Este comportamiento es consecuente con la posición central de las muestras respecto de la hidroforma cilíndrica divergente que define la recarga. Hay que resaltar también que las más bicarbonatadas (color naranja) se ubican cercanas al ápice y aquellas con tenores menores (color amarillo), conforme se alejan del mismo en el sentido del flujo subterráneo.

La unidad Planicies aterrazadas muestra un comportamiento que no correspondería esencialmente al fenómeno de circulación, como parecería marcar el nivel de sulfatos (Figura 3.5.39.), ya que en este caso se trata fundamentalmente de aguas clorurada sódicas, con una identidad familiar bastante similar a las Depresiones endorreicas. Posiblemente influya el efecto de recorrido con baja velocidad de flujo, producto de los sedimentos finos de la *Formación Puerto Madryn* y los reducidos gradientes hídricos que tipifican a las planicies.

No obstante, si se observa comparativamente esta gráfica con la que representa a los bajos topográficos, se puede ver que el contenido general de sulfatos es levemente mayor para las planicies.

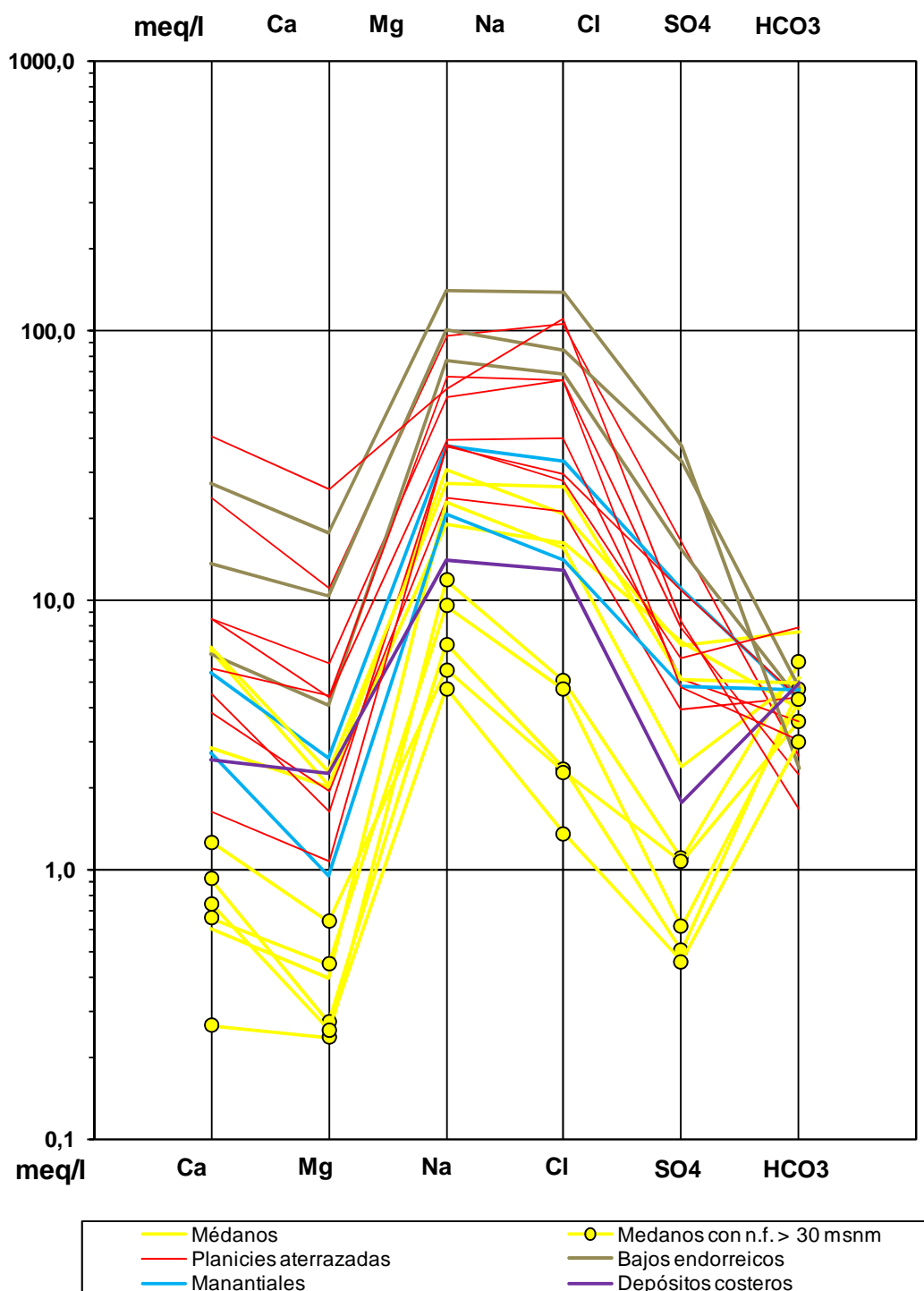


Figura 3.5.37: Diagrama Schoeller- Berkaloff integrado

En la geoforma Depresiones endorreicas se manifiestan dos situaciones: por un lado, un grupo con un neto predominio de los cloruros Figura 3.5.40 que marca la condición evolucionada del agua y corrobora el carácter de zona de descarga atribuido a la unidad, y

por otro, para las muestras 76, 71, 125, 27 y 29 un aumento relativo en el contenido de bicarbonatos, situación que responde a la cercanía de estos puntos con la zona de recarga.

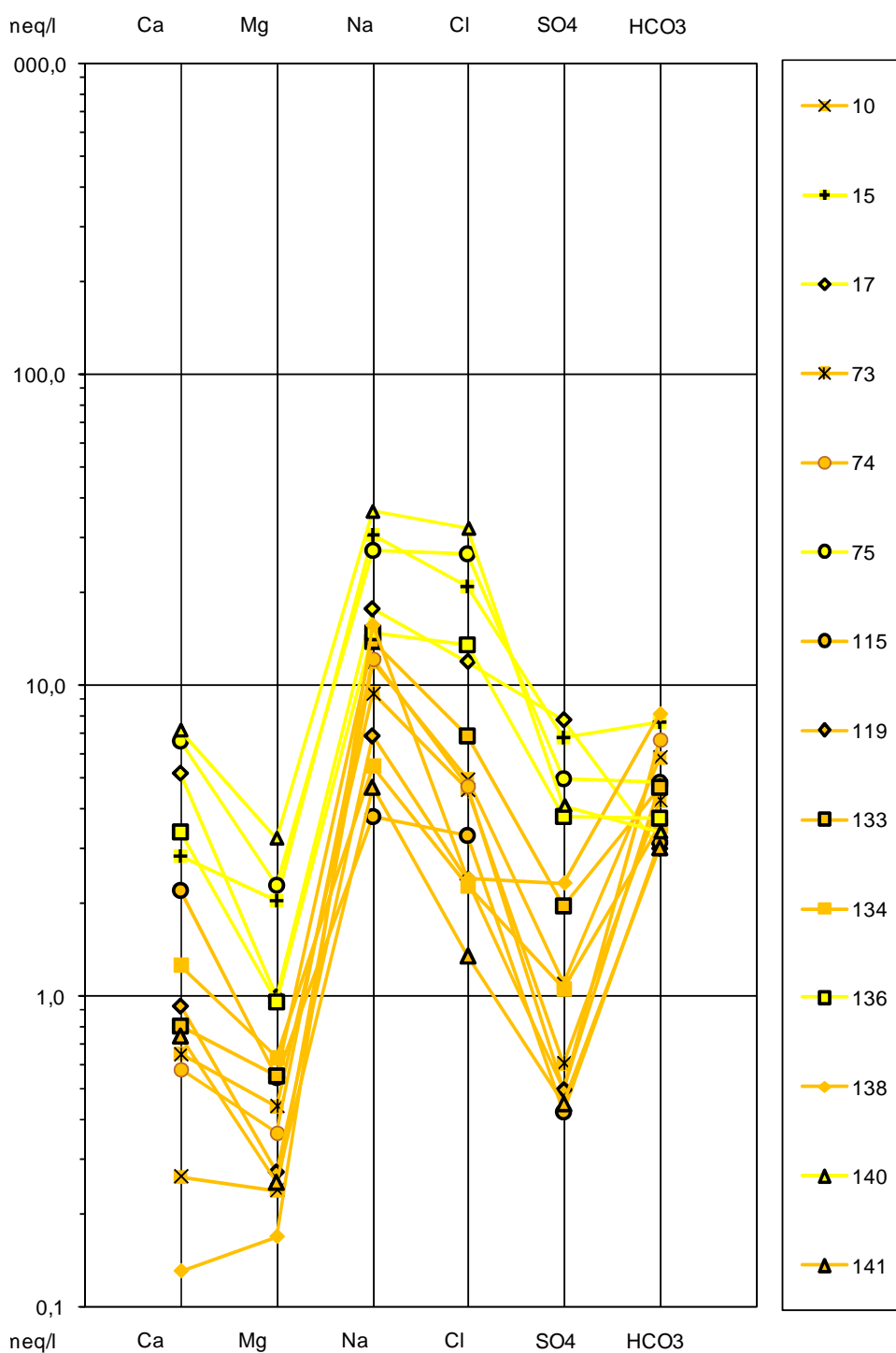


Figura 3.5.38: Diagrama Schoeller- Berkaloff. Unidad Médanos y Mantos arenosos

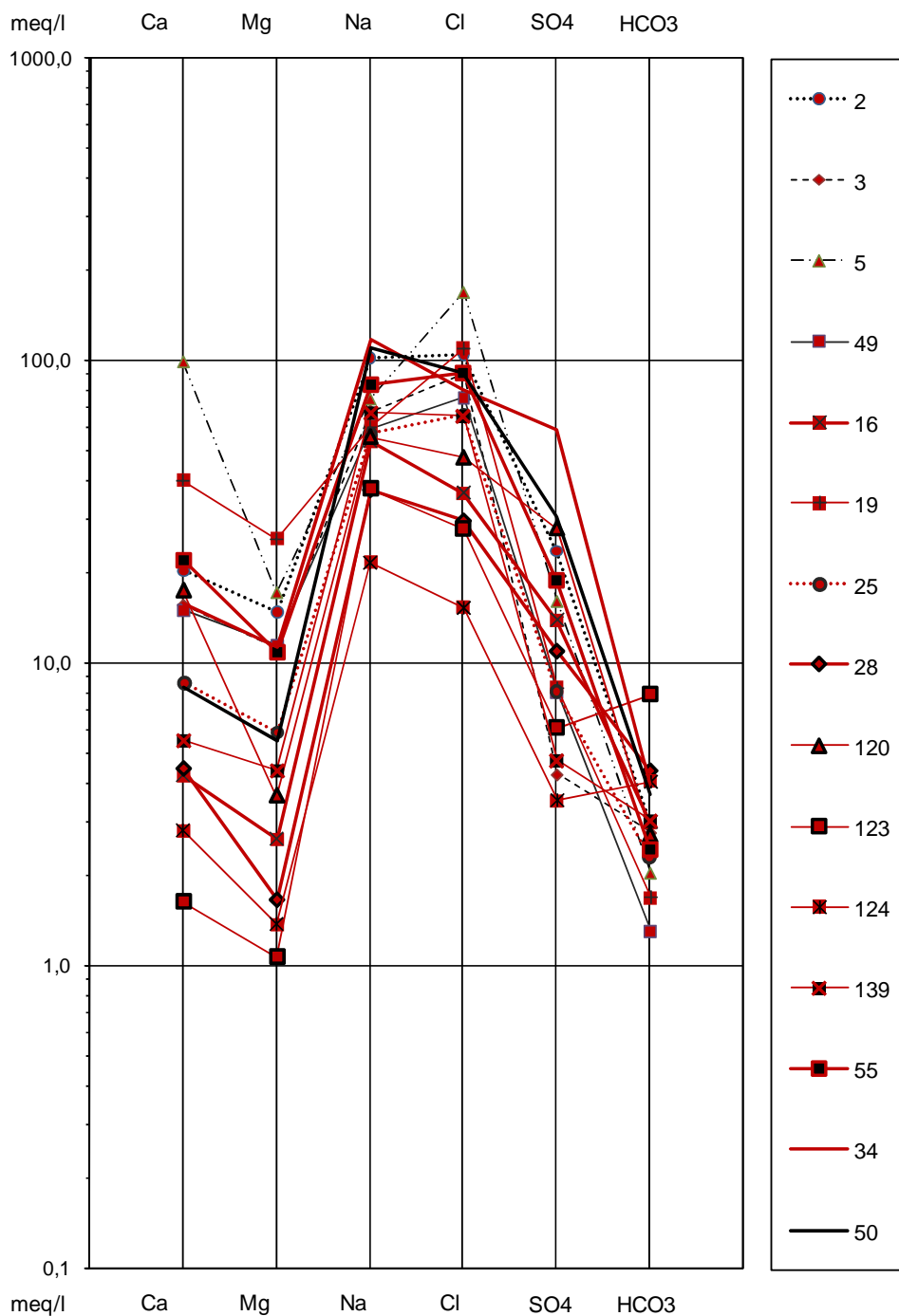


Figura 3.5.39: Diagrama Schoeller- Berkaloff. Unidad Planicies aterrazadas

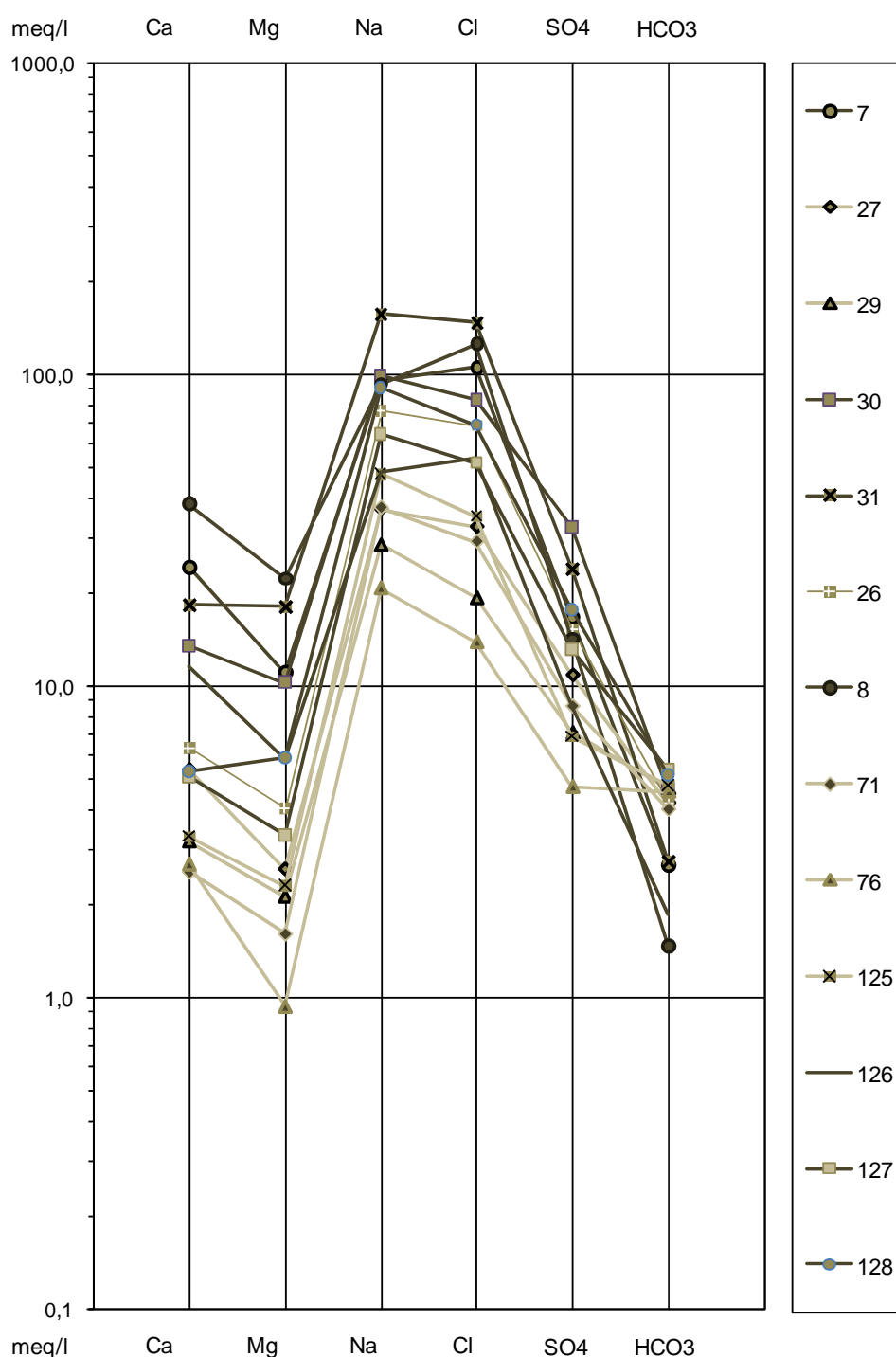
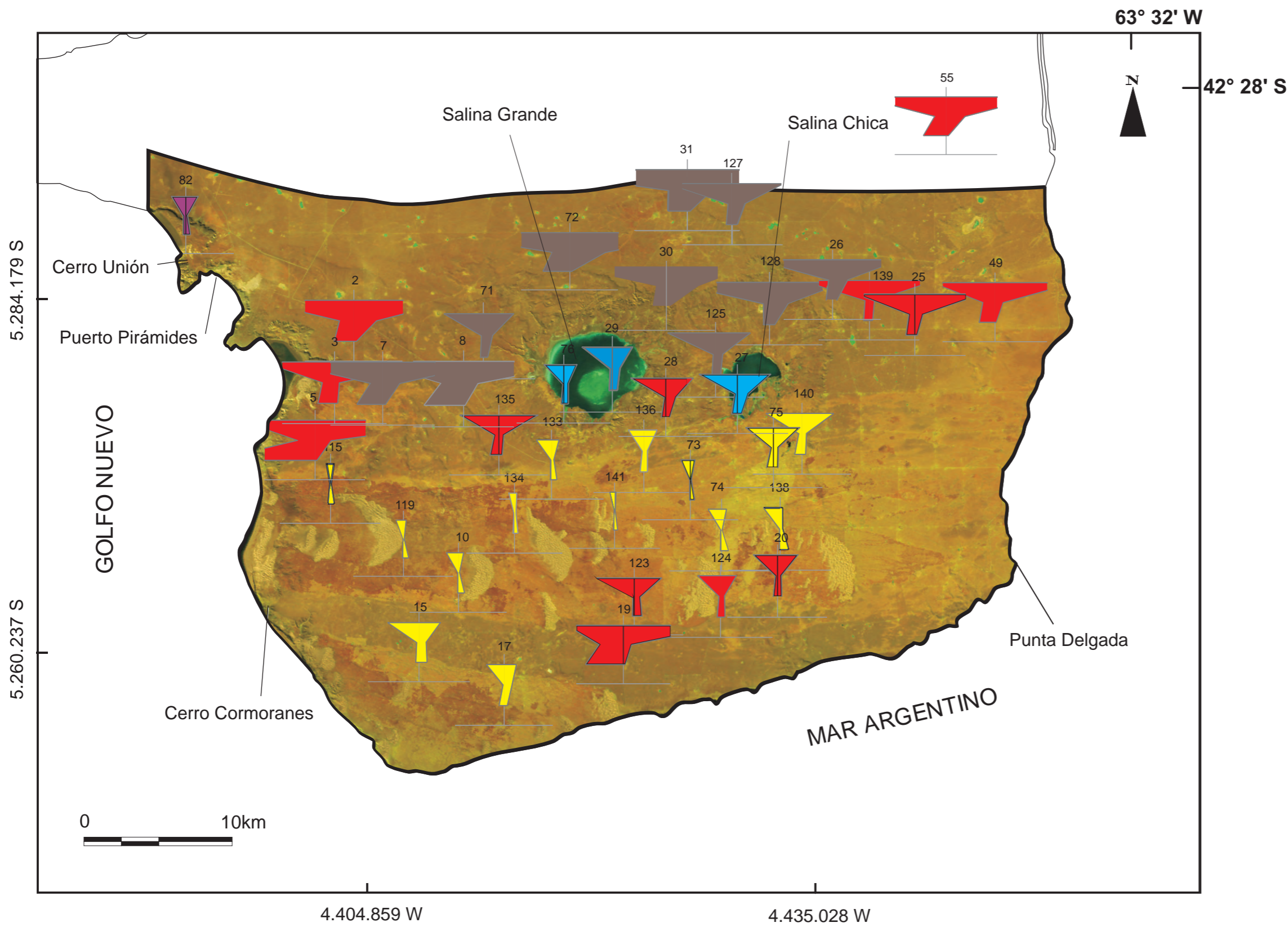


Figura 3.5.40: Diagrama Schoeller- Berkaloff. Unidad Depresiones endorreicas

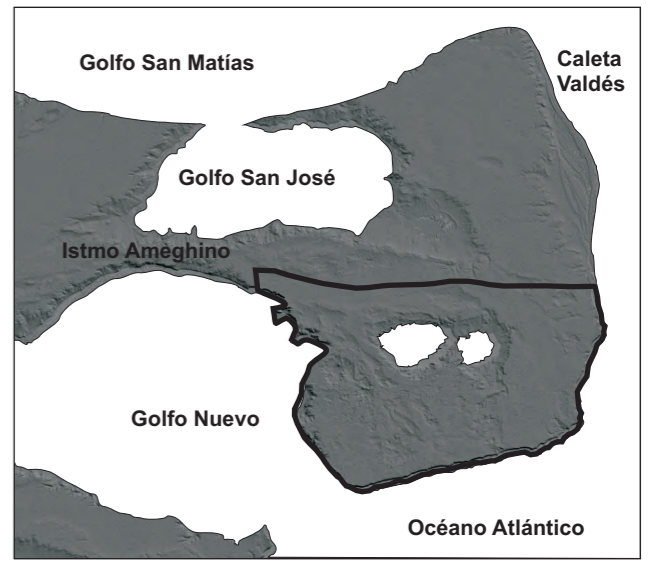
Para mostrar la variación espacial de la composición del agua en el acuífero, se compuso sobre una imagen satelital, un mapa con diagramas Stiff de las muestras analizadas (Figura 3.5.41: Mapa de diagramas Stiff). Cabe aclarar que por una cuestión de claridad gráfica hubo que recurrir a una selección que implicó la exclusión de un grupo reducido de muestras.





*“Investigación geohidrológica en un sector de Península Valdés, Provincia de Chubut”*

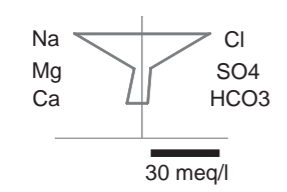
Ubicación del area de estudio



**MAPA DE CONTENIDO IONICO  
DIAGRAMAS STIFF  
JULIO 2007**

REFERENCIAS

Diagrama Stiff



- Planicies aterrazadas y pequeños bajos
- Manantiales
- Depósitos eólicos
- Bajos
- Depósitos costeros
- Sitio de Monitoreo

Figura 3.5.41

Otra explicación respecto a la figura 3.5.41 es la referida a la escala utilizada en los diagramas Stiff. Como se priorizó el hecho de que sean comparables entre sí, hubo que mantener la misma escala para todos, por lo cual en el caso de las Planicies aterrizadas y las Depresiones endorreicas y dada la alta concentración de cloruros y de sodio, los extremos de sus polígonos aparecen necesariamente cortados.

A partir de la interpretación del mapa de diagramas Stiff y de lo analizado hasta aquí, es posible sintetizar los siguientes tópicos:

- El tipo iónico dominante en la región es el Clorurado sódico y se distribuye principalmente sobre las Planicies aterrizadas y Depresiones endorreicas, correspondiendo fundamentalmente a los fenómenos hidrodinámicos de circulación y descarga.
- Si bien la mineralización del agua se incrementa desde el área de recarga hacia la de descarga, no se produce de manera homogénea a lo largo del recorrido sino que manifiesta un aumento importante al pasar del área medanosa al de las planicies.
- Existe una marcada diferencia en las concentraciones de los iones Sodio y cloruro entre la zona de las planicies y las depresiones y la de los médanos, siendo mucho mayor en las primeras que en la segunda.
- Las aguas con características Bicarbonatadas-sódicas se localizan exclusivamente en el área Sur, coincidentemente con la cadena medanosa principal y directamente asociadas al área de recarga más importante.
- La diferencia del comportamiento iónico entre las planicies y las depresiones si bien es leve, se manifiesta principalmente por un aumento en la concentración de cloruros en las segundas.

### ***Interpretación Geoquímica y distribución de los iones mayoritarios***

Se refiere en este apartado y para cada ion: procedencia, tenores máximos, mínimos y medio en cada uno de los ambientes anteriormente descriptos así como su distribución regional.

Este último ítem se describirá a partir de la interpretación de los mapas de isocontenido iónico que se muestran en el anexo. (Anexo, Figuras A.3.5.27, A.3.5.28, A.3.5.29., A.3.5.30, A.3.5.31., A.3.5.32., A.3.5.33., A.3.5.34.: Mapas de isocontenido de bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, Calcio, Magnesio, Sodio y potasio respectivamente).

### *Bicarbonatos*

La procedencia de estos aniones está en general asociada a la disolución de CO<sub>2</sub> atmosférico del suelo y a la disolución de calizas, y/o de silicatos favorecida por el CO<sub>2</sub>. (Custodio & Llamas, 2001). Su presencia depende fuertemente de los valores de pH y no son oxidables ni reducibles en las aguas naturales. Debido a que los iones son muy poco solubles (kps bajos) suelen precipitar fácilmente como carbonatos, principalmente de Calcio.

La presencia de bicarbonatos en el área de estudio se atribuye principalmente a la disolución de los niveles de conchillas (CaCO<sub>3</sub>) y cementos carbonáticos presentes en la *Formación Puerto Madryn*.

La distribución regional del bicarbonato (Anexo Figura A.3.5.27), muestra sus máximas concentraciones, del orden de los 250 a 600 mg/l, al Sur de las salinas Grande y Chica coincidentemente con el área medanosa, y los mínimos tenores (incluso inferiores a los 150 mg/l), hacia la periferia de dicho sector, localizados principalmente sobre el área de Planicies aterrazadas.

### *Sulfatos*

El SO<sub>4</sub><sup>-</sup> forma sales solubles a muy solubles (Kps intermedios, mayores que los de los HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> pero menores que los de los Cl<sup>-</sup>) y precipita químicamente en aguas naturales con mayor dificultad.

El posible origen de este anión, dentro de la zona de estudio, sería el lavado de los sedimentos marinos y la disolución de los abundantes yesos de la *Formación Puerto Madryn*.

En cuanto a su distribución (Anexo, Figura A.3.5.29), se advierte que las mayores concentraciones (superiores a 600 mg/l), están localizadas en el sector Norte y Oeste del área, con máximos del orden de las 2000 mg/l a la altura de Cerro Cormoranes (pozos 11 y 118) y mínimos ubicados claramente sobre la zona de recarga, con valores que llegan por debajo de las 100 mg/l.

### *Cloruros*

El Cl<sup>-</sup> forma sales solubles a muy solubles, es un ion estable en disolución y muy difícilmente precipitable (Kps muy elevados). Además no se oxida ni se reduce en aguas naturales, por lo que es considerado el ion conservativo por excelencia en las aguas naturales.

Dadas las características del perfil geológico y el tipo iónico Clorurado-sódico que caracteriza el área, la hipótesis que se toma como más acertada en cuanto al origen de los cloruros, es la debida al lavado de sedimentos de origen marino de la *Formación Puerto Madryn*. Otro posible origen puede estar asociado, dadas las características áridas de la región, a la concentración por evaporación (previa infiltración) del agua de lluvia en el terreno y a la incorporación durante la infiltración de sales producto tanto de la evaporación de precipitaciones anteriores como al aporte mediante polvo atmosférico de sales presentes en la región. Este aporte estaría de acuerdo a lo interpretado a partir del análisis isotópico, tal como se verá más adelante. Así mismo habría que considerar, dada la cercanía al mar, el posible aporte de Cl<sup>-</sup> por aerosoles marinos aunque esta variable no ha podido ser corroborada en términos de su importancia.

De todas maneras, las características altamente permeables de la zona de recarga y la alta concentración de cloruros en general, sumado a que el acuífero en estudio se aloja en sedimentos marinos, sugiere como más acertada la primer hipótesis para el sector medanoso, y considera la influencia de la segunda (aporte directo de lluvia concentrada por evaporación y lavado de sales superficiales), en las unidades Planicies aterrazadas y Depresiones endorreicas dadas las condiciones de menor permeabilidad de los suelos. De todas formas, como fenómeno modificante, la disolución en el recorrido es muy importante.

En el mapa de isoconductividad de cloruros, (Anexo, Figura A.3.5.30) se ve que las concentraciones son mínimas en la zona de los médanos y manto eólicos y aumentan a medida que se alejan de ella, alcanzando los máximos tenores en el sector Norte de la salina Grande y en las cercanías del Golfo Nuevo con valores que superan las 5.500 mg/l, ratificando lo manifestado en el párrafo anterior.

### Calcio

El Ca<sup>2+</sup> forma sales desde moderadamente solubles a muy solubles. Puede precipitar como CaCO<sub>3</sub> o disolverse fácilmente frente a cambios de pH o de presión parcial de CO<sub>2</sub>. Así mismo, frente a la presencia de arcillas es fácilmente afectado por el intercambio de bases.

En función de la litología de la formación acuífera, se consideran como orígenes más plausibles, la disolución de yesos, conchillas (calizas) y cementos calcáreos presentes en la *Formación Puerto Madryn*. Como se verá más adelante, los índices de intercambio de bases muestran una mayor posibilidad de intercambio principalmente en la zona de recarga.

Las concentraciones fluctúan entre los 50 y 150 mg/l para la zona de los Médanos y Mantos arenosos, salina Chica y Sur de la salina Grande y entre 300 y más de 450 mg/l para la zona de las Planicies aterrazadas. Dentro de este último ambiente hay que rescatar la presencia de una alta concentración de este catión en los pozos 5 y 19, tal como se adelantara al tratar su clasificación (Anexo, Figura A.3.5.31).

### Magnesio

De los posibles orígenes citados para la presencia de este catión en las aguas subterráneas (disolución de dolomías, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas y por último mezcla con agua de mar) parece una opción factible el ataque de silicatos ferromagnesianos, ya que están descriptos para las areniscas de la *Formación Puerto Madryn*, la presencia entre otros, de biotita  $[K(Mg,Fe)_3(Al,Fe)Si_3O_{10}(OH,F)_2]$ , piroxenos  $[(Ca,Mg,Fe)SiO_3]$  y Hornblenda  $[Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2]$ . (Haller *et.al* 2001). Así mismo, este ión puede participar en el intercambio de bases.

Respecto a sus concentraciones y distribución espacial, tal como se presenta en el mapa de isocontenido (Anexo, Figura A.3.5.32), los tenores más frecuentes son los cercanos a 100 mg/l con un rango menor para el área medanosa (entre 50 y 10 mg/l) y valores que alcanzan las 300 mg/l en sectores puntuales de las planicies y Norte del bajo de la salina Grande.

### Sodio

El  $Na^+$  es un catión de solubilidad muy elevada y de difícil precipitación. Su origen estaría asociado principalmente al lavado de los sedimentos de origen marino de la *Formación Puerto Madryn*, así como también al intercambio de bases con arcillas del mismo origen como se verá más adelante. Tal como se mencionara al tratar los cloruros, y dada la estrecha relación que muestran en su distribución regional (aumento del contenido de  $Na^+$  directamente proporcional al contenido de  $Cl^-$ ), se hace extensiva también para el  $Na^+$  la consideración de un origen vinculado al aporte atmosférico producto de la evaporación, previa infiltración, del agua de lluvia, así como también al lavado de sales superficiales y un posible aporte a partir de aerosoles marinos.

Este catión es claramente el más abundante, con tenores entre 300 y 600 mg/l en la zona medanosa y de entre 900 y más de 1.800 para la zona de las Planicies aterrazadas y

los grandes bajos. En estos últimos se alcanzan los máximos valores regionales, superando en el Norte de la Salina grande las 3.600 mg/l, (Anexo, Figura A.3.5.33).

### Potasio

Proviene, entre otras fuentes, de la ortosa y silicatos como las micas, pero tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas (Custodio & Llamas, 2001), por lo cual se lo encuentra en general en bajas concentraciones.

En el área de estudio toma como valores más frecuentes los comprendidos en el rango de 10 a 25 mg/l, aunque en la zona Norte de los bajos de las salinas Grande y Chica alcanza valores entre 50 y 75 mg/l, (Anexo, Figura A.3.5.34.).

### Relaciones iónicas

En general las relaciones entre los iones disueltos en el agua guardan cierta vinculación con el terreno del que proceden, indican la acción de fenómenos modificadores, o muestran una característica específica del agua considerada, (Custodio & Llamas, 1976).

Dada la presencia de materiales finos de origen marino en los sedimentos de la *Formación Puerto Madryn*, y a fin de observar principalmente los efectos de los **cambios de bases**, se analizan las variaciones espaciales de las relaciones icb I ( $r_{Cl} - r_{(Na + K)} / r_{Cl}$ ), icb II ( $(r_{Cl} - r_{(Na+K)}) / r_{(SO_4 + CO_3H + NO_3)}$ ) (el segundo de ellos aplicable cuando en el icb I se obtienen valores negativos y es necesario corroborar no solamente la posibilidad de intercambio sino el signo) y de  $r_{Na} / (r_{Ca} + r_{Mg})$ .

En un agua subterránea el valor de icb I suele tomar un valor positivo o negativo, en general próximo a 0. Si existe ablandamiento (cambio de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  por  $Na^+$ ) su valor tiende a disminuir mientras que si existe endurecimiento tiende a crecer (Custodio y Llamas 2001).

Para el área de estudio se encontró un predominio areal de valores de icb I muy cercanos a 0 indicando una baja capacidad de intercambio catiónico, presumiblemente por ser suficientemente maduras o evolucionadas como para haber ya satisfecho un intercambio. En cambio en la zona de recarga, con aguas más jóvenes, se presentan valores negativos entre -0,5 y -1, indicando procesos de ablandamiento.

Puesto que en las aguas subterráneas donde los iones  $Na^+$  y  $Cl^-$  son dominantes puede existir un ablandamiento sin que el valor de icb I se vea apenas modificado, se utiliza también el icb II.

Los valores obtenidos para este segundo índice fluctúan entre -0,5 y -1 para la zona de recarga, coincidente con la unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos, donde los procesos de cambio predominantes son efectivamente de incorporación de Sodio a expensas del Calcio y Magnesio (ablandamiento). Para las zonas de circulación y descarga sus valores se distribuyen entre 0 y mayores a 1. No obstante hay que tener en cuenta que el icb II puede estar afectado por otros fenómenos ya que el  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{CO}_3\text{H}^-$  pueden sufrir reducción o precipitación respectivamente.

Finalmente, en cuanto al fenómeno de ablandamiento, la distribución espacial de la relación  $r\text{Na}/(r\text{Ca} + r\text{Mg})$  estaría acorde con lo dicho anteriormente, puesto que manifiesta sus mayores valores en el área de recarga principal y su disminución hacia la periferia de la misma.

Dado el alto contenido salino encontrado en el área y su cercanía al mar, se decidió hacer un análisis espacial de dos relaciones iónicas,  $r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ , que resultan útiles al momento de dilucidar entre un origen marino o continental de las aguas subterráneas, además de su valor diagnóstico del proceso hidrodinámico. Estas relaciones no permanecen inalterables en tiempo y espacio, ya que los fenómenos modificantes (reducción, intercambio de bases, concentración, precipitación (Custodio y Llamas 1976)) podrían afectar el valor final.

La relación  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$  varía usualmente en las aguas continentales entre 0,3 y 1,5 y en el agua marina resulta superior a 5. Las aguas que circulan por terrenos de origen marino o que sufrieron mezcla con agua de mar tienen también una relación elevada.

Como se puede apreciar en el mapa de isorelacion  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$  (Anexo, Figura A.3.5.35.) los valores para el área fluctúan entre 0,3 y 1,5, alcanzando incluso, en la zona topográficamente más elevada, valores de 0,1. En ningún caso se detectó  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+} > 1,6$  lo cual desestima la posibilidad de mezcla con agua de origen marino, aun cuando las cotas topográficas de las salinas están por debajo del nivel del mar, y marca el origen continental del agua subterránea.

No obstante, y tal como se anticipara, hay que considerar que esta relación puede estar afectada por procesos de intercambio iónico que, cuando se produce ablandamiento, puede aumentar la relación, pero a su vez el cambio iónico entre  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  puede permitir que la precipitación posible de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  se realice a expensas del  $\text{Mg}^{2+}$  generando así una reducción de la relación. (Custodio y Llamas 2001).

En cuanto a la relación  $r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$ , es muy usada en la caracterización de la intrusión marina ya que en aguas continentales tiene en general valores entre 0,1 y 5 y en el

agua de mar entre 20 y 50. Es a su vez una relación de interés para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido del flujo, puesto que el contenido de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  es un valor relativamente constante en las aguas subterráneas y el de  $\text{Cl}^-$  aumenta progresivamente con la circulación por el medio subterráneo, (Custodio & Llamas, 1976).

El mapa de relación  $r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$  (Anexo, Figura A.3.5.36.) ofrece valores entre 0 y 5 para toda el área medanosa Sur, los depósitos costeros y dos puntos ubicados al Norte de la salina Grande. Luego se observan sectores con relaciones que están por encima de 50, principalmente en el Norte e incluso superiores a 90 en el sector Noroeste. No obstante, esto no indica un origen marino en sí mismo sino que puede ser atribuido también a una salinización por circulación en sedimentos de tal origen y aún continentales cuando la velocidad efectiva es muy baja.

Al observar los espesores de la ZNS para el mismo momento de muestreo (Anexo, Figura A.3.5.20), se puede notar la coincidencia entre las mayores profundidades y los valores más elevados de la relación iónica planteada.

Por otro lado, los menores tenores de  $r\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  se manifiestan, no sólo coincidentemente con las menores profundidades, sino también con el área medanosa principal.

Se puede concluir entonces que el incremento de la relación  $r\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  está vinculado principalmente con un aumento en los tiempos de contacto del agua con los materiales del acuífero, tanto mayores cuanto mayor es la profundidad del agua y menor la permeabilidad del acuífero.

A su vez, existe la posibilidad de que los valores más elevados, estén relacionados a una mezcla de aguas con otras más profundas y de salinidad superior, circunstancia que no pudo ser corroborada.

Otra relación que podría ser usada para el análisis de la evolución del agua es la  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$  dado que en aguas algo salinas el ion  $\text{SO}_4^{2-}$  se mantiene constante y entonces tiene un interés similar a la  $r\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ , (Custodio & Llamas, 1976).

Cabe aclarar que los sedimentos marinos y los yesos que conforman la columna estratigráfica reaccionan con el agua subterránea en su paso, cediéndole sulfatos y provocando por lo tanto que el contenido de éstos aumente con el recorrido.

Es así que la concentración de sulfatos crece en relación directa con la de los cloruros, razón por la cual no es adecuado usar la relación  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$  para el análisis



mencionado. Con finalidad ilustrativa se expone en la figura 3.5.42 un scattle de ambos iones.

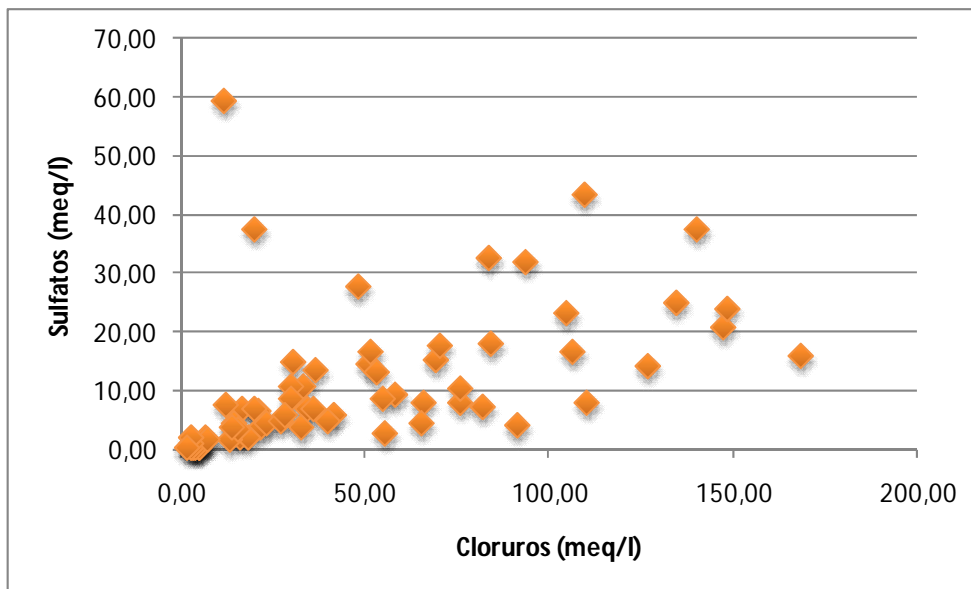


Figura 3.5.42: Relación sulfatos vs. cloruros

#### 3.5.3.6. Elementos minoritarios

La evaluación de componentes minoritarios (Pb, Zn, Cr, Mb, V, Sr,  $Fe^{2+}$ , F, B,  $NO_3^{2-}$  y HTP) se realizó con el propósito de completar la caracterización química del agua y poder analizar su aptitud para consumo humano.

Bajo esta premisa se evaluó la existencia de elementos que eventualmente pudieran estar por encima de los valores fijados para consumo humano por el Código Alimentario Argentino (CAA), prestando especial atención a aquellos pozos en los que los tenores de elementos mayoritarios sí cumplían con los requisitos de la normativa nacional, sin dejar de completar el diagnóstico con algunas muestras de elevado contenido salino.

En la Tabla A.3.5.37. del anexo se ofrecen los resultados de los análisis efectuados, remarcándose aquellos que superan el límite establecido para aguas minerales, por el CAA haciendo la distinción entre los que por su baja salinidad son aguas apta para consumo humano de aquellas que no lo son.

Para el grupo muestral analizado, se detectó que:

- Los contenidos de Zn, Cr, Cu, Mn, V, Sr,  $Fe^{2+}$  y HTP son mínimos e incluso en muchos casos con tenores por debajo del límite de detección analítico.

- La presencia de nitratos en una sola oportunidad (pozo 9), con un valor de 68,3 mg/l, superó el valor fijado por la normativa nacional.
- Las concentraciones de Boro y Plomo, fueron detectadas en niveles considerables solamente en el pozo 88, localizado por fuera del área de estudio (istmo Ameghino), y solo el Plomo superó el valor fijado por el CAA.
- Los elementos Arsénico y Flúor se encuentran en tenores superiores a los recomendados, tanto en aguas de baja como de alta salinidad con concentraciones fluctuantes entre < 0,02 (límite de detección) y 0,57 mg/l para el primero y entre 0,31 y 4,9 mg/l para el segundo.

En el caso de estos últimos dos elementos, al haber sido detectados en valores que superan los normativos, se intentó buscar alguna relación que permita predecir su comportamiento. Se procedió en primera instancia a constatar el grado de correlación entre ambos ya que arrojaron simultáneamente concentraciones elevadas para las mismas muestras.

El gráfico de dispersión realizado entre ambas variables (Figura 3.5.43), muestra una buena correlación y en principio supondría un origen común, basado en la semejanza del ciclo geoquímico de ambos en la hidrósfera.

Se ha constatado para otras regiones que esta correlación aumenta si se la realiza separadamente para las distintas unidades geomorfológicas (Matteoda *et.al.* 2007). En el caso particular de esta Tesis, dada la limitada cantidad de puntos, no fue posible concretar dicho análisis y queda pendiente para futuras investigaciones la corroboración de dicha hipótesis.

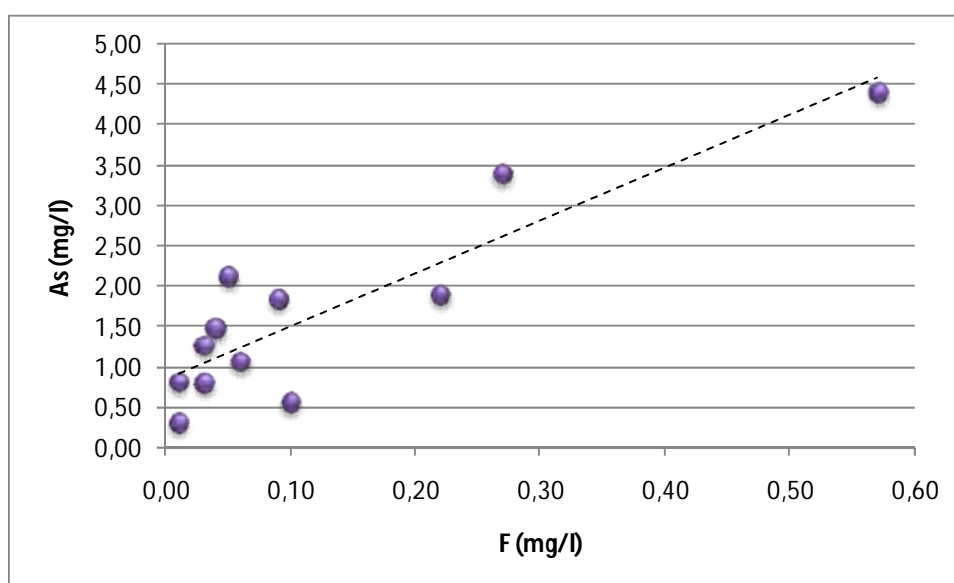
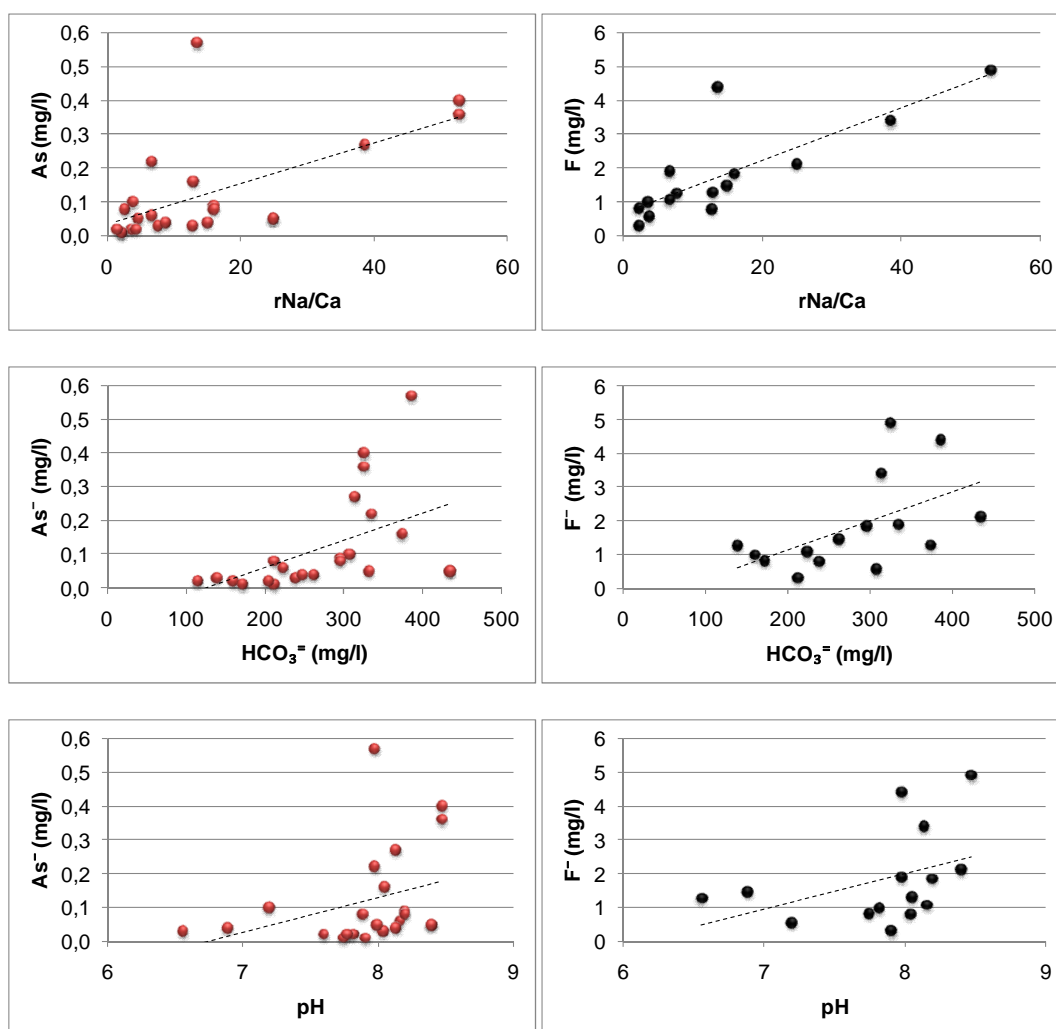


Figura 3.5.43: Relación Arsénico vs. fluoruros

En cuanto a la correspondencia del Arsénico y del Flúor con otras variables como profundidad del agua, conductividad eléctrica, pH, contenido de iones mayoritarios y relaciones iónicas, se pudo verificar un aumento del contenido de ambos elementos a medida que se incrementa la  $rNa^+/Ca^{2+}$ , (más marcado en el caso de los fluoruros), así como también una moderada relación directa con los bicarbonatos y el pH aunque con un importante grado de dispersión, (Figuras 3.5.44.).

Se notó una tendencia del aumento de As y F con la disminución de Ca y Mg, asimismo se observó un incremento de As y F con el contenido de Na aunque esta última tendencia sólo se percibe aguas para aguas con salinidades menores a 3000 mg/l y luego se discontinúa.



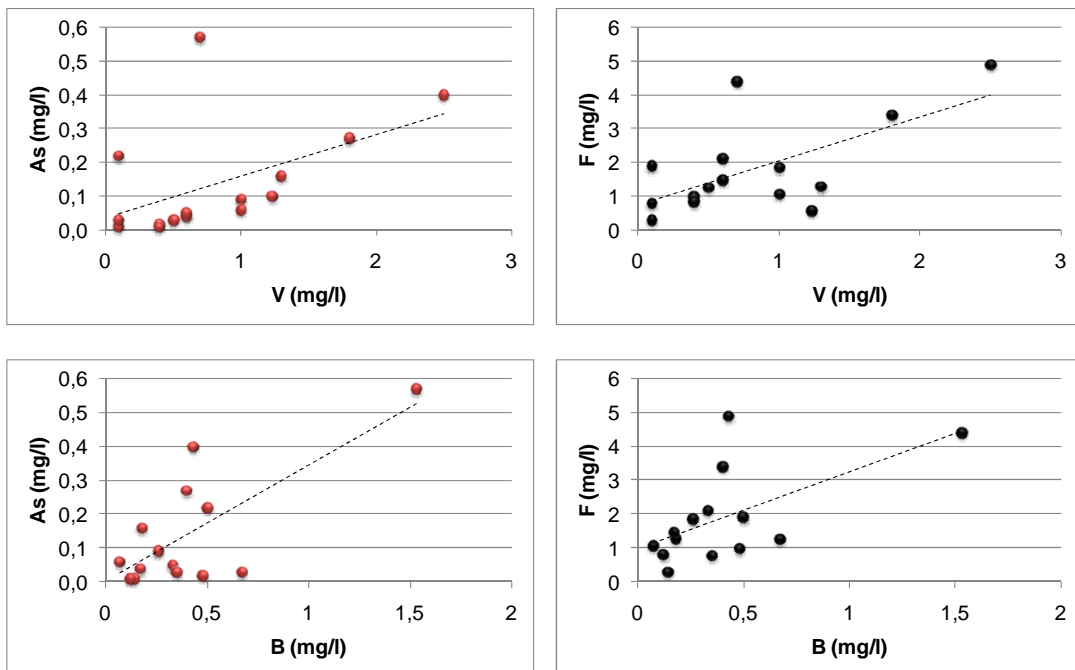
Figuras 3.5.44: Gráficos de dispersión de As y F

En cuanto al vínculo del Flúor y el Arsénico con los otros elementos minoritarios, se encontró una modesta relación directa con el Boro y el Vanadio, (Figuras 3.5.45), con los cuales ambos mostraron una relación directamente proporcional, lo cual supondría un origen vinculado para estos elementos.

Respecto al resto de las variables mencionadas, no fue posible determinar ningún tipo de relación ni con el Flúor ni con el Arsénico, no obstante lo cual los diagramas realizados se incluyen en el anexo (Figuras A.3.5.38 y A.3.5.39. respectivamente).

Nicolli *et. al.* (2007), atribuyen la presencia de estos oligoelementos (As, F, V y B) a la disolución de vidrio volcánico, favorecido por un aumento de pH de las aguas y de los contenidos de bicarbonatos, producto de la lixiviación de sedimentos con un alto contenido de vitroclastos.

El Arsénico, se encuentra también en minerales depositados por las emanaciones volcánicas, oxidándose fácilmente y dando complejos muy solubles y móviles, (Rankama & Sahama, 1962).



Figuras 3.5.45. Gráficos de dispersión de As y F vs. V y B

El Flúor, se halla comunmente formando fluorapatita y como parte de silicatos (hornblenda, micas, etc.) y tiende a formar fluoruros alcalinos solubles que aumentan su

solubilidad con la presencia de  $\text{CO}_2$ , (Rankama & Sahama, 1962). Otra fuente de fluoruros son las conchas marinas (probablemente como fluoruro de Calcio).

El contenido de estos elementos en las muestras analizadas indican que su posible fuente de origen dentro de las zona de estudio, es la disolución de las cenizas volcánicas contenidas en la *Formación Puerto Madryn*.

Así mismo las condiciones mas favorables para su disolución se generarían frente a un aumento del pH, los bicarbonatos y la relacion  $r\text{Na}/r\text{Ca}$ , situación que en general coincide con las aguas de mejor calidad.

No obstante no es el objetivo de esta investigación concluir acerca del origen de los oligoelementos, ni tampoco sería correcto dada la pequeña población muestral, sino dejar planteado la existencia de los mismos para ser tenidos en cuenta en futuras investigaciones.

Con respecto a los contenidos regionales de  $\text{NO}_3^{2-}$ , excepto en un caso puntual, se mantienen por debajo de lo que el CAA establece, lo cual es lógico, porque siendo su origen frecuente la descomposición orgánica y la contaminación urbana, industrial y/o ganadera, no sería esperable encontrarlo en cantidades considerables en una comarca de clima árido, con ganadería extensiva y prácticamente nula población. Tampoco existen menas de Nitrógeno.

Para que se produzca bajo estas condiciones, una contaminación por nitratos, tienen que combinarse una serie de factores como los presentes en el pozo 9. A saber, la presencia de una fuente de contaminación importante (pozo ciego y/o concentración puntual de la hacienda), un sustrato altamente permeable y una ZNS de poco espesor. De no ser así y dadas las condiciones de aridez de la comarca, el transporte de contaminantes desde la superficie hacia el acuífero es particularmente lento y los procesos atenuadores que tienen lugar en la zona de aireación impedirían la llegada del contaminante al acuífero.

Por último, la **distribución espacial de los oligoelementos** es mostrada en el mapa de la figura 3.5.46 mediante gráficos circulares posicionados geográficamente sobre el sitio de toma de la muestra.

Debido a una razón de escala, se decidió no incluir a los nitratos dentro de los diagramas ya que sus concentraciones aunque muy bajas, superan en órdenes de magnitud la de los otros componentes.

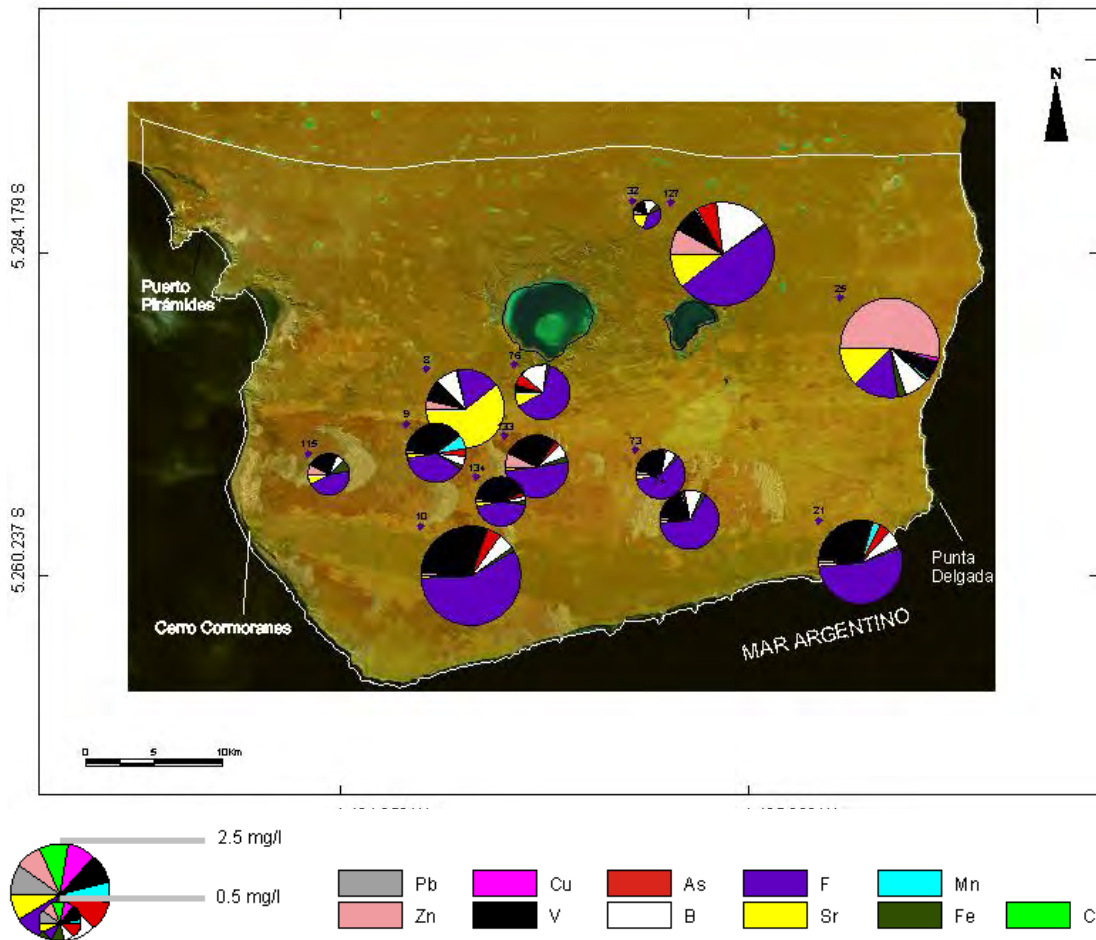


Figura 3.5.46: Mapa de localización y concentración de elementos minoritarios

Se puede apreciar que el Flúor se halla en proporciones considerables en todas las muestras y generalmente superando el 50 %. El Vanadio, por su parte, en la zona de médanos muestra concentraciones que llegan a superar el 45 % del total de los oligoelementos determinados y el Boro se presentan en concentraciones modestas pero en todos los pozos.

Otros oligoelementos exhiben concentraciones puntuales importantes (mayores al 50 %), como es el caso del Estroncio en la muestra 8, el Cinc en la 25.

### 3.5.3.7. Variaciones temporales

Con la intención de evaluar la variabilidad temporal de la calidad química, se hizo un análisis comparativo de las conductividades eléctricas comparando los resultados

correspondientes a los muestreos de Noviembre 2005, Octubre 2006, Junio 2007 y Marzo 2008 (Figura 3.5.47).

Se observa que en general los valores se mantienen dentro del orden de magnitud aunque muestran ciertas fluctuaciones que no responden de manera regular a una componente temporal. En los casos particulares de los pozos 4, 19, 70, 78 y 82, que no se encuentran en el ámbito medanoso principal, se detectaron fluctuaciones mayores que en el resto. De éstos, salvo el 82 que es un depósito costero, los restantes se encuentran en ambiente de Planicies aterrazadas.

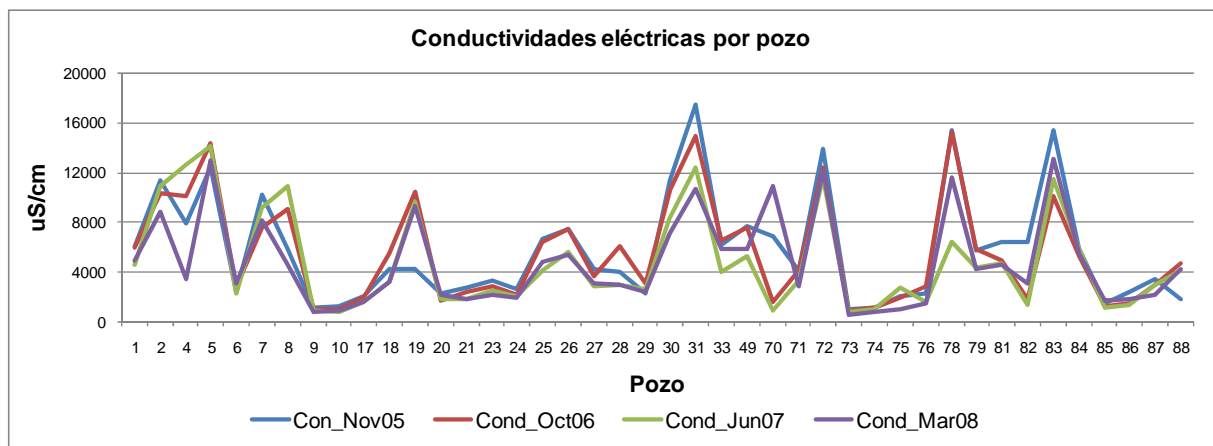


Figura 3.5.47: Conductividades eléctricas por pozo. Años 2005, 2006, 2007 y 2008.

Respecto a los iones mayoritarios causantes de la fluctuación del contenido salino, se identificó (Figura 3.5.48) que en las muestras con conductividades menores a 6.000 uS/cm responde a las variaciones de la concentración de los cloruros y el Sodio y secundariamente a la de los sulfatos. En cambio en aquellas con valores más elevados están regidas casi exclusivamente por los cloruros, como sería de esperar por ser el más conservativo y además el dominante en las aguas más evolucionadas.

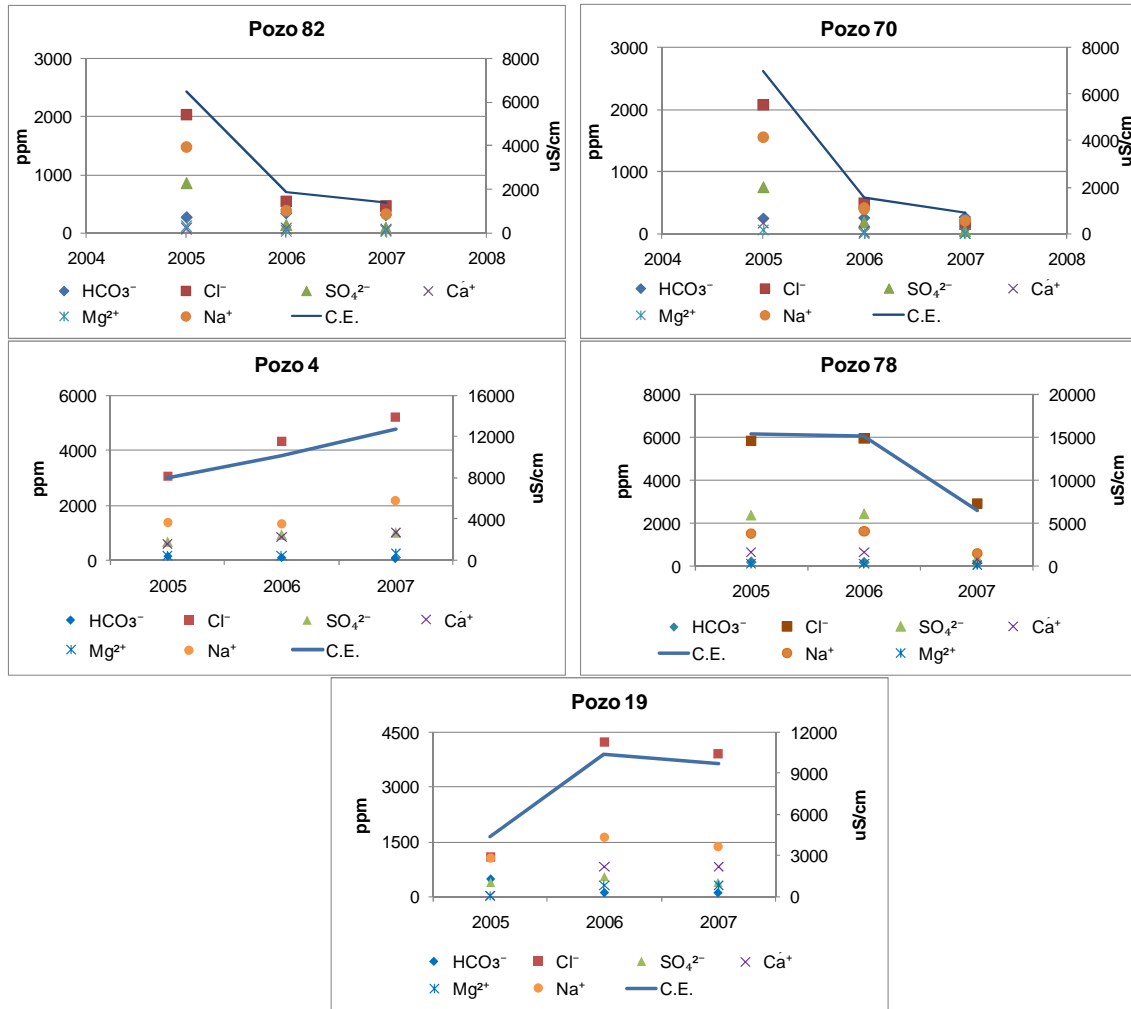


Figura 3.5.48: variaciones temporales de elementos mayoritarios

Finalmente y en cuanto al origen de las variaciones, se plantean las siguientes hipótesis:

- En el caso del pozo 82 (depósito costero) y dada su cercanía al mar, las variaciones en el contenido de cloruros estarían ocasionadas por un avance tierra adentro de la **cuña salina** (interfaz agua dulce - agua marina) en los momentos de bombeo más intensivo y su posterior retroceso en la época de mayores precipitaciones, producto de una recarga local en estos depósitos de alta permeabilidad.
- Para el resto de los pozos, ubicados en posición alejada de la costa, la hipótesis anterior no es obviamente aplicable y se plantean otras dos alternativas. Por un lado la **estratificación vertical por diferencia de densidades** dentro del mismo pozo (factible de suceder en los pozos abandonados) y por otro el **ascenso de una interfase salina**, correspondiente a aguas semiconfinadas profundas, producto de un bombeo intensivo.



La constatación de estos supuestos queda pendiente para futuras investigaciones puesto que requiere un análisis de detalle con observaciones secuentes mas prolongadas, que no fue posible realizar en el marco de esta investigación ni fue el objetivo de la misma.

#### 3.5.3.8: Modelo conceptual del comportamiento hidroquímico

Coherentemente con la metodología general expuesta en el ítem 2.1, en este acápite como en el resto de la Tesis, se acude a un razonamiento preferentemente deductivo, en el cual las hipótesis que se toman no son las acabadamente más certeras, sino las más plausibles (Hernández, 2000).

El modelo hidroquímico considera esencialmente un flujo vertical que se infiltra rápidamente en las arenas de la unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos hasta llegar a la formación acuífera (*Formación Puerto Madryn*) y luego un flujo desde allí hacia las zona de descarga externa (contorno litoral), e interna (Salinas Grande y Chica). Dada la escasísima intervención del hombre respecto al bombeo, no se considerará, en principio, la posibilidad de intrusión salina.

Respecto a las reacciones que ocurren dentro del acuífero se mencionan a continuación, aquellas que han sido descartadas y luego las que resultaron más plausibles de suceder para explicar los cambios químicos desde las zonas de recarga a las de descarga.

En primer lugar, puesto que no se han detectado compuestos orgánicos, se descartan fenómenos de volatilización o reacciones metabólicas. Dentro de los otros fenómenos modificantes no debería incluirse a la reducción por tratarse de un medio con escaso a nulo contenido de materia orgánica ni a la dilución por lo exiguo de los aportes pluviales locales e inexistencia de aguas importadas.

Teniendo en cuenta el escaso tenor de materia orgánica de los suelos locales (*Aridisoles* y *Entisoles*), la incorporación de CO<sub>2</sub>, en la zona de recarga se considerará solo en proporciones muy pequeñas como responsable de las reacciones de disolución de los carbonatos presentes en el perfil de la zona (niveles de conchillas y cementos carbonaticos).

De modo que el mecanismo evolutivo presente está marcado por un sello químico impuesto por la solubilidad de los iones y señalado por el incremento del anión más conservativo y de movilidad advectiva, cual es el cloruro. Considerando a su vez las bajas velocidades de flujo subterráneo (del orden de 10<sup>-2</sup> m/d) y el consecuente elevado tiempo de

residencia del agua en el acuífero, se asume que las reacciones ocurren en equilibrio con las fases minerales presentes.

El contenido en  $\text{Cl}^-$  se incrementa claramente como ya se ha dicho en el sentido de flujo, coincidentemente con el decrecimiento de las concentraciones de bicarbonatos y más marcadamente que el del sulfato. En el primer caso en razón de la de por sí muy baja presión de  $\text{CO}_2$  que afecta la permanencia en solubilidad de los bicarbonatos. En el segundo, por la presencia de un sello litológico impuesto por la presencia de yeso, mineral bastante lábil dentro del ciclo hidroquímico.

Dentro de este panorama, se considera también a la influencia de fenómenos modificantes de cambio de bases, principalmente en la zona de recarga, donde los valores negativos obtenidos para los índices icb I  $(r\text{Cl}^- - (r\text{Na} + \text{K})/r\text{Cl}^-)$  e icb II  $(r\text{Cl}^- - r(\text{Na} + \text{K}))/r(\text{SO}_4 + \text{CO}_3\text{H} + \text{NO}_3)$  así como el aumento de la relación  $r\text{Na}/r(\text{Ca} + \text{Mg})$  estarían señalando un ablandamiento del agua.

Se postula entonces una hipótesis basada principalmente en la disolución, reconociéndose de esta forma un modelo clásico de evolución regional signado por la solubilidad como fuese ya clásicamente descrito por Schoeller (1962), Hem (1967) y Custodio y Llamas (1979), con incremento en el sentido del flujo del ion cloruro, menos evidente del ión sulfato y decrecimiento del bicarbonato. Respecto a la variación de los tenores de los cationes principales, la secuencia se inicia con aguas de características predominantemente sódicas, ya sea por el intercambio catiónico más arriba mencionado, ya sea por otros aportes tales como los sugeridos al tratar el origen del ión  $\text{Na}^+$ , evolucionando en el sentido del flujo hacia términos cada vez más sódicos.

Respecto a la simulación hidrogeoquímica, puesto que esta Tesis no es esencialmente hidroquímica sino regional y teniendo en cuenta lo expuesto por Vazquez Suñé (2009), *"...Se pueden conseguir buenos resultados con comparaciones sencillas y un uso apropiado de valores y relaciones iónicas, y normalmente de forma mucho más rápida. El uso prematuro de códigos o modelos como los indicados puede resultar complejo y puede hacer perder de vista fácilmente el objetivo interpretativo, que es identificar y cuantificar el funcionamiento acuífero. Su utilidad es más clara en etapas posteriores de afinamiento..."*, se plantea incursionar en las técnicas de modelado numérico, en una instancia posterior de perfeccionamiento del modelo, que van más allá del alcance de esta Tesis.

No obstante y con un espíritu eminentemente corroborativo se está probando con el programa NETHPATH 2.0 (Plummer et.al. 1994) a lo largo de líneas de flujo representativas,

los cambios químicos entre extremos localizados en las zonas de recarga y descarga principales.

El código NETHPATH 2.0 es un programa que permite el modelado de las reacciones geoquímicas a lo largo de líneas de flujo mediante un modelo inverso o de balance. Este tipo de modelos “...calculan las reacciones químicas netas que han ocurrido en el medio físico entre dos puntos situados sobre una línea de flujo y de los cuales se conoce la composición del agua. Se parte de la composición de una solución inicial y una solución final y se consideran un conjunto de reacciones plausibles (modelo hidrogeoquímico conceptual) que pueden tener lugar en el sistema considerado...”. (Martínez *et.al.* 2000)

Los resultados preliminares, para la línea de flujo analizada, comprendida entre los pozos 73 (zona de recarga, unidad Médanos y mantos arenosos) y 27 (zona de descarga, salina Chica), indican que a partir de las restricciones (constraints) o datos químicos utilizados (iones mayoritarios) y las fases contempladas (ClNa, SO<sub>4</sub>Ca, calcita, aragonita, plagioclasas, biotita, Illita, CO<sub>2</sub> y reacciones de intercambio) sólo dos modelos serían plausibles dentro de los 120 chequeados por el programa. Ambos coinciden con la hipótesis más arriba mencionada, ya que postulan la disolución de ClNa y yeso como las principales reacciones entre la recarga y la descarga. Los fenómenos de intercambio toman una posición subordinada y entre los dos modelos se diferencian en que uno postula la precipitación de calcita y el otro la de aragonita, considerándose como más acertado el primero puesto que se han encontrado cementos de calcita.

La descripción de la investigación isotópica realizada en el ítem 3.5.4 hace alusión también a algunos de los procesos actuantes en la hidroquímica del sistema.

#### 3.5.3.9. Calificación para los distintos usos

De acuerdo con Custodio y Llamas (2001) “...La calidad del agua queda definida por su composición, y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de ellos, permite establecer las posibilidades de utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para la bebida, usos agrícolas, industriales, etc...”.

### **Aptitud para consumo humano**

De modo general, se denomina agua potable a aquella que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud.

Entre las diversas normas que reglamentan las características a tener en cuenta para calificar el agua de bebida, se tomó la establecida por el Código Alimentario Argentino (CAA) en el cual existe una disquisición entre “agua mineral” y “agua potable de suministro público y de uso domiciliario”, por lo cual se decidió hacer la calificación bajo ambos conceptos.

*“...Se entiende por **Agua mineral natural** un agua apta para la bebida, de origen subterráneo, procedente de un yacimiento o estrato acuífero no sujeto a influencia de aguas superficiales y proveniente de una fuente explotada mediante una o varias captaciones en los puntos de surgencias naturales o producidas por perforación...”* (Artículo 985 - (Res MSyAS N° 209 del 7.03.94))

*“...Con las denominaciones de **Agua potable de suministro público y Agua potable de uso domiciliario**, se entiende la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener substancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, límpida y transparente. El agua potable de uso domiciliario es el agua proveniente de un suministro público, de un pozo o de otra fuente, ubicada en los reservorios o depósitos domiciliarios...”* (Artículo 982 - (Res MSyAS N° 494 del 7.07.94)).

En primer lugar, será evaluada su aptitud en función de los parámetros establecidos para un agua mineral natural, cuyos límites de tolerancia son más permisivos que los fijados para la de suministro público.

De los caracteres a considerar fijados por dicho código: sensoriales, químicos y físico-químicos, contaminantes y calidad microbiológica, se optó inicialmente por evaluar la calidad en función de los caracteres químicos y físico-químicos tomando como indicador de partida, el Total de Sólidos Disueltos (TDS), (determinador general, económico y de fácil obtención), que tal como lo establece el CAA no puede superar los 2000 mg/l.

De este primer análisis surge la presencia de un sector de buena aptitud localizado en el Sur, coincidente con el área medanosa, cuyos tenores de TDS son menores a 2000 mg/l, rodeado de otro de inferior calidad, con TDS mayor a 2000 mg/l.

Esta zonificación responde principalmente al contenido de los iones cloruro y Sodio, y secundariamente a los sulfatos y el Magnesio, tal como se adelantó al clasificar las aguas, al analizar separadamente cada uno de los elementos mayoritarios y como puede corroborarse en las correlaciones expuestas en la figura 3.5.3.49.

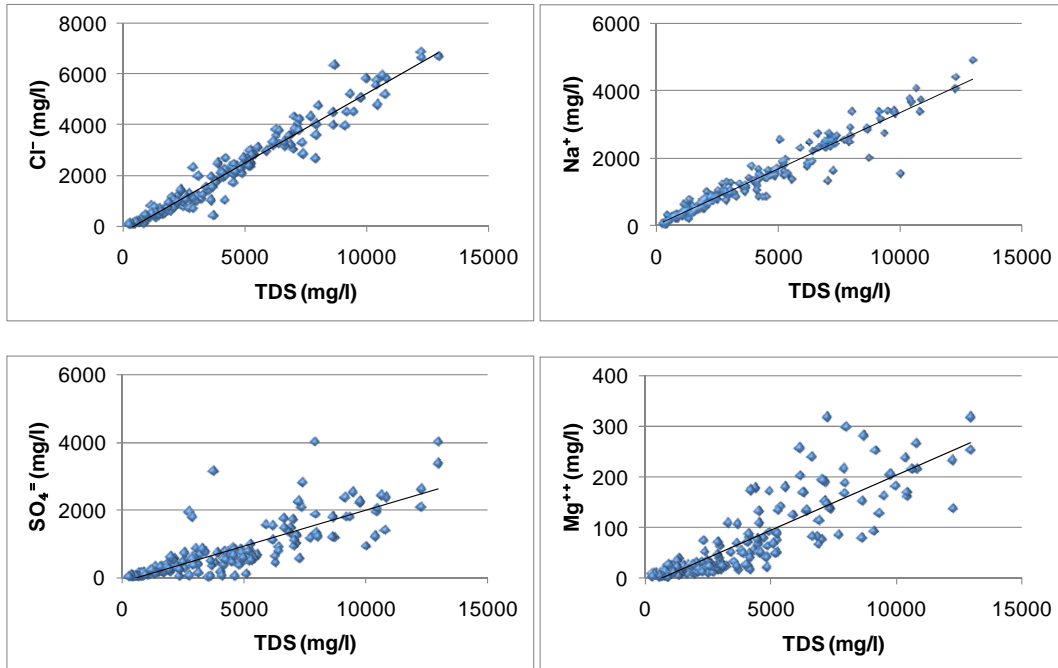


Figura 3.5.49. Gráficos de dispersión TDS vs. Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Mg<sup>2+</sup>

Dado que los aniones cloruro y sulfato son limitantes de la calidad del agua (máximos aceptables 900 mg/l y 600mg/l respectivamente), se procedió a comparar su contenido con la zonificación realizada en función del TSD. Se incorporó también el contenido de Arsénico, cuyo límite de tolerancia para un agua mineral natural es de 0,2 mg/l.

A partir de la evaluación de las concentraciones de TSD se establece un importante sector con valores aceptables representado en color azul en la Figura 3.5.50. Al incorporar las variables concentración de cloruros y de sulfatos, se aprecia una buena coincidencia entre los valores aptos de ambos aniones y los de TSD menores a 2000 mg/l. En un solo caso, ubicado en la parte más austral, se detectó que para un TDS menor a 2000 mg/l el contenido de cloruros superaba los estipulados por el CAA.

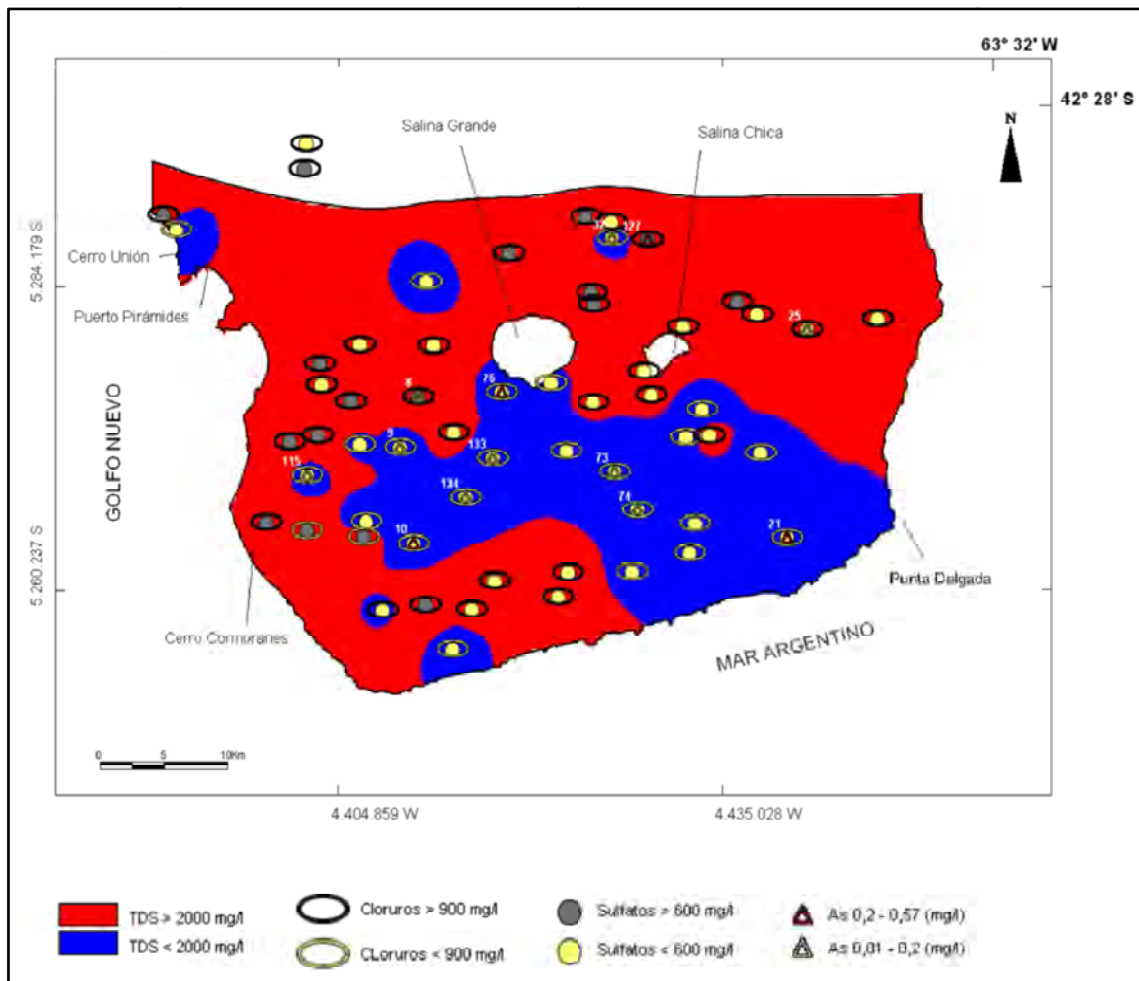


Figura 3.5.50.: Aptitud para agua mineral natural.

No obstante esta primera calificación, hay que tener en cuenta la presencia de Flúor y Arsénico que, tal como se adelantara, en pequeñas cantidades resultan tóxicos para el ser humano. A los fines de no desmejorar la calidad gráfica de la imagen y dada la buena correlación detectada entre ambos elementos, se decidió incorporar a la figura 3.5.50 sólo el contenido de Arsénico, con el propósito de mostrar comparativamente la presencia de estos compuestos respecto de las aguas de mejor calidad.

Desafortunadamente, se detectaron contenidos de Arsénico superiores a los 0,2 mg/l en algunas muestras que según el TSD y el contenido de elementos mayoritarios hubieran sido calificadas como aptas para consumo humano. Como se expuso anteriormente, no existe una correlación clara que permita inferir la presencia o no de este contaminante natural sin hacer un análisis específico para su determinación.

Hasta aquí se ha evaluado la aptitud en relación a los parámetros establecidos para un agua mineral natural. En el caso de que se pretenda hacer una explotación para

abastecimiento público, habrá que considerar los límites establecidos para dicho fin, bastante inferiores a los anteriores.

Se deberá considerar en principio un contenido límite del TSD de 1500 mg/l, y concentraciones de cloruros, sulfatos y arsénico menores a 350 mg/l, 400 mg/l y 0,05 mg/l respectivamente.

La figura 3.5.51. muestra el resultado de utilizar dichos valores. Es claro que el sector de calidad apta se reduce grandemente con solo considerar el TSD. A esto, se le suma la limitante por cloruros que deja afuera alrededor del 50 % de los pozos con TSD <1500 mg/l y por último, al considerar el contenido de Arsénico, solo quedan tres puntos que califican como aptos dentro aquellos en los que se determinó este elemento.

No obstante estas limitantes, debe tenerse presente que, frente a una demanda de abastecimiento público en una zona donde el recurso agua superficial no existe y solo quedan como alternativas la importación o la desalinización de agua de mar, la evaluación de un tratamiento de mejora de la calidad del agua subterránea puede ser una alternativa económicamente rentable y técnicamente posible.

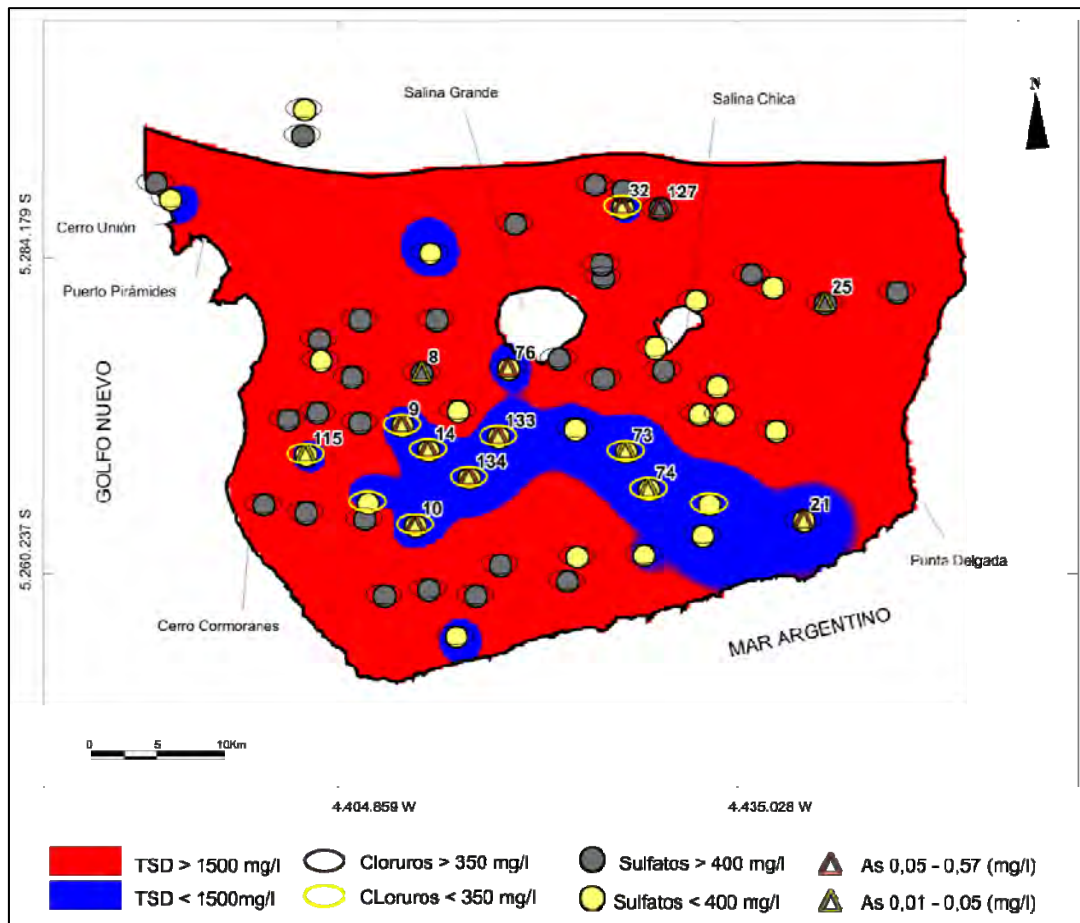


Figura 3.5.51.: Aptitud para agua potable de suministro público

### ***Aptitud para uso agrícola***

En la calificación respecto a su aplicación al riego, resulta insuficiente dictaminarla solamente a partir de su calidad química, puesto que deberán ser tenidos en cuenta también otros factores como son la permeabilidad y calidad del suelo, tipo de cultivo, sistema de riego, periodicidad y otros.

No obstante, dado que se pretende dar una calificación tentativa de la calidad del agua para su potencial uso agrícola, se ha realizado un agrupamiento de las mismas en función la clasificación de aguas para riego de la U. S. Salinity Laboratory Staff (1954).

En función de su RAS y conductividad eléctrica, se logró identificar a las distintas muestras en los siguientes tipos:

- 67 %: aguas con riesgo de salinización muy alto y de alcalinización entre alto y muy alto.
- 24 %: aguas con riesgo de salinización alto y de alcalinización entre medio y muy alto.
- 9 %: aguas con riesgo de salinización medio y de alcalinización entre bajo y medio.

Las aguas de mejor calidad resultaron ser las localizadas en la zona medanosa, como era de esperar por ser las de menor TDS.

En cuanto a la posible utilización, cabe aclarar que el riesgo es mayor en suelos con drenaje deficiente que en los bien drenados, por lo cual en todo el sector medanoso aquellas aguas calificadas como con alto riesgo de salinización y de alcalinización media podrían utilizarse bajo una selección de especies vegetales muy tolerantes a las sales, y posibilidades de control de la salinidad del suelo.

Respecto al contenido de Boro, que aunque necesario para las plantas reconoce límites muy ajustados (Custodio & Llamas, 2001), se detectaron, para aquellas muestras con mejores aptitudes en función de la salinidad y la alcalinidad, tenores entre 0,07 y 0,43 mg/l, recomendables para cultivos sensibles a dicho elemento.

Por último, se establece en la clasificación la presencia Carbonato Sódico Residual (CSR), el cual arrojó valores variables entre buenos, dudosos y malos.



### ***Aptitud para uso ganadero***

Si bien no existen clasificaciones concretas referidas a la calidad del agua para los distintos grupos de ganado, en general se acepta que aquellas con contenidos de total de sólidos disueltos superiores a 10 g/l son desaconsejables y que con tenores mayores a 4 g/l pueden presentar algunos problemas aunque los animales pueden adaptarse, especialmente los ovinos, (Sager, 2000).

Otra limitante en la calidad es el contenido de sulfatos. Dada la propiedad laxante del este anión, aguas con concentraciones superiores a 4000 mg/l son consideradas desaconsejables.

En cuanto a los cloruros, son beneficiosos sobre todo cuando están asociados al sodio, puesto que otorgan un sabor salado y se las califica como “engordadoras” por su efecto retentor de líquidos en el organismo.

Afortunadamente, en el área de estudio tanto los valores de total de sólidos disueltos como los tenores de sulfatos se encuentran dentro del rango de aptitud, a lo cual se suma el carácter clorurado sódico que caracteriza a las aguas de prácticamente toda la región. Esta calificación favorable del agua para consumo animal, queda ampliamente avalada por la larga historia ganadera ovina que caracteriza a la Península Valdés.

Por último, hay que tener en cuenta al momento de plantear una extracción, para cualquiera de los usos posibles, el caudal óptimo de explotación de forma de no provocar una salinización, ya sea en la zona costera por influencia del mar o en la zona interna de la Península por la presencia de una interfaz salina en profundidad, para que dicha explotación resulte sustentable.

#### **3.5.4. Hidrología Isotópica**

La hidrología isotópica se utilizó como herramienta auxiliar con dos propósitos fundamentales: analizar la procedencia del agua contenida en las salinas y distintos niveles acuíferos y además, estimar el tiempo de residencia media en el/los acuíferos.

##### **3.5.4.1. Análisis del origen de las aguas subterráneas. $^{18}\text{O}$ y $^2\text{H}$**

Se ha probado, con argumentos hidrogeológicos, hidrodinámicos e hidroquímicos, la procedencia continental y predominantemente subterránea del fluido contenido en los humedales salinos y acuíferos tanto someros como profundos, se creyó conveniente utilizar

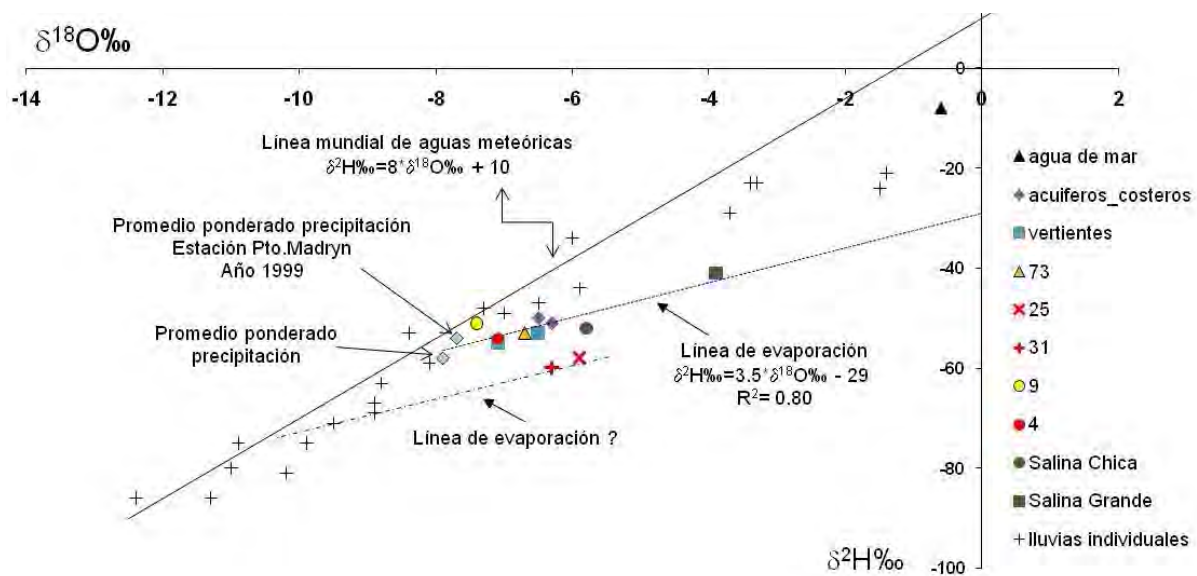
también como indicador diagnóstico de alto valor a los isótopos ambientales Deuterio ( $^2\text{H}$ ) y Oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ).

Para la interpretación de los datos isotópicos del sistema es fundamental el conocimiento de la función de entrada representado por las precipitaciones. En esta zona se cuenta con el registro de la Estación Colectora de Puerto Madryn. Aunque el registro disponible es incompleto para obtener una recta meteórica local, los datos son útiles para su caracterización. Las precipitaciones muestran una gran dispersión con valores entre  $-12,9\text{‰}$  y  $-0,9\text{‰}$  para  $^{18}\text{O}$  y entre  $-86\text{‰}$  y  $-21\text{‰}$  para  $^2\text{H}$ . Sólo se ha podido calcular el promedio ponderado de los años 1999 y 2000 que corresponde a  $-7,7\text{‰}$  y  $-54\text{‰}$  y  $-7,9\text{‰}$  y  $-58\text{‰}$  para  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  respectivamente.

La figura 3.5.52 muestra el diagrama  $^2\text{H}$  vs.  $^{18}\text{O}$  (expresados en desviaciones por mil) con las aguas subterráneas, salinas Grande y Chica, agua de mar, lluvias individuales, promedios ponderados de la precipitación años 1999-2000 y como referencia la recta mundial de aguas meteóricas.

En general, se observa, un alineamiento de las muestras del dominio subterráneo desde un origen próximo al promedio de las aguas pluviales, hasta la correspondiente a la Salina Grande según posible recta de evaporación y sin vinculación con la posición de la marina.

La pendiente de la recta (de valor menor a 4) que correlaciona los puntos muestreados, correspondería procesos de evaporación ocurridos durante la infiltración por la zona no saturada, o por pérdida depletiva desde el acuífero freático por medio de la vegetación (Escuder, *et.al*, 2009).



3.5.52: Diagrama de isótopos estables  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$

En el caso de la muestra 9, la posición en el gráfico es muy cercana a la de la línea mundial de aguas meteóricas, señalando su origen directo por recarga de agua de lluvia sin previa evaporación ni mezcla con otras. Concordantemente con esta evidencia, la muestra corresponde a un acuífero somero (10 m de profundidad) contenido en los depósitos eólicos cuaternarios.

Analizando particularmente los puntos, 25 y 31, puede notarse que su comportamiento se separa del anteriormente descrito. Estas muestras corresponden a las unidades Planicies aterrizadas la primera y Depresiones endorreicas la segunda. Para explicar su origen se pueden plantear dos hipótesis. Una es por procesos de evaporación desde aguas más empobrecidas, que como se observa en la figura 3.5.52 están presentes en la región. Otra posibilidad es la mezcla con aguas provenientes de niveles más profundos de los cuales se desconoce la composición isotópica.

#### 3.5.4.2. Estimación del tiempo de residencia medio. $^3\text{H}$ y $^{14}\text{C}$

Como se explicara en el apartado metodológico, el **Tritio** resulta de gran utilidad para estimar el tiempo de residencia medio del agua de un acuífero, de tal modo que los valores en Unidades de Tritio (UT) similares al de las precipitaciones de las cuales se recarga el acuífero, indicarán tiempos relativamente cortos desde la infiltración.

Como se ha señalado en párrafos anteriores el conocimiento de la función de entrada es primordial para la interpretación de los datos medidos en el sistema acuífero. Antes de avanzar en el análisis de los resultados, cabe aclarar que los datos de Tritio de aguas meteóricas para la región son escasos y han sido tomados de la Estación Puerto Madryn. Los valores varían entre 3.4 UT y 13.3 UT y corresponden a los años 1982, 1983 y 1984. Los valores promedio ponderados son: 6.2 UT, 7 UT y 5.8 UT, respectivamente. Los valores máximos corresponden a los picos primavera-verano. Sin embargo, esta información es insuficiente para elaborar una función de entrada plurianual promedio  $^3\text{H}$  para la zona de estudio.

Es por tal razón, que se considerada adecuada sólo una interpretación cualitativa o referencial, con la finalidad de evaluar comparativamente los tiempos de residencia medios del agua al acuífero para los distintos sitios muestreados (Tabla 3.5.3.).

Tabla 3.5.3: Contenidos de Tritio en agua subterránea

Pozo	Profundidad del nivel freático (m)	Concentración de Tritio (UT)	Tiempo de residencia media
84	3.6	6.1 ± 0.8	Reciente o moderna
14	39.6	0.1 ± 0.7	Submoderna o mezcla con aguas más viejas
73	20.4	2.8 ± 0.8	Moderna o mezcla con aguas más viejas
25	44.5	1.0 ± 0.7	Mezcla entre submoderna y reciente o mezcla con aguas más viejas
82	3.6	4.7 ± 0.8	Reciente o moderna
9	11.1	1.9 ± 0.3	Mezcla entre submoderna y reciente o mezcla con aguas más viejas

Se aprecia que los contenidos de  $^3\text{H}$  para los pozos ubicados en los depósitos costeros (82 y 84) son los más elevados de todos los analizados, indicando aguas recientes, situación acorde a la posición somera del nivel freático y al material de alta permeabilidad que caracteriza al acuífero continente.

Las muestras 9 y 73, ambas localizadas en la Unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos corresponden a aguas modernas y mezcla submoderna- reciente, respectivamente. En ambos casos también podría haber una mezcla con un flujo regional más antiguo. En el caso de 73, si bien la profundidad del nivel freático es mayor a la del anterior, es menester aclarar que por ser una perforación de gran diámetro y sin entubar podría estar ocurriendo una mezcla dentro del pozo, ya sea con agua superficial que ingresa directamente o por algún nivel “colgado” superior.

En el caso del pozo 25, nuevamente el bajo contenido de  $^3\text{H}$  indica mezcla entre submoderna y reciente o mezcla con aguas más viejas. No obstante no se debería descartar una recarga meteórica producida localmente sobre el área ya que sería lógico pensar que una parte del agua infiltra localmente, y otra llega por aporte subterráneo desde la zona de recarga principal, resultando por lo tanto en una real mezcla de aguas.

Por último, es necesario resaltar la marcada diferencia del pozo 14 con respecto a los restantes, ya que en éste, el contenido de Tritio se corresponde con un agua cuya

infiltración habría ocurrido antes de 1952. Esto, estaría acorde con la profundidad a la cual se localiza el nivel acuífero, ya que se trata de una perforación de casi 80 m de profundidad, con filtros cercanos a la base.

Considerando que se halla situado en posición central de la zona de recarga, a pocos kilómetros de los pozos 9 y 73, se estima que se trata de un nivel semiconfinado, tal como se supuso a partir de la interpretación del perfil de la perforación "Los médanos" y que el mayor tiempo transcurrido desde el ingreso, estaría vinculado al retardo del flujo descendente, dada la presencia de un acuitardo superior.

La aplicación del **método de  $^{14}\text{C}$**  al fechado de aguas requiere el empleo de modelos matemáticos, debido a que el carbono inorgánico disuelto del agua está formado por el proveniente de la actividad inicial en la recarga y proporciones variables de carbono muerto de los sedimentos del acuífero. Los modelos simulan evoluciones probables de la química y la actividad  $^{14}\text{C}$  y el  $\delta^{13}\text{C}$  del bicarbonato disuelto. En Taylor *et al.* (1992) se puede consultar una completa recopilación de los modelos disponibles.

En este trabajo, de las dos muestras extraídas (73 y 14) solo se pudo llevar a cabo el análisis en una de ellas (73), puesto que en la otra el precipitado no contenía la cantidad de C necesaria para concretar el análisis. Además no se pudo realizar el análisis del  $\delta^{13}\text{C}$  del bicarbonato disuelto, indispensable para la aplicación de los modelos.

No obstante, a partir del valor de la actividad medida en la muestra 73 de  **$74,74 \pm 0,75$  pMC**, se ha calculado una edad aplicando la fórmula mencionada en el apartado metodología que arrojó un valor de 2400 años.

Es muy evidente que este valor es contradictorio con el obtenido mediante el análisis de Tritio, por lo cual, considerando que la determinación por  $^3\text{H}$  es más fiable, ya que el elemento datado forma parte de la molécula de agua y que además resulta más apropiado para aguas jóvenes, resta pensar que la determinación por  $^{14}\text{C}$  no responde estrictamente a la verdadera edad del agua.

Es probable que, este envejecimiento de la muestra responda a una incorporación de Carbono proveniente de la disolución de las conchillas ( $\text{CaCO}_3$ ) terciarias de la *Formación Puerto Madryn* o a mezcla con aguas más antiguas procedentes de un flujo regional obteniéndose de ese modo una edad producto de mezcla de Carbono de distintos orígenes.

Finalmente, a modo de síntesis respecto de la estimación de los tiempos de residencia y acudiendo a una extrapolación a partir de los resultados mostrados en los

ambientes geohidrológicos similares, puede decirse que existirían al menos tres niveles acuíferos:

- Uno localizado en los depósitos costeros, cuyo tiempo de residencia media es prácticamente actual.
- Uno libre contenido en los sedimentos de la *Formación Puerto Madryn* cuyo tiempo de residencia media es moderno a submoderno dependiendo de su ubicación respecto a la principal zona de recarga.
- Uno semiconfinado contenido en la *Formación Puerto Madryn* cuyo tiempo de residencia media es anterior a 1952.

### 3.5.5. Calculo de Reservas

En términos generales, se denomina **reserva** a la totalidad del agua movilizable contenida dentro de un acuífero, (Custodio & Llamas, 1976).

Tal como se explicara en el apartado metodológico, las reservas para el acuífero libre, fueron calculadas desde la superficie freática hasta el primer nivel acuícludo o acuitardo, considerándose un espesor saturado mínimo, porosidad efectiva de 12,5 % y un área que excluye las zonas de descarga.

A su vez, se hizo una distinción entre las reservas de calidad apta para consumo humano, de aquellas que solo califican para abrevamiento ganadero, tomándose como superficie de cálculo para las primeras, la definida en el acápite hidroquímica como zona con aguas aptas para suministro público (Figura 3.5.53.).

Como puede notarse, la elección de los valores para cada uno de los parámetros considerados, tendió a subestimar los resultados a favor de la seguridad del cálculo y de la preservación del recurso agua subterránea, obteniéndose así los siguientes resultados:

#### 3.5.5.1. Reservas totales generales

$$\text{Área total menos áreas de descarga} = 1500 \text{ km}^2$$

$$\text{Espesor} = 0,006 \text{ km}$$

$$\text{Porosidad efectiva} = 0,125$$

$$\text{Reserva} = 1,125 \text{ km}^3 \approx \mathbf{1100 \text{ hm}^3}$$

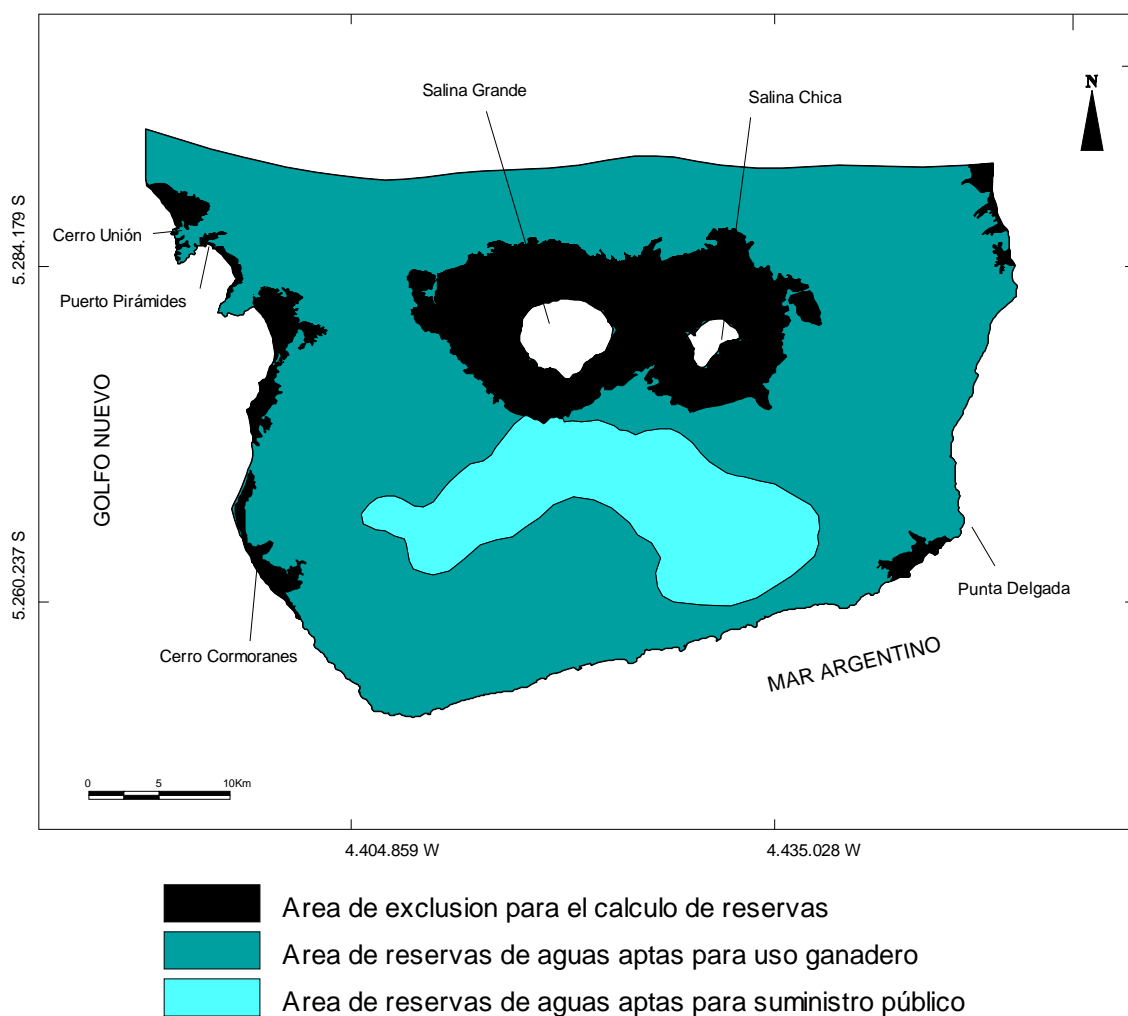


Figura 3.5.53: Áreas consideradas en el cálculo de reservas

### 3.5.5.2. Reservas totales de agua apta para abastecimiento público

Área con calificación apta para consumo humano =  $200 \text{ km}^2$

Espesor =  $0,006 \text{ km}$

Porosidad efectiva =  $0,125$

Reserva =  $0,15 \text{ km}^3 \approx 150 \text{ hm}^3$

### 3.5.5.3. Reservas totales de agua de baja calidad

Área con calificación no apta para consumo humano =  $1300 \text{ km}^2$

Espesor =  $0,006 \text{ km}$

$$\text{Porosidad efectiva} = 0,125$$

$$\text{Reserva} = 0,975\text{km}^3 \approx \mathbf{950 \text{ hm}^3}$$

Los resultados hasta aquí mostrados, corresponden a las reservas geológicas o profundas, es decir, a todo el volúmen de agua movilizable incluido en el acuífero, sin discriminar aquel que se repondría en un ciclo anual.

A fin de ofrecer un orden de magnitud de los volúmenes que podrían ser explotados anualmente, sin comprometer mayormente a las reservas geológicas, se estimaron las reservas reguladoras o generadoras para una fluctuación máxima de 0,42 m tal como se adelantara en la sección metodológica, correspondiente al cálculo de la recarga por fluctuación de niveles.

#### 3.5.5.4. Reservas reguladoras totales

$$\text{Área} = 1500 \text{ km}^2$$

$$\text{Espesor} = 0,00042 \text{ km}$$

$$\text{Porosidad efectiva} = 0,125$$

$$\text{Reserva} = 0,0787 \text{ km}^3 \approx \mathbf{80 \text{ hm}^3}$$

Este volumen, es el que correspondería a las variaciones en el acuífero a lo largo de un ciclo hidrológico, producto de la recarga meteórica y de la descarga que anualmente se produce.

Tal como en el caso de las reservas totales, y con intención de dimensionar aproximativamente, las que podrían ser explotadas para consumo humano en el marco de un desarrollo sostenible, se calcularon las reservas reguladoras del área con aguas de buena calidad.

#### 3.5.5.5. Reservas reguladoras aptas para suministro público

$$\text{Área} = 200 \text{ km}^2$$

$$\text{Espesor} = 0,00042 \text{ km}$$

$$\text{Porosidad efectiva} = 0,125$$

$$\text{Reserva} = 0,0105 \text{ km}^3 \approx \mathbf{10 \text{ hm}^3}$$



Si se considera que un habitante utiliza diariamente (incluyendo ingesta, cocción e higiene) un promedio de 300 l/día ( $1,09 \times 10^{-4}$  hm<sup>3</sup>/día), se tiene que las reservas generadoras estimadas, podrían abastecer a una población del orden de los 90.000 habitantes, teniendo en cuenta que, como se mencionara al tratar el tema calidad de agua, el Arsénico es un elemento que deberá ser evaluado puntualmente, puesto que se lo ha detectado dentro de esta zona con valores que exceden los umbrales normativos.

### 3.6. Hidrogeomorfología

La identificación y delimitación de unidades hidromorfológicas, resulta de suma utilidad en la prospección y reconocimiento de la dinámica de las aguas subterráneas y su correlato hidrogeoquímico, en especial, en regiones áridas donde existe una mayor identidad entre las unidades hidrogeológicas y las geoformas continentales, tal como se mencionara al abordar la metodología de esta investigación (Hernández et al, 1983; Alvarez, *et.al*, 2009).

Se procuró reconocer la correspondencia que guardan las unidades geomorfológicas reconocidas con el fenómeno geohidrológico, de manera de poder asumirlas como **unidades hidrogeomorfológicas**, utilizando la nominación que se diera a aquellas.

La unidad **MMa** (Médanos y Mantos arenosos) se corresponde esencialmente con las zonas de recarga principales, donde la superficie freática adopta una morfología radial con tendencia a cilíndrica divergente y el flujo transcurre con un gradiente medio del orden del 0,62%. Los términos geológicos superficiales, constituyen acuíferos de buena permeabilidad (arenas eólicas), conteniendo aguas de baja salinidad (600-2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) calificables iónicamente como Cloruradas-bicarbonatadas y Bicarbonatadas-sódicas. Queda claro que son las características físicas de esta geoforma, las que imponen el sello hidroquímico al agua subterránea, al constituirse en áreas de recarga principal y contener por lo tanto aguas subterráneas “jóvenes”.

En la denominada **Pa** (Planicies aterrazadas) se desarrollan las zonas de circulación más extendidas, incluyendo algunas de recarga-descarga locales y ofreciendo los más bajos gradientes hídricos de la región ( $\approx 0,1$  %). La morfología es en general de tipo radial, sin mayores tendencias a otros patrones. Se trata de aguas predominantemente salobres, con ciertas manifestaciones locales de menor salinidad, fluctuando la conductividad eléctrica entre valores de 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 9500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El tipo iónico dominante resulta en este caso clorurado- sódico.

Corresponden a la unidad **De** (Depresiones endorreicas) las más manifiestas zonas de descarga interna, cuya expresión extrema, como se ha reiterado, son las salinas Grande y Chica. En todas estas hidroformas negativas, la morfología, dentro del patrón radial predominante, muestra una clara tendencia a un modelo cilíndrico convergente, con gradientes hídricos elevados, del orden del 3 %, los más altos de la comarca. La descarga también a través manantiales de ladera o de Talweg de régimen sub-variable, que manan hacia los cuerpos salinos.

Las aguas son extremadamente evolucionadas por efecto del recorrido, con valores de conductividad eléctrica desde 8000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 17000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una calificación de salobres a salinas. Se diferencian de este comportamiento, aquellos manantiales que fluyen por la margen Sur de los bajos que incluyen a las salinas Grande y Chica, con un menor grado de evolución y conductividad eléctrica del orden de 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 4000  $\mu\text{S}/\text{c}$ , producto de su cercanía a la zona de recarga ubicada en el sector medanoso.

La unidad **ZC** (Zona costera), está constituida por pequeñas hidrogeofomas de recarga local. En ellas, las aguas son de tipo Cloruradas bicarbonatadas hasta francamente Cloruradas, siendo las alojadas en los médanos de menor salinidad que las de los cordones costeros.

En la Tabla 3.6.1., se expone una síntesis de las principales características geohidrológicas para cada una de las unidades hidrogeomorfológicas identificadas en la comarca, algunas de las cuales se prolongan por fuera del ámbito estricto de la investigación.

Estas unidades y los criterios utilizados para su definición, permiten reconocer con cierta rapidez el fenómeno geohidrológico en regiones áridas, como la Patagonia extrandina, con baja e insuficiente densidad de información y buena percepción satelital de las geoformas, por falta de cobertura vegetal y buena definición de aquellas que suelen comportarse como albergue de buenos acuíferos. Tal el caso de las dunas y depósitos costeros en la región (Alvarez *et.al*, 2009), o el de paleocauces, depósitos coluviales y abanicos aluviales fuera de ella.

Tabla 3.6.1.: Unidades hidrogeomorfológicas

Unidad Hidro- geomorfológica	Nivel freático (m sOIGM)	Hidrodinámica	Conductividad eléctrica ( $\mu$ S/cm)	Hidroquímica
<b>Médanos y Mantos arenosos (MMA)</b>	Entre 70 y 20	Principales áreas de recarga.  Morfología radial- cilíndrica divergente	600 a 2000	Clorurada- bicarbonatada sódica y bicarbonatada- clorurada sódica
<b>Planicies aterrazadas (Pa)</b>	Entre 0 y 20	Aéreas principales de circulación.  Localmente, sectores de recarga y descarga	1200 a 9500	Agua clorurada- sulfatada sódica
<b>Depresiones endorreicas (De)</b>	Entre 0 y - 40	Áreas de descarga locales  Morfología cilíndrica convergente	8000 a 17000	Clorurada sódica, con presencia puntual de clorurada-sulfatada sódica
Zona Costera (ZC) <i>(Formas de acumulación)</i>	Entre 45 y -3	Áreas de recarga locales	1100 a 7500	Clorurada bicarbonatada (a clorurada)

En el resto de la Península Valdés, pueden encontrarse unidades hidrogeomorfológicas como las aquí descritas, aunque sin la definición y rol geohidrológico tan marcado como en la zona medanosa o en las salinas (en Gran Salitral sería lo más semejante, aunque con otro desarrollo vertical).

### 3.7. Hidrología Ambiental

En base a los resultados hasta aquí obtenidos, es posible afirmar que los recursos hídricos de comarca objeto de esta investigación, se hallan, en líneas generales, en razonable equilibrio ambiental en función de la extremadamente baja densidad poblacional, la escasa actividad socioeconómica, el tipo de clima árido y las características geohidrológicas del medio.

No obstante, es pertinente establecer los elementos mínimos necesarios que deberían ser tenidos en cuenta, frente a cualquier actividad que pueda representar una modificación de las condiciones actuales.

Se tienen, en principio, dos situaciones hipotéticas a considerar en relación al recurso agua subterránea y que impactarían negativamente tanto en las actividades socioeconómicas como en el equilibrio hidroecológico de la comarca:

- Sobreexplotación
- Contaminación.

En relación a una posible sobreexplotación, el impacto sería evidente en el desequilibrio hidroecológico que se produciría en los “mallines” o humedales, tanto aquellos ubicados en los bajos de las salinas Grande y Chica como en los pequeños ojos de agua localizados dentro de la unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos, únicas manifestaciones permanentes de recursos hídricos superficiales naturales.

Tal como fuese explicado en el capítulo hidrodinámica, los humedales son el resultado terminal del circuito recarga-circulación-descarga del flujo del agua subterránea. Un bombeo excesivo, disminuiría el volumen aportado normalmente hacia estos sitios generando su desecación temporal y el correspondiente impacto ecológico, dado que constituyen, actualmente, el ámbito natural de bebida de fauna tanto autóctona como introducida, son zona de anidamiento de aves, paradero de las migratorias y el sustento de especies vegetales propias de esos ambientes.

En cuanto a una eventual contaminación del acuífero libre, se intentará elegir un geoindicador que posibilite su medición, a sabiendas que la selección presenta en sí misma problemas vinculados al grado de subjetividad que se incorpora, sumados al de establecer una línea de base o umbral crítico (Cantú, *et.al*, 2008), este último punto fuera del alcance de la presente investigación.

No obstante, si se considera que la actividad económica principal está constituida actualmente por la ganadería ovina y el turismo, y que el desarrollo futuro estaría representado por la instalación de nuevos miradores, confiterías, hoteles y/o baños públicos probablemente con saneamiento “in situ”, un indicador válido para la estimación de la tasa de contaminación podría ser el tenor de nitratos en el agua subterránea.

Como se describiera en el capítulo hidroquímica si bien los niveles regionales se encuentran por debajo de los 45 mg/l (límite establecido por el CAA para consumo humano), se ha detectado en un pozo (9) un contenido anómalo (68,3 mg/l) que, como se explicara, respondería a una contaminación puntual de origen orgánico generada en el entorno del

casco de estancia (pozo ciego + concentración puntual de hacienda). Así mismo, el pozo 73, presentó también una concentración elevada (43 mg/l) y, coincidentemente, el entorno físico y antrópico es idéntico al del caso anterior.

De esto surge que, si bien el acuífero objeto de esta investigación no muestra actualmente indicios de contaminación significativos, la presencia de un valor puntual elevado de nitratos indicaría de que ésta puede ocurrir si no se adoptan los recaudos necesarios.

Teniendo en cuenta que el contenido iónico natural del agua subterránea cumple, en general, con los requisitos necesarios para uso ganadero y en sectores también para bebida humana, la conservación de su calidad toma aún mayor relevancia que la que ya tendría intrínsecamente por tratarse de un Área Natural Protegida.

Se destaca entonces la necesidad de generar una cartografía de vulnerabilidad del acuífero freático, que permita definir aquellas áreas donde deberían tomarse los mayores recaudos si se intenta prevenir una futura contaminación.

A continuación, se detallan las categorías atribuidas a cada uno de los parámetros, en base a la grilla del método GOD, según las características particulares de la comarca.

**G) Comportamiento hidráulico:** Fue asignado el mismo para la casi totalidad del área, ya que se trata del primer nivel acuífero de la *Formación Puerto Madryn*, la cual se halla cubierta por los depósitos plio-pleistocenos denominados genéricamente *Rodados Patagónicos*, y por los eólicos cuaternarios. Corresponde consecuentemente la categoría “no confinado (cubierto)”, y el valor atribuido en el Sistema GOD sería de 0,6. Escapan a esta categorización aquellas áreas donde se manifiestan los manantiales y “mallines” ya que pese a que el acuífero pasa a ser libre y descubierto con un valor GOD de 1, el afloramiento del agua subterránea imposibilitaría el acceso externo por una elemental razón física, similar a una surgencia, con un calificativo consecuente de 0,1

**O) Características de la cobertura del acuífero:** en función del mapa geológico y de los perfiles descriptos, se verificó que la cobertura del acuífero yacente en la *Formación Puerto Madryn* (ZNS) está representada por gravas de la *Formación San Miguel*, arenas eólicas (depósitos eólicos cuaternarios), gravas fluvio-glaciales (*Rodados Patagónicos*), y limos aluviales (depósitos cuaternarios de bajos y lagunas). Fueron asignados en el Sistema GOD a estos depósitos valores de 0,8, 0,7, 0,6 y 0,5 respectivamente.

Cabe aclarar, que se decidió trocar en este caso los valores de la tabla GOD para las arenas eólicas y las gravas fluvio-glaciales, ya que las primeras presentan un muy

reducido desarrollo edáfico (con aéreas completamente desprovistas del mismo) y las gravas se encuentran parcialmente cementadas y con un suelo esquelético por encima.

**D) Profundidad del agua:** a partir del mapa equipotencial se adoptaron de la grilla valores de 1, 0,9, 0,7, 0,6 y 0,5 para los rangos de profundidades <2 m, entre 2 y 5 m, 10 a 20 m, 20 a 50 m y 50 a 100 m, respectivamente.

Cada uno de los parámetros GOD constituyó un layer en el entorno SIG, generado a partir de los correspondientes datos originarios y la categoría asignada, los cuales se fusionaron bajo el algoritmo G\*O\*D, en un único mapa de vulnerabilidad.

La leyenda utilizada en la representación gráfica sigue la regla del semáforo, mostrándose de color rojo los sectores con mayor índice, en verde los de menor expresión, y en amarillo la situación intermedia, (Figura 3.7.1).

La vulnerabilidad intrínseca del acuífero freático, está caracterizada regionalmente por presentar valores bajos a moderados.

Una situación extrema ocurre en las depresiones que contienen a las salinas Grande y Chica, donde la presencia de manantiales en su margen Sur, otorgan a este sector una vulnerabilidad insignificante (valor GOD <0,05), acorde a su condición geohidrológica de zona de descarga.

Fuera de esa situación puntual, se observa que los valores más bajos (aproximadamente 0,25 en categoría GOD) se localizan principalmente en los sectores Norte, Este y Oeste, donde los espesores de la ZNS superan los 30 m y corresponde una cobertura acuífera principalmente representada por gravas glacifluviales y secundariamente por depósitos eólicos cuaternarios.

Valores GOD cercanos a 4 (vulnerabilidad Moderada) se registran en el sector central, más específicamente en la proyección Sur de los bajos de las salinas Grande y Chica dentro del ámbito de la unidad geomorfológica Médanos y Mantos Arenosos, conjugándose así espesores menores a 20m y materiales superficiales con alta permeabilidad. Una situación similar ocurre en un depósito costero ubicado en las cercanías del Cerro Unión, donde el nivel freático somero sumado al material psamo-psefítico que los conforma, otorgan a estos sitios una vulnerabilidad intrínseca de Moderada a alta.

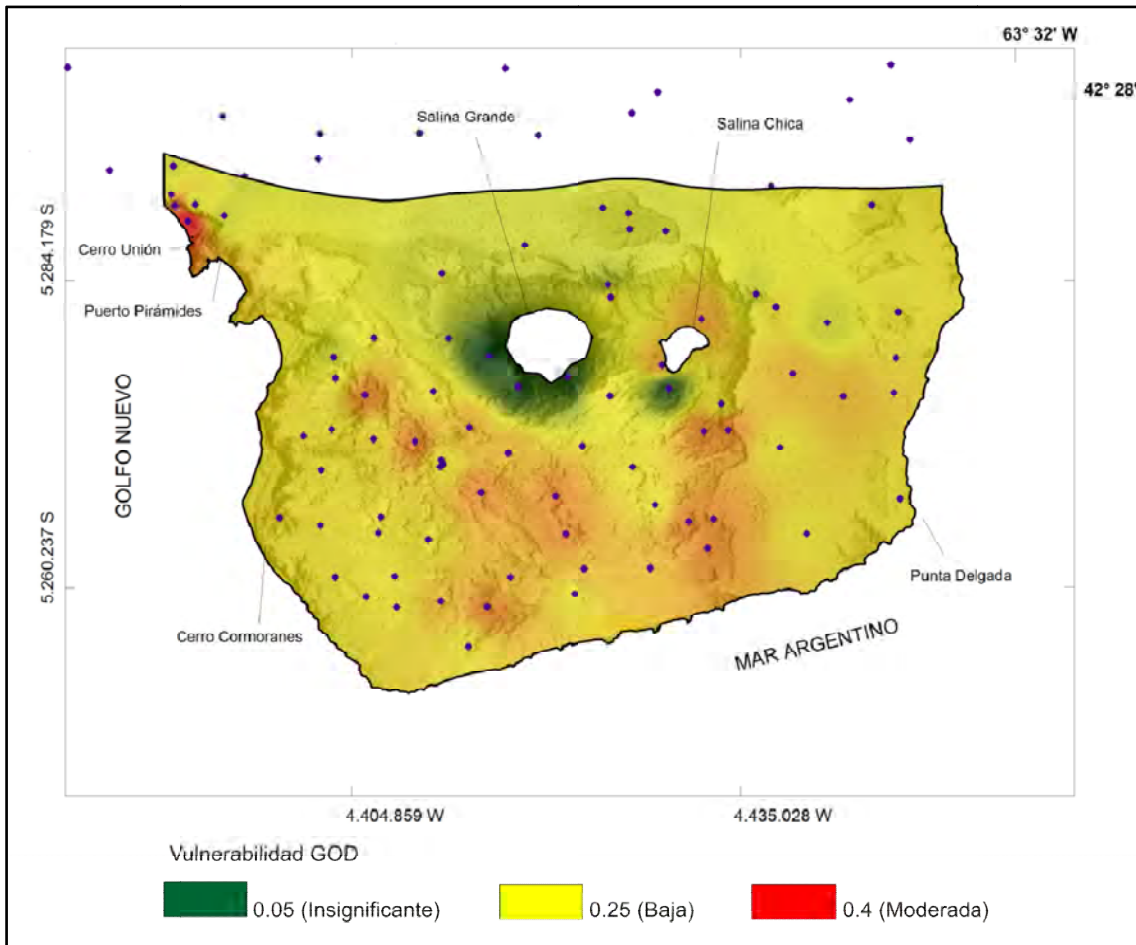


Figura 3.7.1: Mapa de vulnerabilidad del acuífero freático

Se deduce de este modo, que los sectores más vulnerables a la contaminación son, a escala regional, aquellos ubicados en la unidad geomorfológica Médanos y Mantos arenosos y dentro de ellos en los sitios donde esta unidad se halla cubriendo antiguas depresiones y a escala local, los ubicados en los depósitos costeros.

Por último, se quiere resaltar que la importancia de la generación de este tipo de mapas, radica fundamentalmente en su consideración dentro de las instancias de planificación y toma de decisiones que atiendan a la protección del recurso agua subterránea, las cuales toman mayor relevancia tratándose, como en este caso, de un Área Natural Protegida.

### 3.8. Propuesta de Desarrollo Sustentable

De cada uno de los posibles usos del agua subterránea: industrial-minero, recreativo, agrícola, ganadero y humano, se analizará la relevancia actual y su proyección futura, con el fin de determinar la posible demanda de agua subterránea.

Se descarta en primera instancia el uso **industrial-minero** puesto que la única actividad estaría representada por la extracción temporal de sal cuyo tratamiento se reduce al lavado natural *in situ*, satisfecho por las mismas precipitaciones.

A su vez, es desestimado cualquier uso industrial futuro por estar actualmente prohibido tal tipo de desarrollo al tratarse de una Reserva Natural Protegida.

Por su parte, el uso **agrícola** se halla restringido a huertas de tipo familiar en algunos cascos de estancia, y se descarta, por otro lado, un emprendimiento futuro de mayores dimensiones dado que no estaría permitido por el impacto negativo que tendría sobre el equilibrio ecológico actual.

Además, se recuerda que la agricultura bajo riego no es una actividad recomendada dado el riesgo de salinización del suelo detectado en la evaluación del agua subterránea para dicho fin.

Respecto al **uso recreativo**, no se halla actualmente manifiesto y el único registro es el de una piscina de unos 20 m de largo perteneciente a un hotel abandonado ubicado en la Salina Grande que la llenaba con pequeñas captaciones de las vertientes allí localizadas.

En cuanto a la actividad turística actual, dado que el principal consumo de agua está relacionado a los alojamientos de puerto Pirámides y al uso de baños públicos, será tratado al abordar el uso doméstico.

Es evidente que el **uso ganadero**, dada la larga historia ovina que tiene la Península Valdés, no presenta mayores inconvenientes. Se trata de una explotación difusa mediante molinos que, en las mejores condiciones, extraen del orden de los 1000 l/h y que como se explicara anteriormente, no tiene una limitante en la calidad química puesto que toda el área cubre con los requisitos mínimos, disponiéndose así de un volumen potencialmente explotable de unos 80 hm<sup>3</sup>/año (reservas reguladoras totales).

A los fines de dimensionar la demanda por parte de esta actividad, se tuvieron en cuenta el número de molinos (unas 100 unidades para toda el área) y su caudal de extracción (1000 l/h) resultando así en un consumo de menos de 1 hm<sup>3</sup>/año, los que claramente no representa ningún tipo de presión al sistema.



Se descarta a su vez una mayor demanda futura ya que las características mismas de la zona (baja densidad de cobertura vegetal), son una limitante de la capacidad de carga animal y es indudable que un sobrepastoreo es contraproducente debido al deterioro de la cobertura vegetal y la consecuente disminución del alimento.

Respecto a la posible instalación de una ganadería tipo “Feed lot”, no estaría permitida por tratarse, como se reiterara, de una reserva natural.

Resta entonces el **uso doméstico**, y en este punto se hace una distinción entre aquel de tipo difuso, representado por los cascos de estancia, del urbano, presente en la localidad de Puerto Pirámides.

La demanda por parte de las estancias está relacionada principalmente a los aspectos de higiene, cocina, limpieza y saneamiento de la vivienda que, como puede deducirse, no tiene mayores requerimientos desde el punto de vista químico quedando satisfecha prácticamente en toda el área de estudio.

En cuanto al agua de consumo personal, salvo aquellos campos en los que es dulce, históricamente el abastecimiento quedó cubierto mediante aljibes colectores de lluvia y hoy en día, dada las tendencias actuales y las facilidades de transporte, es común el uso agua envasada.

Por su parte la localidad de Puerto Pirámides, con una población estable próxima a los 700 habitantes y un flujo turístico que ronda las 360.000 personas/año, consume anualmente alrededor de 200.000 l/día llegando en los meses de enero y febrero a los 370.000 l/día.

Su actual aprovisionamiento es mediante una planta desalinizadora de agua de mar, cuya capacidad de procesamiento de 150.000 l/día es completada con camiones cisterna que traen agua desde unas perforaciones localizadas en la península, más precisamente en los pozos P12, P13, P14.

Considerando una demanda diaria hipotética de 400.000 l/día ( $0,15 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) y que solo se dispusiera del recurso subterráneo, se necesitaría un área de  $3 \text{ km}^2$  según los cálculos de reserva realizados.

Sin embargo, teniendo en cuenta las estadísticas de la *Dirección General de Estadística y Censos de Chubut* (DGEyC, 2009) y una proyección a solo 10 años (Figura 3.8.1) se ve que el crecimiento turístico triplicaría al número registrado para el 2008. El impacto se vería reflejado directamente sobre la localidad de Puerto Pirámides, dado que prácticamente todos los turistas que entran a la Península tienen como destino este poblado

por ser el único puerto desde donde se embarca para el avistaje de la Ballena Franca Austral (principal atractivo de la reserva).

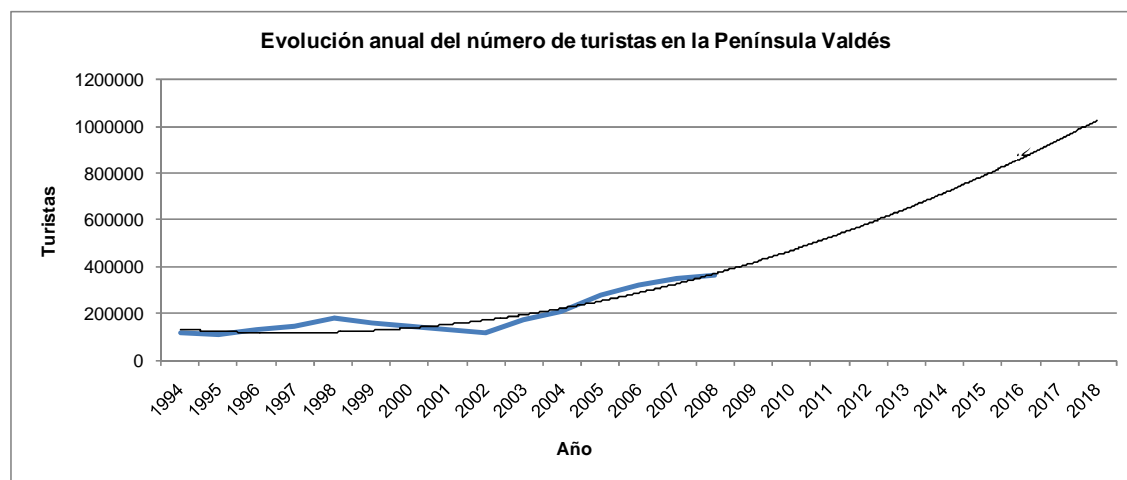


Figura 3.8.1: Crecimiento turístico en Península Valdés

Con esto se quiere mostrar que, el cálculo debe evaluar un área de expansión de al menos 4 veces la estimada.

Sumado a lo anterior, hay que considerar un perímetro de protección para prevenir cualquier contaminación de origen bacteriológico (Auge, 2004) que en este caso fue de 300 m a cualquier casco de estancia.

Se llega así, a la necesidad de determinar un **área para la explotación de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>**.

En cuanto a su localización espacial, al evaluar el mapa de calidad del agua para suministro público, surgen dos alternativas dependiendo del contenido de arsénico y la proximidad a Puerto Pirámides (Figura 3.8.2). De ambas se exponen sus puntos a favor y en contra.

La **alternativa 1**, dentro de la cual se localizan los pozos que actualmente se hallan en explotación como complemento de la planta desalinizadora, presenta como aspectos positivos, la ubicación relativamente próxima a la localidad interesada (25 km en línea recta) además de una cota topográfica elevada que permitiría sin mayores inconvenientes la conducción por gravedad mediante un acueducto.

Como aspecto negativo, muestra un contenido de Arsénico (0,12 mg/l en el pozo P14) que duplica el máximo aceptable según el Código Alimentario Argentino (0,05 mg/l)

situación que se repite en todos los pozos aledaños (0,16 mg/l; 0,4 mg/l y 0,06 mg/l en los pozos 9, 10 y 134 respectivamente). Tenores que obligan a asumir un costo extra de tratamiento, (ya sea por osmosis inversa, dilución o algún otro) para llevar las concentraciones hasta las aceptables.

Para la **alternativa 2** se podría decir que la situación es la inversa, mostrando a favor un contenido de Arsénico por debajo del límite normativo tanto para la determinación dentro del área (0,04 mg/l en el pozo 73) como para la más cercana (0,05 mg/l en el pozo 74), reduciendo de este modo el costo de tratamiento al mínimo (cloración).

En su contra, manifiesta un mayor distanciamiento al pueblo (35 km) y un perfil topográfico entre ambos extremos más irregular que el del sitio 1. No obstante, la conducción por gravedad aún sería posible puesto que la cota inicial es mayor que la final aunque en algún sector probablemente se requiera asistencia de bombeo, con el consecuente incremento en los costos.

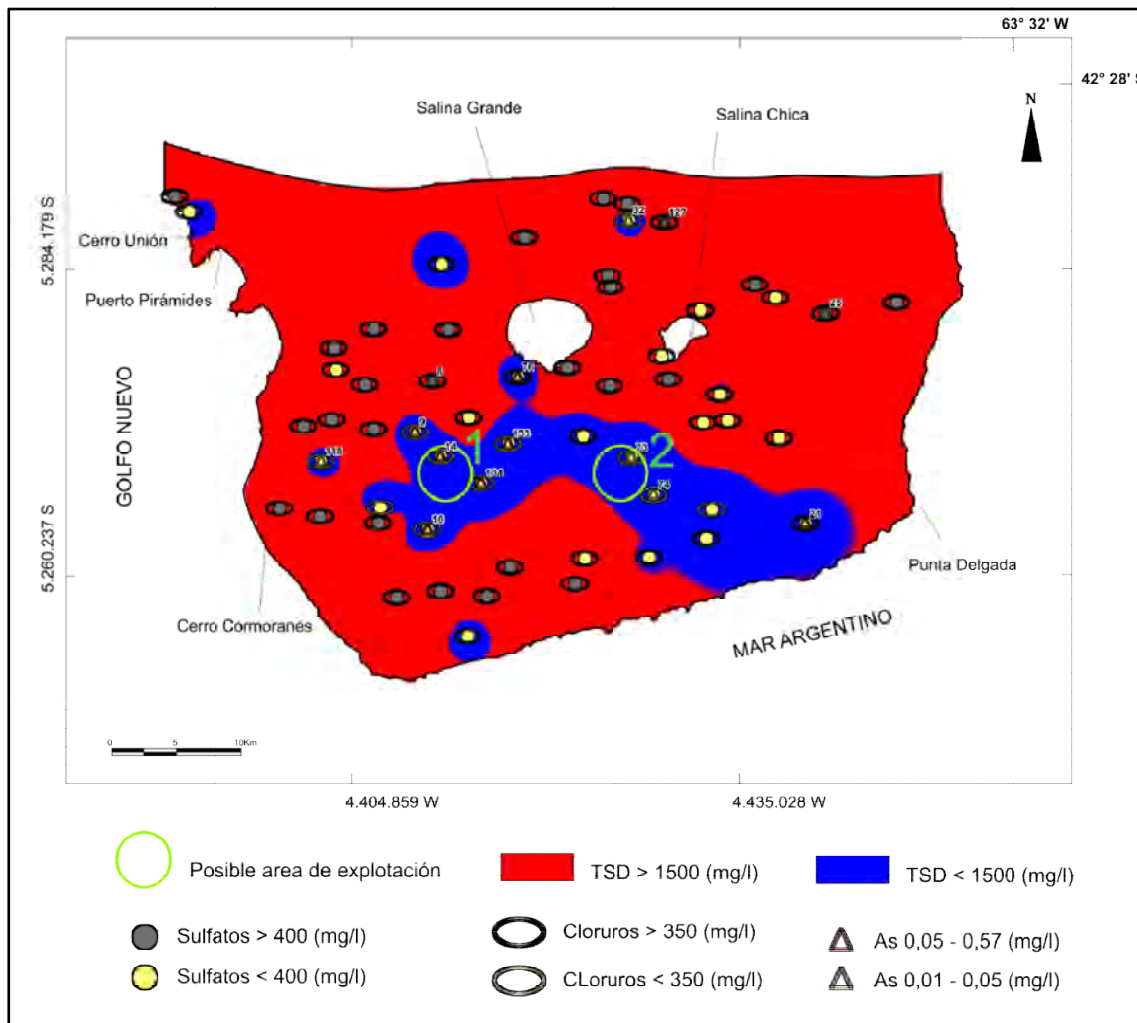


Figura 3.8.2: posibles áreas de explotación

Tan importante como la localización de un sitio apropiado, es la elección de un correcto modo de captación, adaptado a las condiciones acuíferas del sitio, de modo de optimizar la extracción y preservar el recurso, por lo cual se comentan a continuación las diferentes alternativas.

Al tratarse de un acuífero pobre y con un importante riesgo de salinización por ascenso de niveles de inferior calidad, se descarta decididamente la posibilidad de instalar solo 1 o 2 pozos de bombeo convencionales de caudal significativo, puesto que estos producirían una depresión violenta de las alturas piezométricas y el consecuente riesgo de mezcla con aguas de menor calidad, producto del aumento del flujo hacia la perforación.

Una alternativa favorable podría ser entonces una batería de pequeños sondeos de diámetro convencional, con suficiente distanciamiento de modo de que no se produzca intercepción de conos de depresión, de modo controlar las depresiones piezométricas y la intrusión salina.

El tipo de captación mas recomendada para este tipo de situaciones (materiales poco permeables y riesgo ascenso salino) serían los **pozos de drenes horizontales**. En ellos se distinguen basicamente dos partes: un pozo vertical con pared de hormigón y diámetro interior en general mayor a 3 m, y un conjunto de drenes horizontales situados a uno o mas niveles y conectados con el principal, en el que desaguan a través de válvulas de compuerta, (Figura 3.8.3).

Las principales ventajas de este tipo de captaciones son:

- La gran superficie filtrante, mayor cuantos mas drenes se pongan, condición a favor de la baja permeabilidad de los materiales.
- El control automático de un ascenso salino, puesto que no se genera depresion pizométrica más alla de la profundidad de los drenes.
- Su carácter de cisterna, dado que funcionan como un almacenamiento puntual, con la ventaja que ello implica, no solo como reserva provisoria sino también por la posibilidad de cloración *in situ*.

La principal desventaja que presenta este tipo de perforaciones es su alto costo de obra, no obstante hay registros de construcciones por medio de anillos acoplantes premoldeados como los que se muestran en las figuras 3.8.3 y 3.8.4, que logran reducirlos considerablemente.

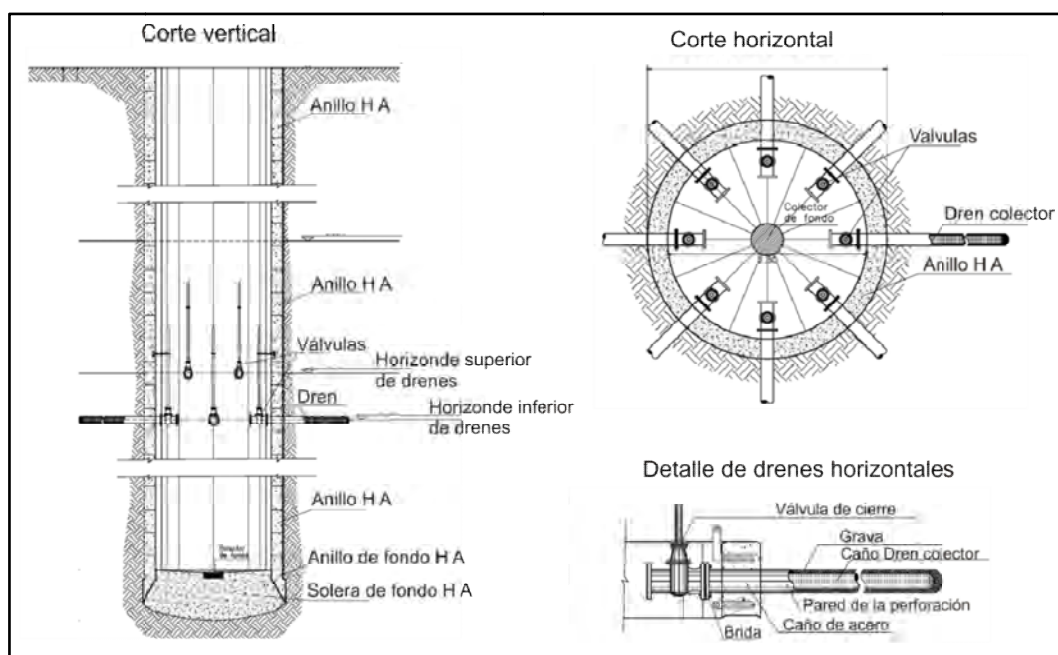


Figura 3.8.3: Pozo de drenes horizontales

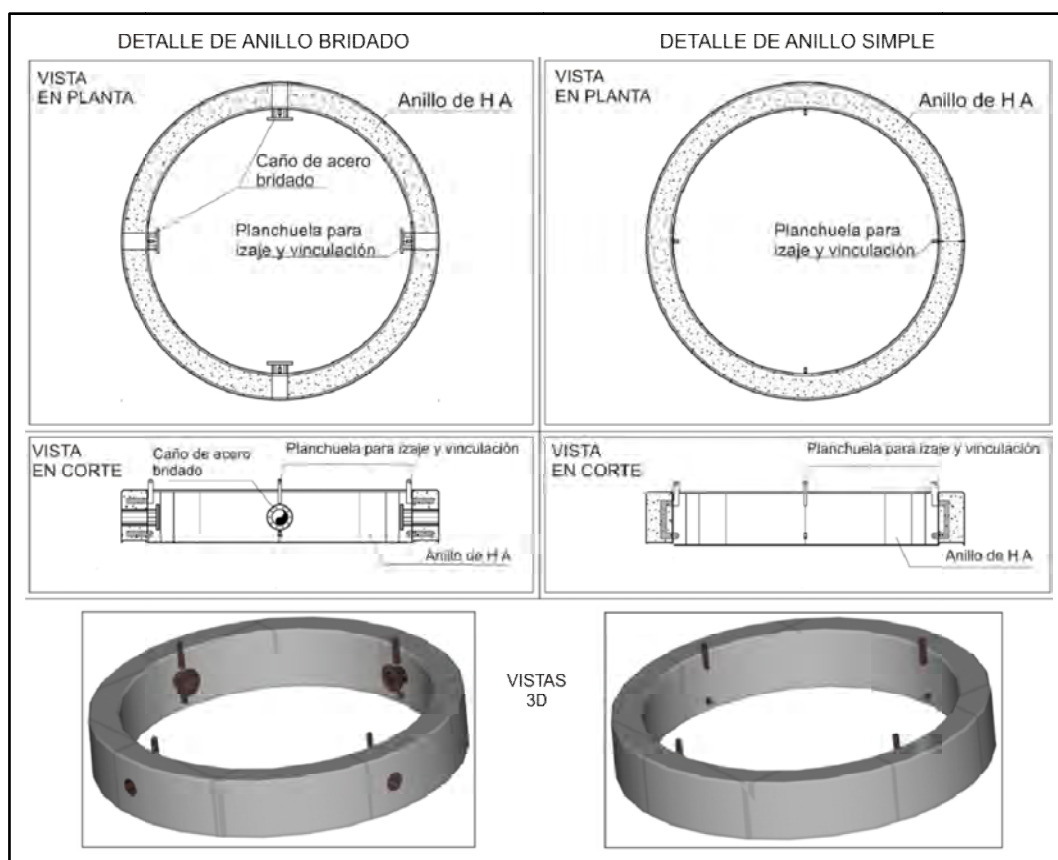


Figura 3.8.4: Esquema de anillos acoplantes premoldeados