

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD AMBIENTAL DEL ACUÍFERO DE
LA LAGUNA DE LLANCANELO, EN EL ÁREA DEL BLOQUE DE
CONCESIÓN LLANCANELO.

AUTOR: CHIODI, VICTORIA

TUTOR: Dra. TERESA REYNA

SUPERVISOR EXTERNO: Dra. MARÍA LABAQUE

AÑO: 2014

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. LA CUENCA DE LLANCANELO.....	10
1.2. HISTORIA Y PROBLEMÁTICA:.....	12
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	15
2.1. UBICACIÓN	16
2.2. CLIMA.....	17
2.2.1. <i>Temperatura Media Mensual</i>	18
2.2.2. <i>Precipitación en la Cuenca</i>	20
2.3. GEOLOGÍA	23
2.4. GEOMORFOLOGÍA	27
2.5. TOPOGRAFÍA	31
2.6. SUELOS.....	32
2.7. HIDROGRAFÍA.....	38
2.7.1. <i>Laguna Llacanelo</i>	38
2.7.2. <i>Tributarios</i>	41
2.8. HIDROGEOLOGÍA	46
2.9. PERFORACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO	56
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA – CONCEPTOS DE BASE.....	58
3.1. ESTUDIO DE VULNERABILIDAD.....	58
3.1.1. <i>Definiciones</i>	58
3.1.2. <i>Riesgo a la Contaminación y Vulnerabilidad:</i>	59
3.2. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD EN UN ACUÍFERO:	61
3.2.1. <i>Método DRASTIC</i>	62
3.2.2. <i>Método SINTACS</i>	62
3.2.3. <i>Método GOD</i>	62
3.2.4. <i>Método EPIK</i>	63
3.2.5. <i>Método Ekv</i>	64
3.2.6. <i>Método ΔhT</i>	65
4. METODO DRASTIC.....	69
4.1. INFLUENCIA DE CADA FACTOR SOBRE EL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	74
4.1.1. <i>Profundidad del agua subterránea.</i>	74
4.1.2. <i>Recarga neta.</i>	74
4.1.3. <i>Litología del acuífero.</i>	75
4.1.4. <i>Tipo de suelo.</i>	75
4.1.5. <i>Topografía.</i>	76
4.1.6. <i>Naturaleza de la zona no saturada.</i>	76
4.1.7. <i>Conductividad hidráulica del acuífero.</i>	77
4.1.8. <i>Relación entre parámetros</i>	77
5. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO.....	78
5.1. METODOLOGÍA	78
5.1.1. <i>Descripción del software a utilizar</i>	80
5.1.2. <i>Trabajo con ArcGis en la realización de mapas</i>	82
5.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS PARA EL MODELO.....	83
5.2.1. <i>Mapa de la Profundidad de la Capa Freática.</i>	84
5.2.2. <i>Recarga Neta</i>	88
5.2.3. <i>Mapa de la Litología del Acuífero</i>	106

5.2.4.	Mapa del Tipo de Suelo	109
5.2.5.	Mapa de la Topografía.....	111
5.2.6.	Mapa de la Litología de la zona no Saturada.....	115
5.2.7.	Mapa de la Conductividad.....	117
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.	119
6.1.	RESULTADOS.....	119
6.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS:	122
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:	125
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA:1: UBICACIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO	10
FIGURA 2: IMAGEN DE LA LAGUNA DE LLANCANELO	11
FIGURA 3: UBICACIÓN DEL BLOQUE DE CONCESIÓN DE EXPLOTACIÓN HIDROCARBURÍFERA OPERADO POR YPF.....	12
FIGURA 4: UBICACIÓN DEL BLOQUE DE CONCESIÓN DE EXPLOTACIÓN HIDROCARBURÍFERA OPERADO POR YPF.....	16
FIGURA 5: MAPA CLIMATOLÓGICO DE LA PROVINCIA DE MENDOZA.	17
FIGURA 6: TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DE LAS ESTACIÓN MALARGÜE AERO (1996-2006). .	19
FIGURA 7: ISOHIETAS MEDIAS ANUALES REPÚBLICA ARGENTINA.....	20
FIGURA 8: PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y EXCESO HÍDRICO MEDIO ANUAL	21
FIGURA 9: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL PARA LA ESTACIÓN ARROYO LA VAINA (1996-2007).....	22
FIGURA 10: PRINCIPALES UNIDADES ESTRUCTURALES MENDOZA.	23
FIGURA 11: GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE LA LAGUNA LLANCANELO.....	26
FIGURA 12: GEOMORFOLOGÍA LAGUNA LLANCANELO, ABANICOS Y NACIENTES.	28
FIGURA 13: DELTAS AL INGRESO DEL RIO MALARGÜE A LA LAGUNA.....	28
FIGURA 14: VISTA PANORÁMICA DESDE EL CERRO TRAPAL A LA LAGUNA DE LLANCANELO.	29
FIGURA 15: IMAGEN SRTM CORRESPONDIENTE A LA ZONA DE ESTUDIO.	31
FIGURA 16: UBICACIÓN DE LAS CALICATAS REALIZADAS POR YPF.	33
FIGURA 17: PERFIL Nº 34.....	34
FIGURA 18: SITIO DONDE SE REALIZÓ EL PERFIL DE SUELO.....	34
FIGURA 19: PERFIL Nº 39.....	35
FIGURA 20: SITIO DONDE SE REALIZÓ EL PERFIL DE SUELO.....	35
FIGURA 21: PERFIL Nº 5.....	36
FIGURA 22: SITIO DONDE SE REALIZÓ EL PERFIL DE SUELO.....	36
FIGURA 23: PERFIL Nº 32.....	37
FIGURA 24: SITIO DONDE SE REALIZÓ EL PERFIL DE SUELO.....	37
FIGURA 25: ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS FLUCTUACIONES DE LA LAGUNA LLANCANELO ENTRE 1997-2002 REALIZADO CON IMÁGENES LANDSAT.	39
FIGURA 26: MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL FONDO DE LA LAGUNA.....	40
FIGURA 27: PRINCIPALES TRIBUTARIOS DE LA LAGUNA LLANCANELO.	42
FIGURA 28: ARROYO CARAPACHO UBICADO SOBRE EL ESQUINERO SURESTE DEL BLOQUE DE CONCESIÓN.	44
FIGURA 29: NACIENTE DEL ARROYO CARILAUQUEN UBICADO EN EL SECTOR CENTRAL DEL BLOQUE DE CONCESIÓN.....	44
FIGURA 30: BAJO DE DISOLUCIÓN UBICADO EN EL MARGEN DERECHO DEL ARROYO CARILAUQUEN.	45
FIGURA 31: VISTA DE LOS BAÑADOS DEL CARILAUQUEN.....	45
FIGURA 32: PANORÁMICA DE LOS BAÑADOS LOS MENUCCOS.....	45
FIGURA 33: ESQUEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA SUR DE MENDOZA.....	47
FIGURA 34: ESQUEMA HIDROGEOLÓGICO – CUENCA DE LOS RÍOS ATUEL, SALADO Y MALARGÜE	49
FIGURA 35: SECTOR NORTE DEL RÍO MALARGÜE, ZONA DE DESCARGA PARCIAL.....	50

FIGURA 36: SURCOS DE ESCORRENTÍA LOCALES ASOCIADOS A LA PRESENCIA DE CAMINOS Y A HUECOS DE DISOLUCIÓN.....	53
FIGURA 37: VISTA DE UN POZO “VOLCÁN” GENERADO POR LA DISOLUCIÓN POR ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA.	54
FIGURA 38: HUNDIMIENTO DEL SUELO GENERADO POR LA DISOLUCIÓN DEL MISMO DADO POR LA ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA.	54
FIGURA 39: ZONIFICACIÓN EN ÁREAS DE RECARGA Y DESCARGA.	55
FIGURA 40: POZOS EXISTENTES DENTRO DE ÁREA DE CONCESIÓN LLANCANELO	57
FIGURA 41: MÉTODO GOD, CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO.....	63
FIGURA 42: POTENCIALES HIDRÁULICOS NATURALES ENTRE ACUÍFEROS LIBRES Y CONFINADOS.....	66
FIGURA 43: CONTAMINACIÓN POR BOMBEO EN EL ACUÍFERO CONFINADO.....	66
FIGURA 44: METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO.	78
FIGURA 45: IMAGEN RASTER.....	80
FIGURA 46: MODELO DE DATOS.	81
FIGURA 47: UBICACIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO.	83
FIGURA 48: REPRESENTACIÓN DEL PARÁMETRO D: PROFUNDIDAD DE LA FREÁTICA.....	86
FIGURA 49: RECLASIFICACIÓN DEL PARÁMETRO D: PROFUNDIDAD DE LA FREÁTICA.	87
FIGURA 50: DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS, SEGÚN EL MÉTODO DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN.	100
FIGURA 51: REPRESENTACIÓN DEL PARÁMETRO R: RECARGA NETA..	104
FIGURA 52: RECLASIFICACIÓN DEL PARÁMETRO R: RECARGA NETA.	105
FIGURA 53: ZONIFICACIÓN DE LA LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO.	107
FIGURA 54: RECLASIFICACIÓN DEL PARÁMETRO A: LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO	108
FIGURA 55: ZONIFICACIÓN SEGÚN TEXTURA DE SUELO.....	109
FIGURA 56: RECLASIFICACIÓN DEL PARÁMETRO S: TIPO DE SUELO	110
FIGURA 57: IMAGEN ASTER GDEM.	112
FIGURA 58: REPRESENTACIÓN DEL PARÁMETRO T: TOPOGRAFÍA DEL TERRENO.....	113
FIGURA 59: MAPA DE VALORACIÓN DE LA PENDIENTE DEL TERRENO DE ACUERDO A LOS VALORES CONSIGNADOS EN LA TABLA 17	114
FIGURA 60: REPRESENTACIÓN DEL PARÁMETRO I: LITOLOGÍA DE LA ZONA NO SATURADA	115
FIGURA 61: MAPA DE LA LITOLOGÍA DE LA ZONA NO SATURADA RECLASIFICADO DE ACUERDO A LOS RANGOS DE LA TABLA 18.	116
FIGURA 62: REPRESENTACIÓN DEL PARÁMETRO C: CONDUCTIVIDAD	117
FIGURA 63: MAPA DE CONDUCTIVIDAD RECLASIFICADO SEGÚN TABLA 19	118
FIGURA 64: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.....	120
FIGURA 65: MAPA DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD RECLASIFICADO DE ACUERDO A LOS RANGOS DE LA TABLA 20.....	121
FIGURA 66: UBICACIÓN DE LOS POZOS EXISTENTES DENTRO DEL ÁREA DE CONCESIÓN	123
FIGURA 67: CONJUNTO DE MAPAS OBTENIDOS EN LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DRASTIC EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA PERFIL 34.....	34
TABLA 2: DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA PERFIL 39.....	35
TABLA 3: DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA PERFIL 5.....	36
TABLA 4: DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA PERFIL 32.....	37
TABLA 5: COORDENADAS DE UBICACIÓN DE LAS BOCAS DE POZO EXISTENTES EN EL ÁREA DE CONCESIÓN.	56
TABLA 6: RESUMEN DE LOS MÉTODOS MÁS IMPORTANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN UN ACUÍFERO	68
TABLA 7: VALORES RELATIVOS PARA LOS PARÁMETROS E,P,I Y K.....	64
TABLA 8: VALORES ASIGNADOS AL PARÁMETRO E.	65
TABLA 9: VALORES ASIGNADOS AL PARÁMETRO Kv.....	65
TABLA 10: DIAGRAMA DE VULNERABILIDAD PARA ACUÍFEROS LIBRES.....	65
TABLA 11: VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO SEMICONFINADO EN FUNCIÓN DE SU POTENCIAL HIDRÁULICO RESPECTO AL DEL LIBRE ASOCIADO.....	67
TABLA 12: VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO SEMICONFINADO EN RELACIÓN A LA TRANSMISIVIDAD VERTICAL DEL ACUITARDO SOBREPUESTO.	67
TABLA 13: PESOS ASIGNADOS A CADA FACTOR DRASTIC.....	70
TABLA 14: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR PROFUNDIDAD DEL NIVEL DE AGUA.....	70
TABLA 15: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR RECARGA NETA DEL ACUÍFERO.	70
TABLA 16: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO.	71
TABLA 17: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR TIPO DE SUELO.	71
TABLA 18: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR TOPOGRAFÍA.....	72
TABLA 19: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA.....	72
TABLA 20: RANGOS Y PUNTUACIÓN PARA EL FACTOR CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO.....	72
TABLA 21: RANGOS DE VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA.....	73
TABLA 22: COORDENADAS DE LOS ESQUINEROS DEL ÁREA DE ESTUDIO.	83
TABLA 23: PUNTOS DE OBSERVACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS.....	84
TABLA 24: COEFICIENTES DE INFILTRACIÓN POR PENDIENTE Y POR COBERTURA VEGETAL.	89
TABLA 25: PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE Y CAPACIDAD DE CAMPO EN PORCENTAJE POR PESO DE SUELO SECO DE DIFERENTES TEXTURAS DE SUELOS	91
TABLA 26: PROFUNDIDAD DE RAÍCES DE DIFERENTES CULTIVOS	91
TABLA 27: VALOR DE L DEL MÉTODO DE THORNTHWAITE. COEFICIENTES PARA LA CORRECCIÓN DE LA ETP DEBIDA A LA DURACIÓN MEDIA DE LA LUZ SOLAR PARA UN DETERMINADO MES Y LATITUD.....	94
TABLA 28: VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL APLICANDO EL MÉTODO DE THORNTWAITE PARA LA ZONA NORTE.....	94
TABLA 29: VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL APLICANDO EL MÉTODO DE THORNTWAITE PARA LA ZONA CENTRO Y SUR.....	95
TABLA 30: VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	99
TABLA 31: DATOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	99
TABLA 32: CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL PARA LA ZONA NORTE.	101
TABLA 33: CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL PARA LA ZONA CENTRO.	102

TABLA 34: CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL PARA LA ZONA SUR.	103
TABLA 35: VALORACIÓN UTILIZADA EN LOS TIPOS DE SUELOS ENCONTRADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	110
TABLA 36: SENSORES SATELITALES	111
TABLA 37: VALORACIÓN UTILIZADA EN LOS TIPOS DE SUELOS ENCONTRADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	116
TABLA 38: VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	117

1. INTRODUCCIÓN

En años recientes muchos países han experimentado problemas de contaminación en el agua subterránea lo que ha encaminado a plantear metodologías que identifican el mecanismo de transporte de los contaminantes.

Para una adecuada protección de los recursos hídricos subterráneos hay que considerar que la mejor manera de eliminar los problemas es la de impedir la entrada de elementos nocivos en el agua subterránea. La prevención más eficaz es una adecuada ordenación del territorio que en el caso concreto de las aguas subterráneas se traduce en la realización de estudios geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y de fuentes potenciales de contaminación, para poder recomendar las áreas más adecuadas para la puesta en práctica de actividades potencialmente contaminantes.

La demanda de la sociedad respecto al cuidado de la salud y del ambiente es cada vez mayor, requiriéndose la evaluación de potenciales impactos negativos producidos por diversas actividades antrópicas, entre ellos la contaminación de los recursos naturales producida por la explotación petrolífera.

Una de las metodologías utilizadas para representar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas, ha sido la realización de la cartografía de vulnerabilidad a diferentes escalas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la vulnerabilidad general a la contaminación de un acuífero libre localizado en la cuenca de la Laguna de Llanquanelo, más precisamente en el sector del Bloque de Concesión Llanquanelo operada por YPF, en las adyacencias al Área Natural Protegida de Llanquanelo.

La vulnerabilidad es una propiedad no medible físicamente e intrínsecamente conlleva un grado de subjetividad y depende de las características del medio ambiente geológico e hidrológico. El fin de los mapas de vulnerabilidad es la subdivisión de áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad, esta subdivisión de áreas considera unidades homogéneas en sus propiedades hidrogeológicas (Aragon Sulik et al., 2012).

Las áreas más vulnerables son las zonas más sensibles donde el suelo, subsuelo y el lecho rocoso no proporcionan una protección adecuada y existe un potencial para una transferencia rápida de los contaminantes al agua subterránea (Gogu y Dassargues 2000).

Son varios los criterios que justifican la necesidad de generar y aplicar una zonificación del territorio en función de su vulnerabilidad (Álvarez, 2011).

Analizando el principio de prevención y el principio precautorio reconocidos por la Ley Nro 25.675 Ley General del Ambiente, sancionada el 6 de Noviembre de 2002, y los presupuestos mínimos establecidos en el Artículo 41 de la Constitución Nacional y definidos en el Art. 6º de la mencionada ley, se llega a la conclusión que estas normas básicamente tienen por objeto imponer las condiciones necesarias para asegurar la protección ambiental para garantizar la dinámica de los sistemas ecológicos y, en general, asegurar la preservación ambiental y el desarrollo sustentable.

La naturaleza del concepto de vulnerabilidad, entendida como sensibilidad hacia algo que puede no haberse manifestado aún, se ajusta perfectamente a los objetivos de prevención, precaución, protección y preservación de los recursos hídricos.

La zonificación es una de las herramientas básicas más tradicionales del ordenamiento ambiental del territorio, reconocido éste como instrumento de la política y la gestión

ambiental en el Art. 8º de la mencionada Ley 25.675 y definido en su Art. 10º como tendiente a “asegurar el uso ambientalmente adecuado de los recursos ambientales, posibilitar la máxima producción y utilización de los diferentes ecosistemas, garantizar la mínima degradación y desaprovechamiento y promover la participación social, en las decisiones fundamentales del desarrollo sustentable”.

Los mapas de vulnerabilidad son un recurso para la planeación del ordenamiento territorial, y particularmente para la protección de zonas acuíferas y sitios protegidos, es por ello que, la información generada en el presente trabajo tiene como objetivo constituir una base para la gestión ambiental.

Existen diferentes metodologías utilizadas en la valoración de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. En esencia, la mayoría coinciden en determinar la vulnerabilidad en función de las características intrínsecas del medio. Dentro de estas metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se han plantado métodos tales como: DRASTIC, SINTACS, GOD, EPIK, EKV, DhT, etc. El método DRASTIC es uno de los más difundidos para determinar la vulnerabilidad del medio, entre otras razones porque se complementa muy bien con los sistemas de información geográfica SIG para la determinación de los mapas de vulnerabilidad. La cantidad de parámetros que involucra la metodología elegida requiere un elevado nivel de información, el que no siempre está disponible, pero se considera que logra mayor representatividad. Métodos más simples como GOD requieren de un menor nivel de detalle en la información básica, pero los parámetros que se incluyen en su elaboración no cubren todos los aspectos de interés en un problema real de contaminación o de análisis de vulnerabilidad (Auge, 2004). En el presente trabajo se optó entonces trabajar con el método DRASTIC.

En el primer capítulo se presenta la Cuenca de Llanquanelo con su historia y problemática. En el capítulo 2 se realiza una breve caracterización de la Cuenca con una descripción particular del área del Bloque de concesión de Llanquanelo.

En el tercer capítulo se presentan conceptos de base de estudios de vulnerabilidad, para luego profundizar, en el capítulo 4, sobre el método elegido para la realización de este trabajo, el Método DRASTIC.

Más adelante, en el quinto capítulo, se presenta la aplicación al caso en estudio y en el capítulo 6 se exponen los resultados y análisis, para luego finalizar con las conclusiones y recomendaciones que se exponen en el capítulo 7.

1.1. LA CUENCA DE LLANCANELO

Entre las cuencas de los ríos Atuel y Grande, en Mendoza, existe una pequeña región montañosa, de los primeros contrafuertes de los Andes, que desagua, mediante unos pocos cursos de agua, en un gran bajo conocido con el nombre de laguna de Llanquanelo.



Figura:1: Ubicación del área en estudio (Fuente: Elaboración propia).

La Laguna de Llanquanelo se ubica al sur de la Provincia de Mendoza, en el denominado “Bajo de Llanquanelo”, en el Departamento de Malargüe, entre los 35°30 y los 36° de latitud sur y entre los 69° y 69°15 de Longitud Oeste a una altitud de 1330 m.s.n.m. Este ambiente constituye un conjunto acuático formado por bañados, ciénagas, estuarios, salinas y el espejo de agua (UNC, 2013 a).

Fue declarada Reserva Natural por el Gobierno de la Provincia y designada como el sitio Ramsar N°759 el 8 de noviembre de 1995, cubriendo una superficie de 65.000 Ha.

Los elevados niveles salinos en sus aguas le confieren características particulares desde el punto de vista hidroquímico y ambiental (Misión Ramsar de Asesoramiento, 2002). Este humedal por sus especiales características se constituye en un sitio de gran importancia ecológica por la gran cantidad de aves playeras que lo utilizan para sus actividades de reproducción o como sitio de paso en sus migraciones. En este sistema se albergan poblaciones de hasta 150.000 individuos, pertenecientes a 74 especies de aves acuáticas.

Las distintas actividades antrópicas que se realizan en la zona de influencia de la laguna y sus cuencas de aporte afectan esta dinámica ambiental.

Como ya se mencionó esta laguna fue declarada reserva faunística en el año 1980 y en 1995 fue declarada de interés internacional. La Laguna de Llanquanelo fue designada como el sitio Ramsar debido a las siguientes consideraciones:

- Es un ejemplo representativo de un humedal natural o casi natural, común a más de una región biogeográfica.
- Es de valor especial para mantener la diversidad genética y ecológica de una región a causa de la calidad y peculiaridades de su flora y fauna.

- Es de valor especial como hábitat de plantas o animales en un periodo crítico de sus ciclos biológicos.



Figura 2: Imagen de la Laguna de Llanquanelo

En el 2001 el Gobierno de Argentina solicitó formalmente la inclusión de la Laguna en el Registro de Montreux, que agrupa aquellos sitios Ramsar donde es necesaria una atención urgente para garantizar su conservación.

La inclusión de la Laguna en el registro obedece principalmente a la preocupación del Gobierno de la República Argentina con respecto a las posibles amenazas que genera las actividades relacionadas con la explotación petrolera; la disposición de los desechos del ex Complejo Fabril de Malargüe en que se trataban minerales de uranio; la caza y pesca furtivas; el posible trasvase del Río Grande al Río Atuel; y la introducción de especies exóticas, tales como el tamarindo (*Tamarix gallica*), la liebre europea (*Lepus europaeus*) y el jabalí (*Sus scroffa*) (UNC, 2013 a).

1.2. HISTORIA Y PROBLEMÁTICA:

El ambiente constituido por los bañados, ciénagas, estuarios, salinas y el propio espejo de agua de La Laguna de Llanquanelo conforma un sitio de gran importancia ecológica para la región. Cada año gran cantidad de aves playeras lo utilizan para sus actividades de reproducción o como sitio de paso en sus migraciones (UNC, 2013 a).

Los campos que rodean a la laguna, poseen gran riqueza petrolera. Su explotación introduce un factor de riesgo adicional al que ya representan las actividades antrópicas en la degradación de este tipo de ambientes.

En el subsuelo se encuentra la denominada Cuenca Cuyana, un reservorio que se explota desde la década del '30 de la mano de la empresa YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales). La presentación en el año 2000 de un proyecto de exploración y explotación hidrocarburífera a largo plazo para desarrollar en el área, desató un conflicto ambiental entre la empresa, el Gobierno Provincial y la sociedad civil.

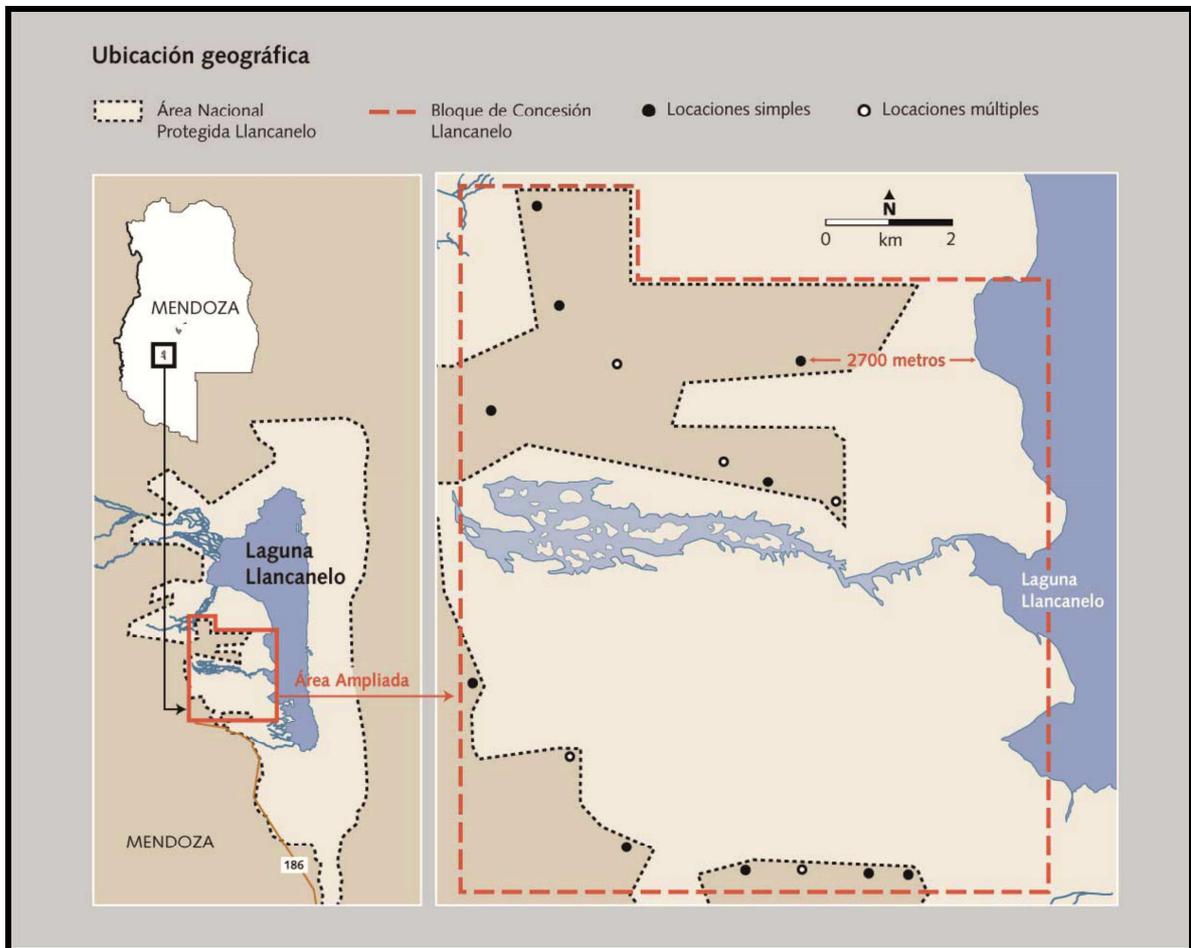


Figura 3: Ubicación del Bloque de concesión de explotación hidrocarburífera operado por YPF. (Fuente: YPF, 2010)

En el 2010 la explotación hidrocarburífera llevó a cabo la finalización de la primera etapa del proyecto, que consiste en la perforación de dos pozos verticales y dos pozos horizontales. Ese mismo año se presentó una denuncia en contra de la empresa YPF por contaminación en uno de los pozos realizados en 1966 el cual no se encontraba debidamente sellado, contando como antecedente que en el año 2001 se encontró en uno de los pozos de abastecimiento de agua de la explotación petrolífera del Área

Llanquanelo contaminación de hidrocarburos en una proporción 300 veces mayor que la permitida por las normas.

Los trabajos de prospección, perforación y explotación de petróleo, cuando no se toman los recaudos necesarios, producen importantes impactos ambientales. Los contaminantes (sales, hidrocarburos, metales pesados, etc.), tarde o temprano, se incorporarán a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

La práctica de disponer directamente el vuelco al terreno de las aguas de formación, genera un fuerte incremento en los tenores salinos de los acuíferos al extremo a veces de inutilizarlos. También han generado problemas los derrames ocasionales de petróleo, debido a accidentes que a veces pueden ser evitados o mitigado su impacto.

Por otro lado las aguas de lluvia que han lavado las colas de tratamiento de minerales de uranio del Complejo Fabril Malargüe de la Comisión Nacional de Energía Atómica, han provocado la migración por aguas del acuífero libre de elementos radioactivos como el radio 222, lo que fue comprobado por el monitoreo de la auditoria sobre los trabajos de Gestión Definitiva de las Colas de Mineral de Uranio. Si bien los tenores de la contaminación radioactiva no han superado los límites aceptables de tales elementos, es de destacar que los mismos han bajado por efectos de las obras que se han realizado para preparar el encapsulado de las colas (CNEA, 2007).

El uso de agroquímicos en el área agrícola bajo riego, tales como: pesticidas, fertilizantes y herbicidas, pueden ser una importante fuente de incorporación de contaminantes a las aguas subterráneas y a los arroyos que de ellas se alimentan, alcanzando además a los humedales e inclusive impactando sobre el ecosistema de la laguna.

No existen medidas regulatorias para el control y manejo de la actividad pastoril en la zona. En base a censos ganaderos, existe un gran número de criaderos que aprovechan los campos de la reserva, con el posible impacto que produce el sobrepastoreo en los suelos de la reserva.

La caza y la pesca en el lago fueron prácticas comunes hasta 1980, pero declinaron significativamente luego de que se creó la reserva. Dado el precedente de la caza y de la pesca, y la abundancia de fauna, la caza furtiva permanece como un problema potencial. Existe algo de pesca ilegal. Sin embargo desde 1993 la presencia permanente de guardaparques ha contribuido al control de la caza furtiva.

El uso de la tierra (rancho / actividades agrícolas) es más intenso en el resto de la cuenca fuera del sitio Ramsar, y hacia la ciudad de Malargüe. El agua del Río Malargüe es usada antes de que llegue a Llanquanelo y distribuida de acuerdo a derechos de irrigación regulados por la Dirección General de Irrigación de la Provincia de Mendoza. Esta agua suministra la provisión doméstica para el Departamento de Malargüe, siendo el resto distribuido para agricultura y rancho. El uso creciente está afectando el nivel del lago y hay esfuerzos para mantener un flujo mínimo de entrada al lago.

Sin lugar a dudas, dentro de esta cuenca, el elemento contaminante que presupone un mayor impacto en la calidad ambiental lo constituye el petróleo, debido a la proximidad del Bloque de Concesión de Llanquanelo a la laguna.

La mayoría de los acuíferos de la zona no poseen horizontes impermeables que los aíslen de los líquidos, que por diversos motivos puedan derramarse sobre la superficie del suelo, este hecho los coloca en una situación de alta vulnerabilidad.

Un análisis de vulnerabilidad del área circundante a la laguna de Llacanelo permitirá tener una primera impresión de la capacidad de respuesta del sistema ante acciones antrópicas que ocurren en ella.

La finalidad de este estudio es la obtención de un mapa de Vulnerabilidad del acuífero ante la posible contaminación del mismo por derrame superficial de contaminantes en el Bloque de Concesión Llacanelo, operada por YPF S.A.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca de la Laguna de Llanquanelo se encuentra ubicada en la Provincia de Mendoza en el Departamento Malargüe. La región en consideración tiene un área aproximada de 10.600 km² que sólo contiene al pueblo de Malargüe, algunas estancias y puestos y la población propia de las minas que allí existen (Valladares, 2003).

Esta cuenca se encuentra bordeada por un filo montañoso cuyas cumbres superan los 3.000 metros de altura, como los cerros Los Nucos (3.937 m) y Torrecillas (3.734 m). Al norte se encuentran terrenos más altos; los cordones del Nevado al este y del Payen al sur completan el contorno de esta cuenca endorreica (UNC, 2013 a).

El bajo Llanquanelo es producto del hundimiento por compensación cuando se elevaron los Andes. Se ubica aproximadamente a 1.280 m de altura sobre el nivel del mar y ocupa una superficie de 370 Km². A él aportan sus aguas los arroyos Malargüe, Alamo, El Chacay y Malo. Hacia el sudoeste de la laguna se encuentran numerosos sumideros por donde las aguas infiltran pasando a formar parte de las aguas subterráneas. La Laguna Llanquanelo se encuentra rodeada por bañados y por una llanura salina. Presenta fluctuaciones estacionales en su profundidad, las cuales dependerán de la acumulación de nieve en el invierno y de los aportes de sus afluentes. En años de pocas precipitaciones, no pasa de ser un gran bañado de muy poca profundidad. Sólo por excepción llega a 1 m y en muy contados puntos, a 2 m.

El principal contribuyente es el río Malargüe o Malalhué, el cual nace en la laguna Malargüe, de 200 Ha de extensión y a 2.500 m sobre el nivel del mar. Con dirección hacia el río Malargüe, pero sin llegar hasta él, corren los arroyos Loncoche, Tronquimalal, Chachao y Maquimalal, aparte de infinidad de quebradas menores que, como las anteriores, descienden de los faldeos septentrionales de los cerros El Chimango, El Gorro, de la Ventana, Mollar, Tronquimalal, Toscal y Miramo. Entre los tributarios menores algunos de los cuales se pierden en los bañados antes de ingresar a la laguna se pueden citar los arroyos Chacay, Malo, Mocho, Menuco, Carilauquen y Carapacho (UNC, 2013 a).

Superponiéndose por momentos con el Área Natural Protegida Llanquanelo, se encuentra el área del bloque de concesión Llanquanelo, ubicado al oeste de la laguna y explotado por YPF, constituye un sector de topografía deprimida, rodeado por cerros al Norte y coladas basálticas al Sur, siendo la zona más elevada el Cerro Trapal.

2.1. UBICACIÓN

Como ya se mencionó la Laguna de Llanquanelo se ubica al sur de la Provincia de Mendoza, en el denominado "Bajo de Llanquanelo", en el departamento de Malargüe, entre los 35° 30' y los 36° de latitud Sur y entre los 69° y 69° 15' de Longitud Oeste a una altitud de 1330 m.s.n.m.

El Bloque de Concesión Llanquanelo se encuentra al oeste de la laguna en un sector de topografía deprimida, rodeado por cerros al Norte y coladas basálticas al Sur. Para acceder al mismo desde la localidad de Malargüe se deben recorrer 22 km por la Ruta Nacional N° 40 en sentido Sur, hasta interceptar la Ruta Provincial N° 186, donde se debe girar hacia el Este.

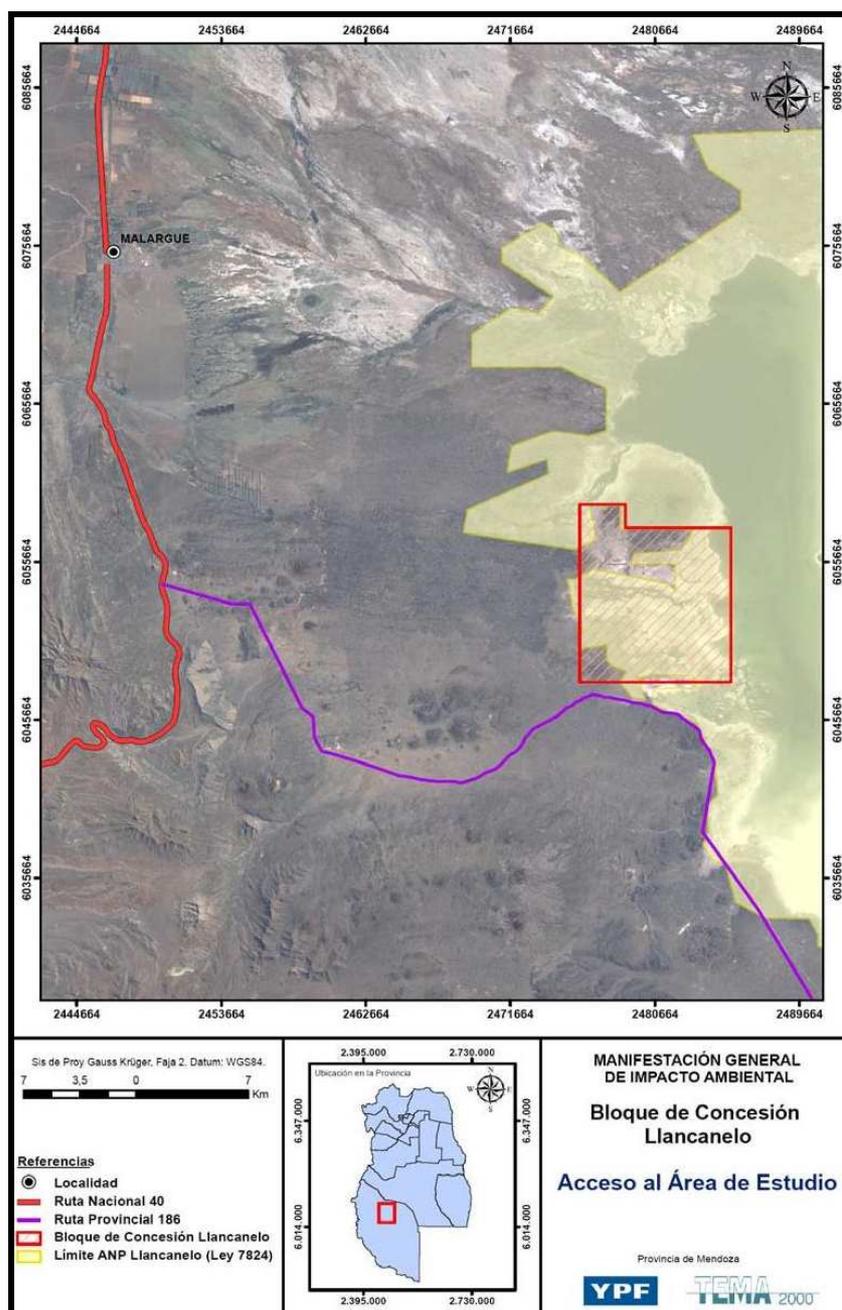


Figura 4: Ubicación del Bloque de concesión de explotación hidrocarburífera operado por YPF. (Fuente: YPF, 2009)

2.2. CLIMA

Dada la lejanía de esta zona al Océano Atlántico, y la presencia de la cordillera de Los Andes que la separa a la provincia del Océano Pacífico, hace que la misma no goce de la atemperación climática que producen los vientos húmedos oceánicos. Esta circunstancia clasifica a la zona como continental. Por lo cual la amplitud climática o variación entre condiciones mínimas y máximas es muy grande (UNC, 2013 a).

El sector de la laguna en particular, se ubica próximo a la zona de circulación de vientos semipermanentes del oeste. Predominando los vientos del oeste post-frontal, con vientos a velocidades constantes y escasa nubosidad 120 días totalmente despejados.

El mapa climatológico del Inventario de Recursos para la región Andina (Norte, 1996) ubica la zona en un sector desértico. Las isohietas, en la figura 5, muestran a su vez un incremento hacia el sector Oeste de la cuenca, sin que esto alcance para revertir las condiciones de aridez imperantes.

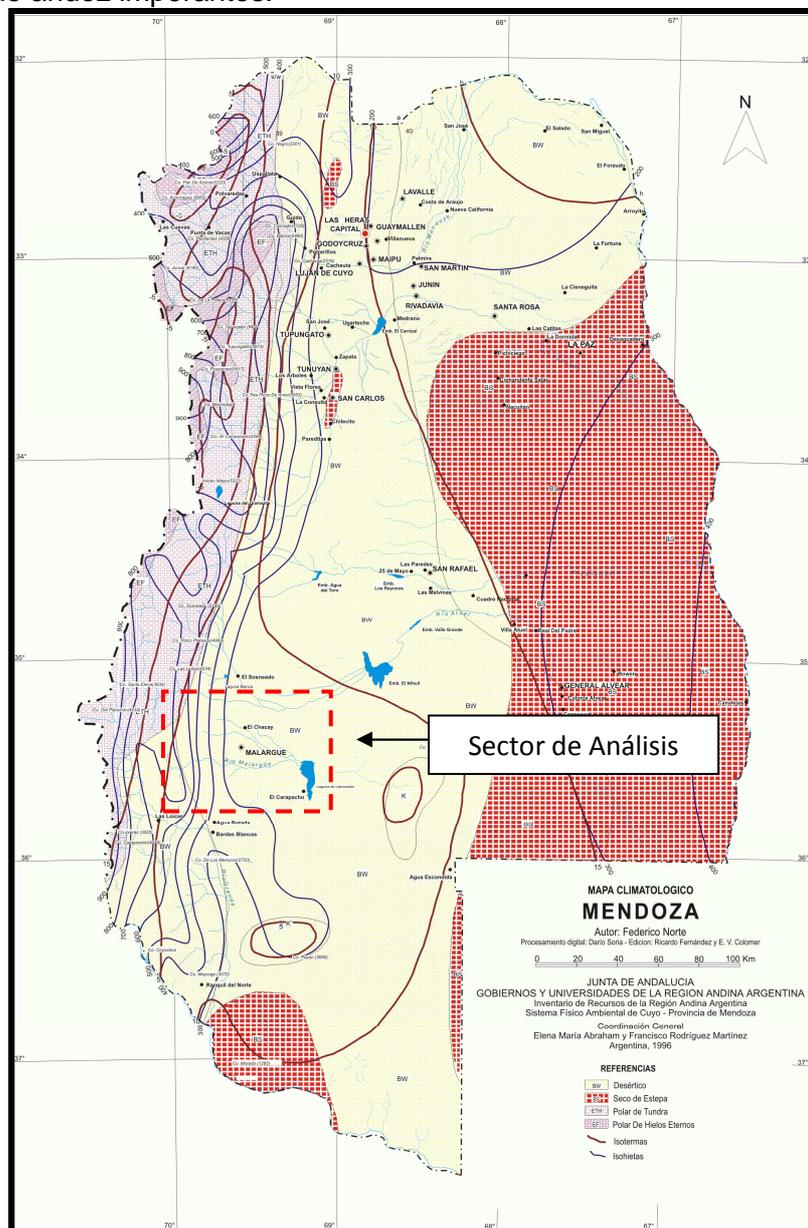
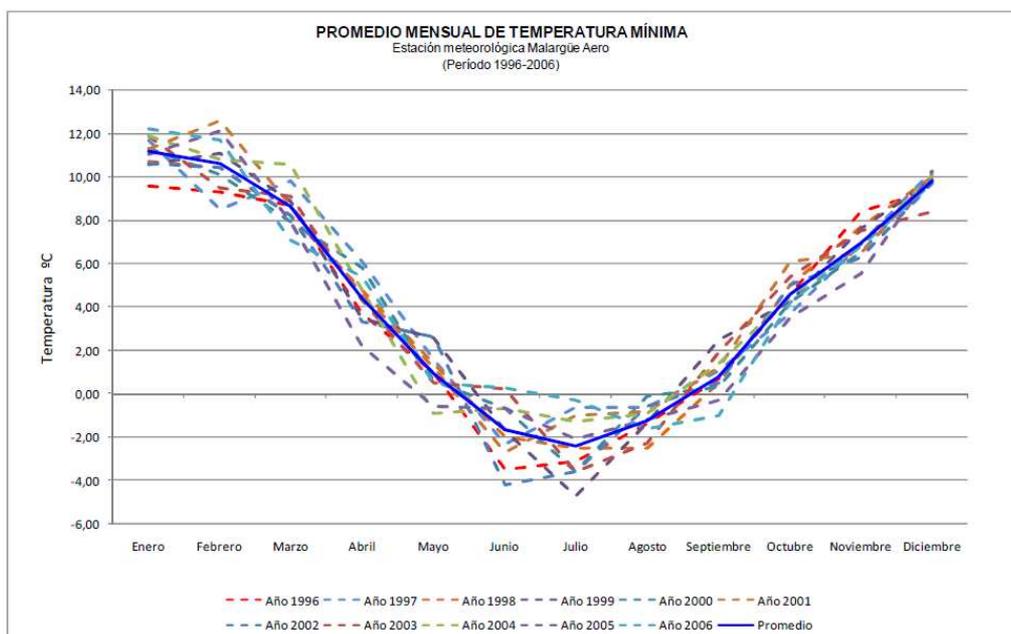
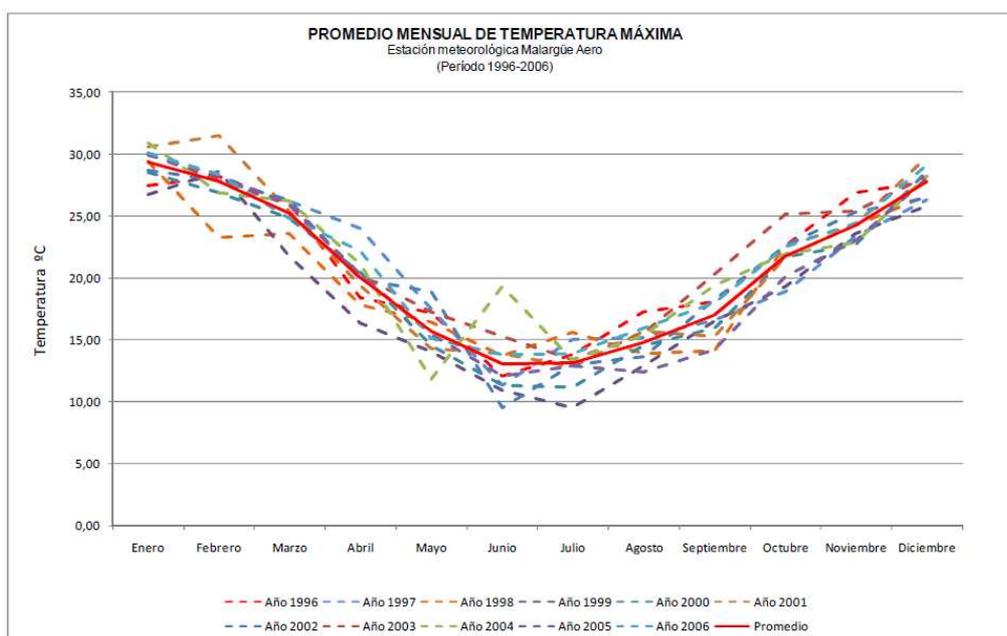


Figura 5: Mapa climatológico de la provincia de Mendoza (Fuente: Norte, 1996).

2.2.1. Temperatura Media Mensual

Según datos obtenidos de la estación meteorológica de Malargüe Aero ubicada dentro de la zona de estudio para el periodo de 1996 a 2006, las temperaturas medias anuales oscilan entre 20,2 °C y 5,3 °C, lo que corresponde a un clima templado fresco. La temperatura máxima media anual es de 20.8°C, lo que establece que el verano es variable entre cálido y fresco suave, mientras que la temperatura mínima media anual es de 4.4°C, lo que establece un invierno frío moderado, aunque con una estación invernal que alcanza el grado de frío intenso. Son grandes las amplitudes térmicas tanto diarias como anuales, a raíz de la continentalidad y la influencia del relieve (YPF, 2009).

En el siguiente grupo de figuras se presentan los valores medios registrados, con el fin de ser empleados en las fórmulas para el cálculo aproximado de la evapotranspiración y recarga.



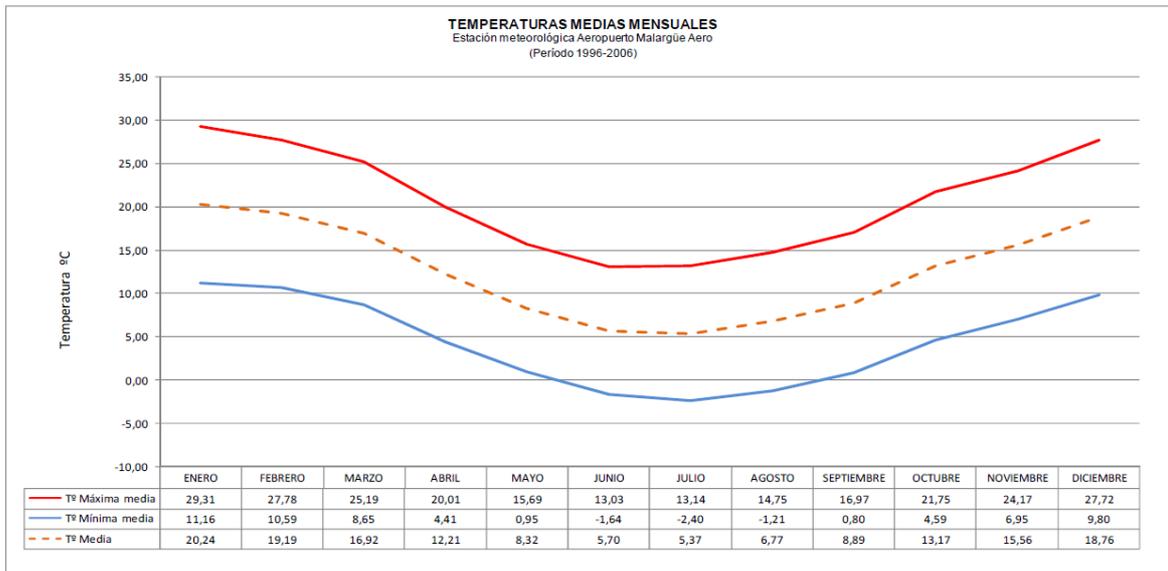


Figura 6: Temperaturas medias Mensuales de las Estación Malargüe Aero (1996-2006). (Fuente: YPF, 2009)

2.2.2. Precipitación en la Cuenca

Los recursos hídricos provienen de las escasas precipitaciones meteóricas que ocurren dentro de la cuenca, disminuyendo levemente de Oeste a Este.

En la zona cordillerana, se tienen registros de precipitaciones de 500 a 600 mm/año, que se producen principalmente en forma de nieve. Allí, se han acumulado grandes reservas de agua almacenada en glaciares, campos de nieve, y retenida por procesos de congelamiento en el perfil permeable de las formaciones rocosas, dando origen entre otros a los ríos Atuel y Malargüe y una cantidad importante de arroyos cordilleranos.

La cuenca se encuentra ubicada dentro de una zona templada, regida por la acción de los anticiclones del Atlántico y del Pacífico y la depresión del Noroeste argentino quienes junto al Surco de las bajas presiones de la extremidad austral del país, determinan los regímenes de precipitación de la zona.

En la figura 7 se observa que el sector de análisis cubre zonas que van desde una precipitación media anual de 600mm a 100 mm.

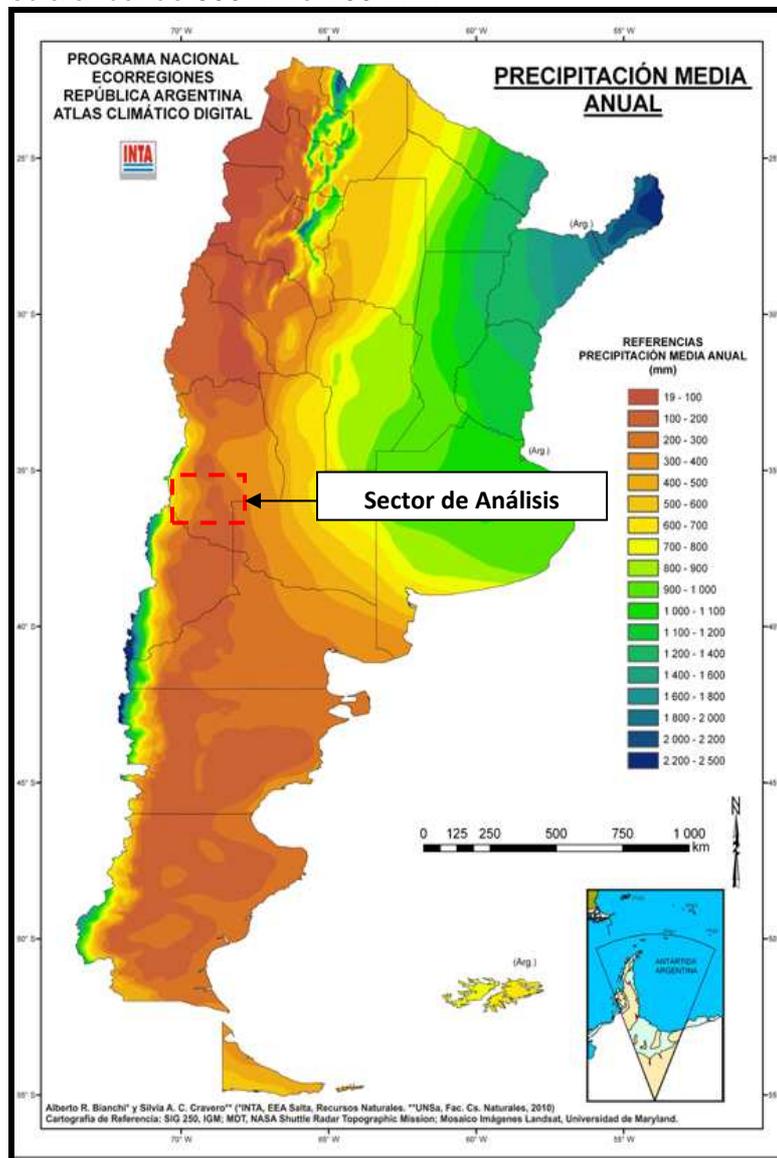


Figura 7: Isohietas medias anuales República Argentina (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010)

La aridez de la zona es resultado de la distancia a la costa atlántica, del régimen climático y de la presencia de la cordillera de los Andes que se interpone a los vientos húmedos provenientes del pacífico.

En la figura 8 se reproduce mediante isohietas la precipitación media anual del país (Burgos y Vidal, 1951). En la misma figura se indica mediante curvas, el exceso hídrico medio anual. En la misma se visualizan dos grandes zonas con excedentes hídricos (NE y SO) que coinciden aproximadamente con aquellas de mayor pluviosidad. En el sector oeste donde se sitúa la cuenca superficial de Llanquanelo se corresponde claramente en su mayoría con una zona de déficit hídrico.

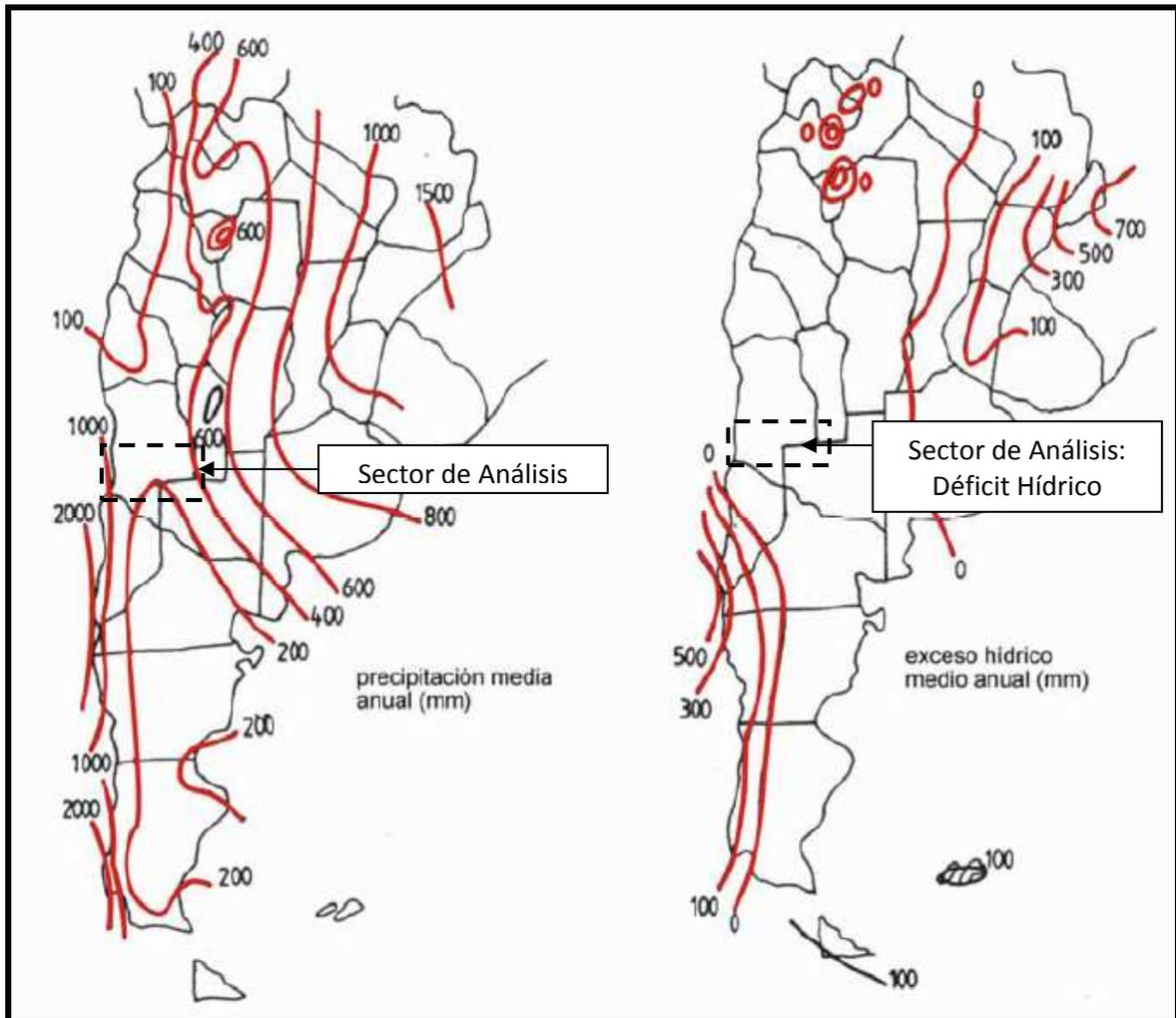


Figura 8: Precipitación media anual y Exceso hídrico medio anual (Fuente: Burgos y Vidal, 1951).

La precipitación en la zona del bloque de Concesión Llanquanelo no dista mucho de las condiciones del resto de la cuenca. Se identifican dos regímenes de precipitación: uno netamente mediterráneo, con precipitaciones níveas importantes concentradas en los meses de invierno, y otro régimen de tipo monzónico, registrando los mayores aportes en verano (YPF, 2009).

Para el caso de las precipitaciones se utilizaron datos de la estación meteorológica Arroyo La Vaina en un periodo desde 1995 hasta 2007 ya que se consideró más cercano a la zona del bloque de concesión (Figura 9).

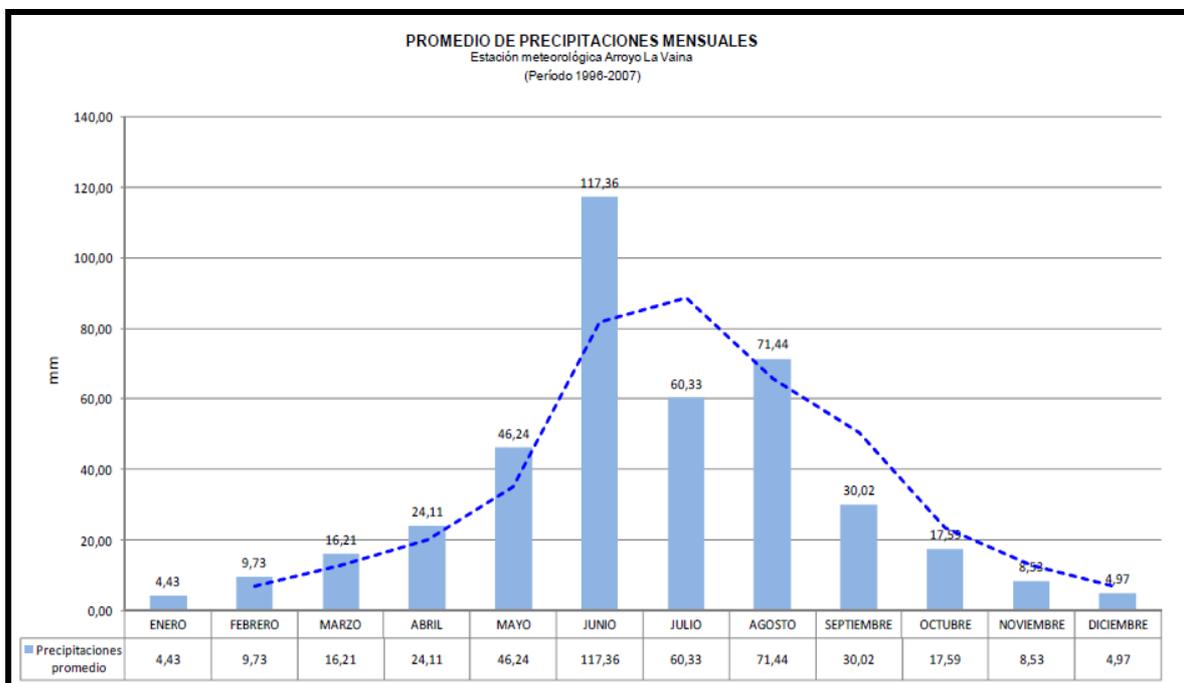


Figura 9: Precipitación media mensual para la Estación Arroyo La Vaina (1996-2007). (Fuente: YPF 2009)

2.3. GEOLOGÍA

El sector donde se emplaza la Laguna de Llanquanelo abarca tres grandes unidades estructurales, que desde Oeste a Este se denominan Faja Plegada y Corrida de la Cordillera Principal, Depresión de los Huarpes y Payunia, esta última también ocupa la zona Sur (UNC, 2013 a).

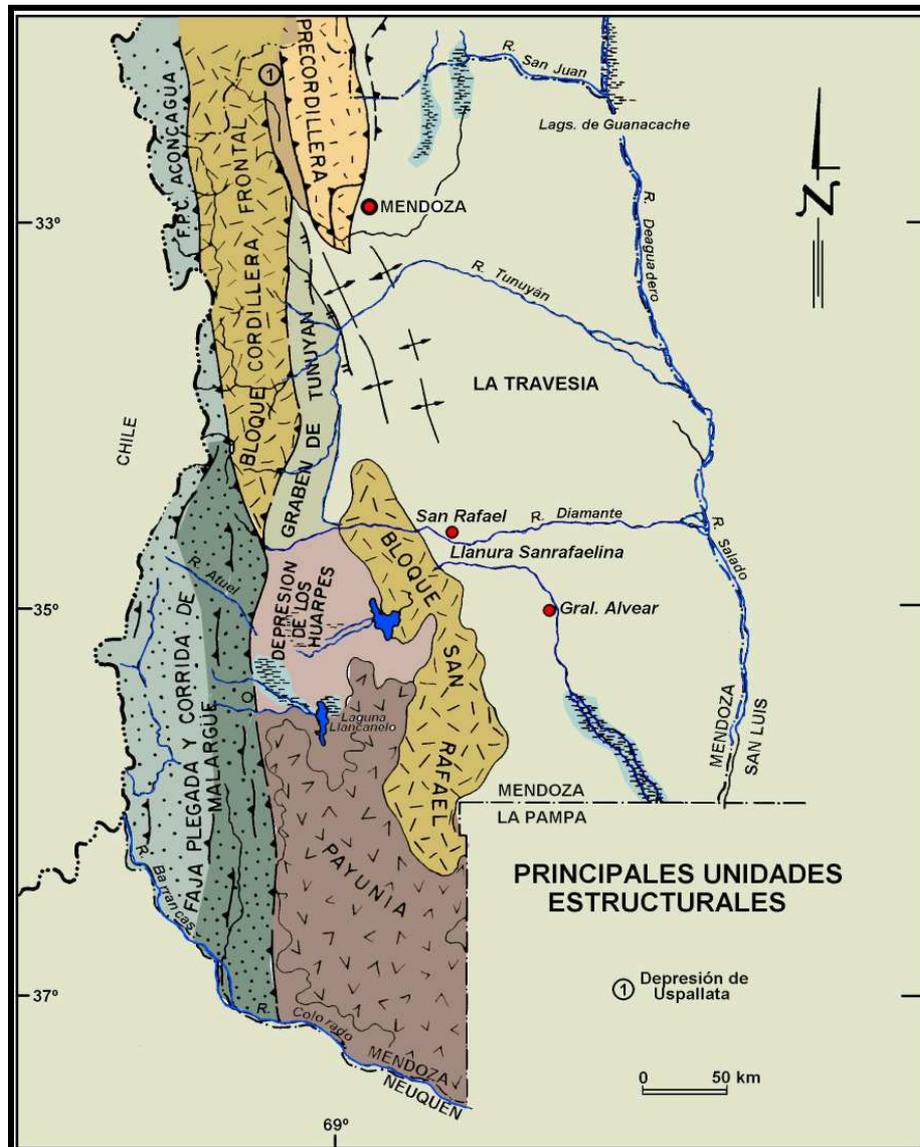


Figura 10: Principales Unidades Estructurales Mendoza (Fuente: Kozlowski, Manceda y Ramos, 1993).

La Cordillera Principal Mendocina se divide en dos segmentos, considerando como límite el Río Diamante. El comportamiento estructural de ambos difiere en que el sector norte no involucra basamento en su deformación lo que sí hace el segmento sur.

Al sur del río Diamante, la Cordillera Principal Mendocina está constituida por el cinturón plegado y corrido de Malargüe, que corresponde al área en estudio.

El cinturón plegado y corrido de Malargüe está constituido por estructuras compresionales limitadas por fallas inversas de bajo ángulo. En su deformación estas estructuras involucran al basamento volcánico, Grupo Choiyoi.

Hacia el sur del río Salado y la sierra de Palauco, el sector externo del cinturón plegado y corrido se caracteriza en superficie por un conjunto de amplios anticlinales y sinclinales de orientación norte-sur. El frente montañoso corresponde al flanco oriental del anticlinal de Malargüe, limitado al este por la falla de Malargüe. Ésta es considerada de tipo normal con inclinación al Este y originada con posterioridad a la formación del anticlinal (6.7 m.a.).

La falla mencionada se extiende desde Malargüe hasta el cerro Chihuido, donde se bifurca en una rama occidental que atraviesa el cerro Bayo de la Batra y una extensa rama oriental que está definida por el alineamiento de numerosos volcanes cuaternarios con una orientación nor-noroeste. Las lavas originadas en estos volcanes alineados, de edad Pleistocena superior-Holocena, indican reactivaciones cuaternarias extensionales en ese tramo.

En el sector extracordillerano, entre los 34° y 35°30', durante el período Terciario se produjo en la zona un descenso general y reiterado del área pedemontana adyacente a la cordillera acompañado en el Cuaternario por un ascenso del Bloque de San Rafael, que delimitó hacia el oeste una subcuenca intermontana, limitada al oeste por la Cordillera Principal y al sur por el relieve volcánico de la Payunia. Esta unidad se denomina Depresión de Los Huarpes y se extiende hacia el norte hasta el Arroyo Anchayuyo y hacia el sur hasta la Laguna de Llanquanelo.

En todo el sector los sedimentos Terciarios apoyan directamente sobre las rocas paleozoicas. Sobre este substrato se han acumulado, durante el Cuaternario, depósitos aluviales pedemontanos, sedimentos fluviales y de bajos, depósitos piroclásticos e interdigitaciones localizadas de coladas basálticas. De acuerdo con estimaciones de algunos autores como Polanski, el espesor máximo aproximado de la pila sedimentaria en este sector es de 1500 y 1800 m.

Siguiendo en el sector extracordillerano, al sur de la provincia de Mendoza, se encuentra un área caracterizada por sus extensos campos volcánicos de edad Cuaternaria. Este sector presenta coladas basálticas que se ubican en el retroarco andino al sur del Cerro Diamante (UNC, 2013 a).

La Payunia se puede considerar como un ambiente volcánico complejo, relieve irregular generado por la alternancia de conos volcánicos con extensas planicies basálticas. Las principales unidades de actividad volcánica son los grandes campos volcánicos de Llanquanelo (10.700 km²) y Payún Matrú (5.200 km²), formados por productos emitidos desde hace aproximadamente 5 Ma desde centros volcánicos que han estado activos desde comienzos del Plioceno, hasta tiempos prehistóricos.

Las formas volcánicas típicas son conos piroclásticos y coladas de lava. En la región se han formado aproximadamente 400 conos piroclásticos o conos construidos por la acumulación de materiales de diferentes granulometrías y formas eyectados desde un conducto central. Los mayores sobresalen entre 200 y 300 m sobre el relieve circundante pero son frecuentes conos pequeños de 50 metros.

Estos campos volcánicos se implantaron sobre los márgenes del Bloque San Rafael y sobre el frente de corrimientos más oriental de la Cordillera Principal. El volcanismo presenta una composición básica alcalina, y está representado por estratovolcanes,

calderas volcánicas y domos. Las rocas basálticas constituyen extensos campos lávicos como los de Llancanelo.

Las estructuras que forman esta región se caracterizan por un fallamiento extensional, evidenciado por el alineamiento de los volcanes con un rumbo noroeste. La orientación de estas fracturas pareciera que está controlada por los lineamientos extensionales de estructuras más antiguas.

El área del yacimiento Llancanelo ocupa la Depresión de los Huarpes, formada por acumulación de sedimentitas Cretácicas y Terciarias no plegadas. El yacimiento está rodeado de rocas eruptivas del Terciario y del Cuaternario.

Estas rocas sedimentarias se apoyan sobre el basamento que sufrió procesos de extensión y hundimiento en bloque a partir del Paleozoico superior – Triásico y continuó durante el Terciario y Cuaternario. Las efusiones basálticas fueron continuas en dicho período en esta zona del retroarco (que migró de Oeste a Este).

En el yacimiento, se reconocen en superficie las siguientes formaciones (YPF, 2009), presentadas de las más antiguas a las más modernas:

Formación Chapúa: (Plioceno Superior – Pleistoceno). Forman conos volcánicos en parte piroclásticos. El Cerro Trapal al Norte del yacimiento está constituido por basaltos olivínicos. Las coladas están constituidas por basaltos oscuros, masivos, con marcado diaclasamiento y contienen fenocristales de plagioclasa y olivino. Algunas coladas tienen vesículas con ceolitas. Existen mantos de lapillis oscuros y rojizos.

Formación El Puente: Se trata de mantos y coladas estratificadas de composición basáltica, de color negro, gris oscuro y castaño oscuro, en menor proporción. En algunas exposiciones se intercalan depósitos piroclásticos principalmente ignimbríticos. Se le asigna una edad del Pleistoceno medio a superior.

Depósitos de Llanura pedemontana: formados por depósitos clásticos de arenas, limos y arcillas que se extienden desde el piedemonte -formado al pie de la cordillera hacia el Este. Edad Pleistoceno superior hasta Holoceno temprano. Son los sedimentos que rellenan la Depresión de los Huarpes, afloran al Sur, en la zona del volcán Carapacho.

Formación Tromen: de edad Holocena (0,4 +- 0,2 Ma), afloran al Oeste y Suroeste del área, formado por basaltos escoriaceos, lapilli y cenizas volcánicas de aspecto muy fresco. Los basaltos son de color gris oscuro a negro, muy porosos, con amígdalas rellenas con ceolita. La textura es porfírica con plagioclasa, olivino, clinopiroxeno y opacos.

Basalto Cerro Campanario: De edad Holocena, se encuentra constituido por basaltos olivínicos. Las coladas se disponen periféricamente a la boca del domo emisor. Los sectores más elevados se presentan muy erosionados.

Depósitos eólicos: de edad Holocena. Son arenas finas a muy finas dispuestas en médanos móviles o fijados por la vegetación. Los sedimentos están muy seleccionados, constituidos en gran parte por vidrio volcánico. Están diseminados por toda el área del yacimiento.

Depósitos aluviales: de planicies de los ríos Malargüe y sus afluentes se indican para gran parte del área del yacimiento. La llanura salina de borde de laguna y los mallines de los bañados se han desarrollado sobre esta formación. Esto es necesario revisar ya que

es más probable que sean depósitos de laguna dado el alto contenido en sales totales y nódulos carbonáticos micríticos atribuidos a formaciones de zonas pantanosas con influencia marina. Las concreciones carbonáticas micríticas se forman en aguas poco profundas y en sedimentos no consolidados con presencia de material volcánico (SEGEMAR, 2005).

En la periferia de la laguna predominan sedimentitas lacustres con alto contenido salino.

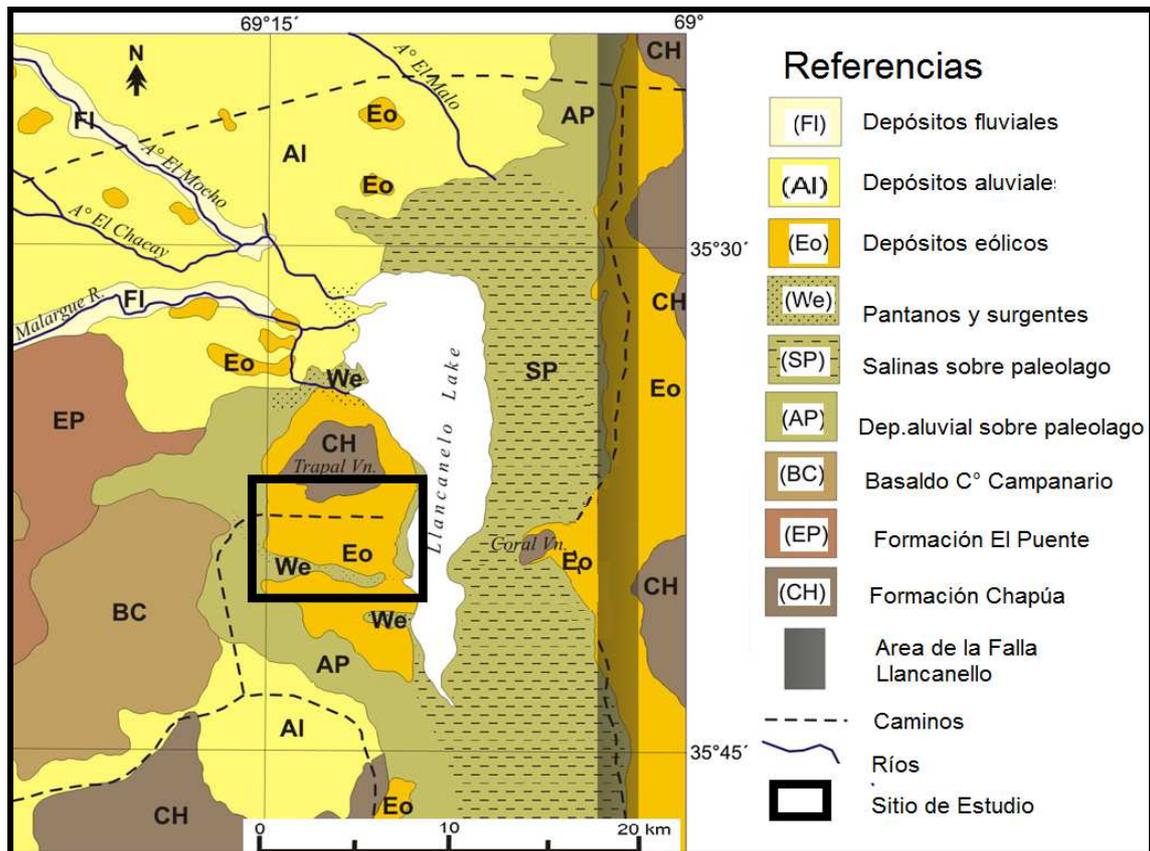


Figura 11: Plano Geológico en las inmediaciones de la Laguna Llanquanelo (Fuente: De La Vega et al., 2012)

2.4. GEOMORFOLOGÍA

En la región en estudio, se pueden diferenciar dos componentes morfológicos de características diferentes: el elevado, compuesto por la Cordillera Principal y la Payenia y el componente morfológico bajo determinado por la Depresión de los Huarpes (UNC, 2013 a).

Con respecto a la Cordillera Principal, en el sector comprendido al sur del Río Diamante, los cursos de agua ingresan al área pedemontana después de recorridos largos y complicados. La red de drenaje adquiere diseños característicos debido al fuerte control estructural que sufren las rocas, por la existencia de fallas y fracturas. Los ríos que cortan a esta unidad son el Malargüe, Grande, Salado y el curso superior del Atuel.

Los cordones montañosos de rumbo meridional actúan como barrera natural para la humedad proveniente del lado chileno. Los valores registrados de precipitaciones son de 500 a 600 mm/año, se producen principalmente en forma de nieve y se acumulan bajo la forma de glaciares y campos de nieve. De esta forma, durante las estaciones de altas temperaturas los cursos de agua son alimentados por la ablación del hielo glaciar y de los glaciares de roca y por el derretimiento de la nieve. Son ríos con régimen de tipo nival, donde los caudales crecientes se dan desde la primavera al verano y decrecen en el invierno. La mayoría de estos ríos son de régimen permanente. A su vez estos cursos de agua alimentan, junto a las precipitaciones, los acuíferos libres que se desarrollan al pie de esta unidad. Los valores de cotas de esta unidad varían desde 4000 m en el sector más elevado de la cordillera hasta los 1600-1500 m, donde comienza la planicie agradacional.



Figura 12: Geomorfología laguna Llanquanelo, abanicos y nacientes. (Fuente: Elaboración propia)
De forma adyacente a la cadena montañosa, desde la cota de 1500 m, se desarrolla una planicie de agradación pedemontana y una llanura pedemontana respectivamente. Su origen se vincula a la depositación fluvial llevada a cabo por los principales cursos de agua que atraviesan esta unidad, desde el Terciario hasta el Cuaternario. El más importante de estos ríos es el Malargüe, que nace aproximadamente a los 35°30' y a esta altura atraviesa la planicie con una dirección oeste-este. Corre por una planicie aluvial ancha y su curso es sinuoso, desembocando finalmente en el sector noroeste de la Laguna. Este cuerpo de agua está limitado al oeste, sur y este por los depósitos volcánicos de la Payenia, y al norte por los depósitos aluviales de los ríos Atuel, Salado y Malargüe.

En la planicie de agradación y la llanura pedemontana se reconocen formas tales como abanicos de deyección relativamente activos, como por ejemplo los de los ríos Salado y Atuel, microlagunas y pantanos en la zona de quiebre vinculadas zonas de descarga parcial de aguas freáticas subterráneas, e importantes paleocauce con albardones laterales. Estos últimos muy probablemente estén relacionados con divagaciones de los ríos Salado y Atuel antes de su encajamiento actual.

Todos los ríos que transitan la planicie se caracterizan por adquirir un comportamiento meandriforme al llegar a la planicie, producto esto del cambio de pendiente a la cual se tienen que adecuar. Este rasgo se va pronunciando a medida que se van alejando del cordón montañoso, donde las pendientes del terreno van disminuyendo considerablemente. Desde los 1500 m, en el comienzo de la planicie pedemontana hasta los 1330 m en el borde de la Laguna de Llanquanelo hay más de 35 km, lo cual indica que la pendiente media del sector no supera el 0,2 %. Esto último trae aparejado un ensanchamiento en los cauces y la disminución en la capacidad de transporte del curso de agua, lo que genera una clasificación mecánica de los materiales.

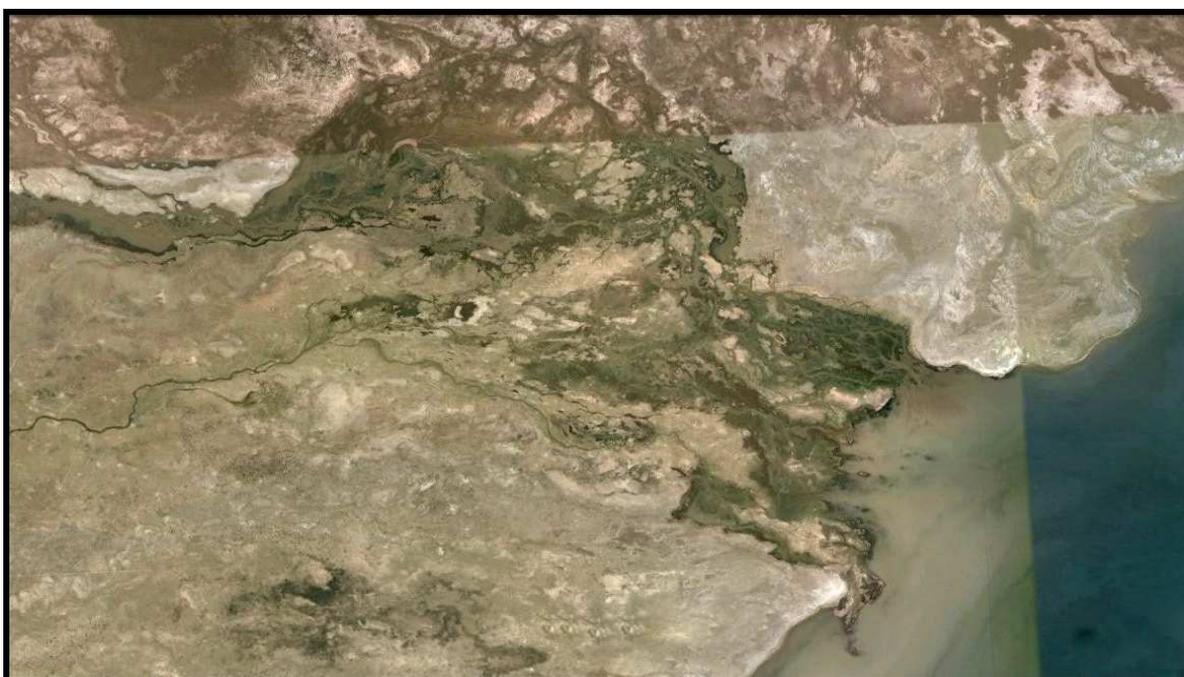


Figura 13: Deltas al ingreso del Rio Malargüe a la laguna

Desde el norte, la laguna es alimentada superficialmente por el río Malargüe y los arroyos de los Pescadores (Chacal – Los Alamos), Mocho y Malo. Estos últimos arroyos son

alimentados por cuencas superficiales, por aguas de “revenimiento” o lagunas vinculadas al nivel freático y muy probablemente en forma subterránea por agua aportada por los ríos Salado y Atuel. En la figura 27 (sección 2.7.2) se muestran los principales tributarios de la laguna de Llanquanelo.

La marcada disminución de pendientes y los materiales granulométricos antes citados han determinado que en el ingreso a la laguna de los ríos Malargüe, de los Pescadores Mocho, se haya formado un cono de deyección muy plano o “delta”. Este delta determina que los cursos pierdan energía de transporte y contribuye aún más a retener sedimentos (UNC, 2013 a). En la figura 13 se muestran los deltas mencionados.

Al oeste de la Laguna de Llanquanelo y sur de la misma, se observa un relieve volcánico, de edad Pleistocena-Holocena, sobreimpuesto a los depósitos aluviales más antiguos. Es una planicie volcánica interrumpida por un conjunto de aparatos volcánicos.

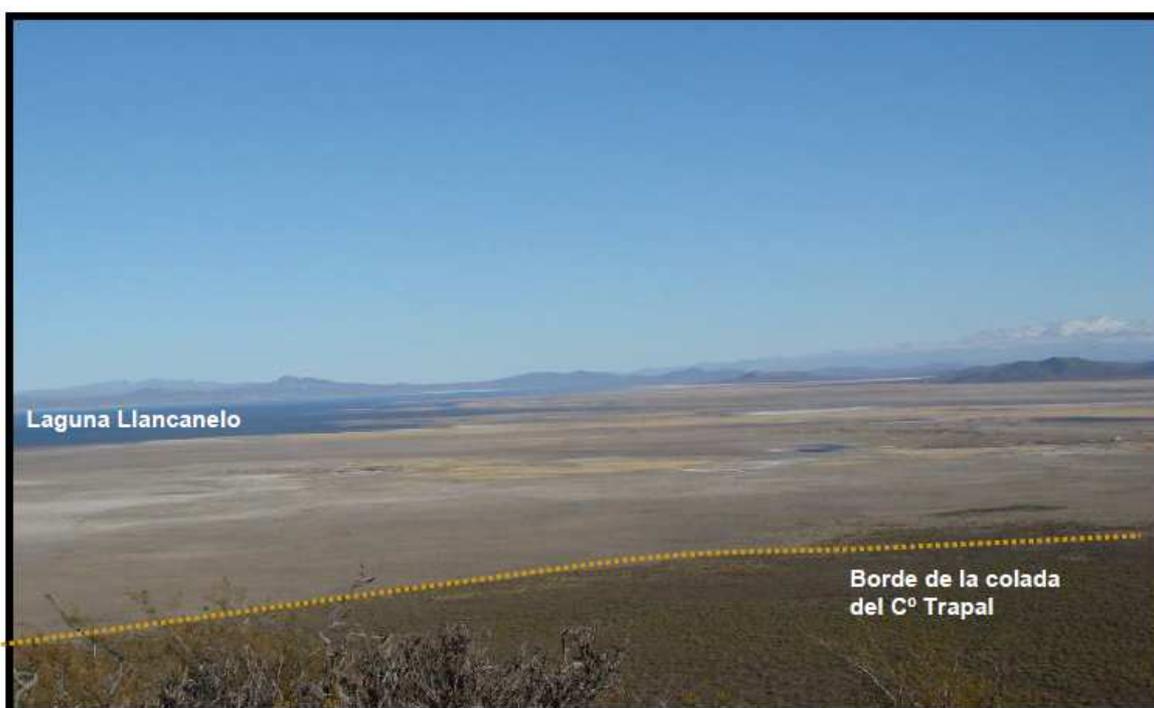


Figura 14: Vista Panorámica desde el Cerro Trapal a la Laguna de Llanquanelo.

En la periferia de la laguna predominan sedimentitas lacustres con alto contenido salino. Rodeando la laguna por el Este, Sur, Suroeste y Oeste se dispone el Campo Volcánico de Llanquanelo, donde las coladas conforman una planicie basáltica con un sinnúmero de conos que asoman de la misma.

Asociados a los márgenes de los bañados se desarrollan depósitos de areniscas con estructura de pequeños médanos. Bordeando la laguna, los sedimentos de playa originan una zona pantanosa con abundante salinización.

Entre la zona cordillerana y la zona compuesta por rocas basálticas, se observa la presencia de cuencas endorreicas, sin desagüe, que forman pequeños cuerpos de agua en sedimentos arenosos, que tienden a evaporarse o infiltrarse. Esto se debe a que existe una barrera natural actuando, constituida por las elevaciones basálticas (conos de volcanes y coladas), que funciona como límite oriental y no permite que las aguas mencionadas lleguen a la laguna.

En el borde occidental de la laguna y en sentido norte – sur, se encuentran los arroyos Menuco, Carilauquen y Carapacho. Estos arroyos se originan como consecuencia de la surgencia del agua subterránea. Esta es el área de descarga de la cuenca hidrogeológica vinculada a rocas volcánicas. Dependiendo de la época del año, estos cursos de agua, alimentados por surgencias subterráneas, pueden llegar a desaguar en la laguna. Por ejemplo, el arroyo Carilauquen normalmente se infiltra o se evapora antes de llegar al perillago.

Estos pequeños arroyos tienen muy baja pendiente longitudinal, consecuentemente sus cursos tienden a diversificarse, expandirse y en muchos casos a generar lagunas en su trayectoria. Al igual que el área deltiforme (delta del Malargüe), estas zonas presentan una alta biodiversidad y es de los pocos sectores dentro del área estudiada donde se puede reconocer un incipiente desarrollo de suelos muy someros vinculados a la presencia de vegetación. Estos suelos son muy friables y presentan nula estructura, lo cual los hace muy susceptibles a la erosión y alteración producto de elementos antrópicos tales como la carga animal (UNC, 2013 a).

2.5. TOPOGRAFÍA

El Bloque de Concesión LLancanelo constituye un sector de topografía deprimida, rodeado por cerros al Norte y coladas basálticas al Sur. Presenta un perfil asimétrico con pendiente hacia el Este (Fulginiti, 2013).

Las mayores alturas del área se ubican hacia el Norte, siendo la zona más elevada el Cerro Trapal, ubicado al Noreste del área con una elevación aproximada de 1.508 m.s.n.m. Además, existen pequeños resaltos topográficos con alturas de 1.400 – 1.350 m.s.n.m., asociados a depósitos piroclásticos (conos volcánicos).

Hacia el Oeste - Suroeste del área de estudio se destacan resaltos menores con alturas de 1.340 a 1.350 m.s.n.m, vinculados con coladas escoriáceas de frentes abruptos y paredes laterales elevadas.

La laguna ocupa una depresión que es la más baja del territorio. Los mapas de altitudes muestran que la cota 1.340 m.s.n.m marca el borde de la planicie con el basalto. Las partes más bajas del yacimiento están situadas a 1.335 m.s.n.m en las proximidades de la laguna.

Debido a la escasa pendiente de la zona, en épocas de lluvia se inunda formando bañados y elevando la línea de costa de la laguna de Llancanelo, mientras que en la época estival suelen conformarse salinas o depresiones salobres.

Los bañados reconocidos se denominan Carilauquen, Los Menucos y Carapacho. Los mismos representan junto con la laguna Llancanelo las zonas deprimidas del terreno circundante.

La figura siguiente es un modelo digital del terreno en ella se observa que la zona de estudio se encuentra en su mayoría dentro de una planicie. La reducida variación cromática en la figura demuestra la escasa variación topográfica del área, exceptuando la zona del Cerro Trepal.

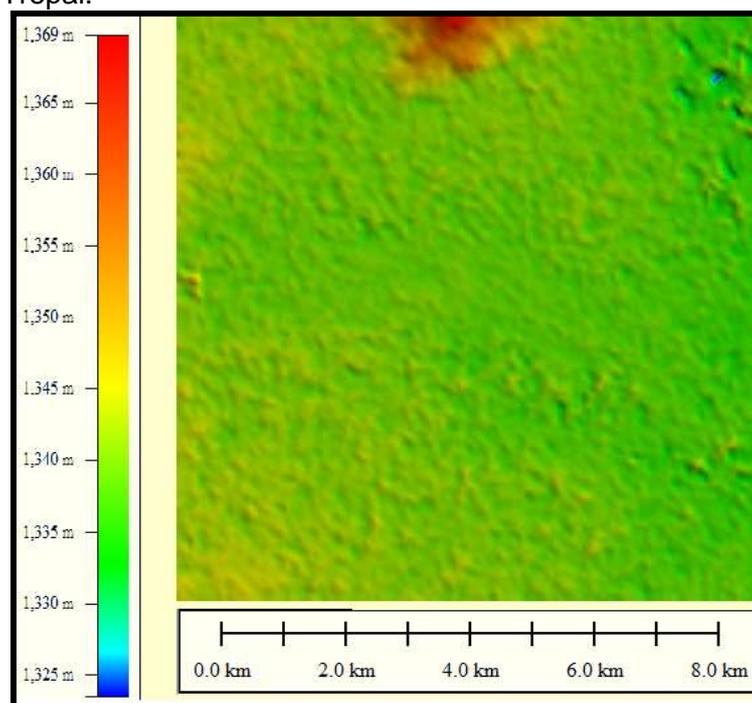


Figura 15: Imagen SRTM correspondiente a la zona de estudio. (Fuente: Flores Nieto, 2013)

2.6. SUELOS

En general existen pocos antecedentes del área de estudio referidos a Suelos, en los alrededores de la laguna de Llanquanelo los suelos dominantes corresponden al orden Entisoles (Regairaz, 1993).

En la clasificación del Soil Taxonomy, los suelos pertenecientes al Orden Entisoles carecen de horizonte pedogénicos o se encuentran poco desarrollados. La carencia de horizontes puede explicarse o bien por el tipo de sustrato en los que los horizontes no se forman rápidamente o bien por una falta de tiempo para que se hayan formado bajo depósitos recientes de cenizas volcánicas, tierras de aluvión o en pendientes afectadas por la erosión.

Los suelos que se aproximan a la laguna se enriquecen en arcillas y limos y se tornan cada vez más salinos. Los suelos con arenas se ubican al este en los cordones de médanos y o depósitos arenosos costeros como también en la parte baja del piedemonte aunque con una textura no salina y arenas más gruesas.

El orden Aridisoles también ocupa importante superficie, especialmente en la Payunia, sector austral ocupado por mesetas lávicas parcialmente sepultadas por sedimentos arenosos.

Los aridisoles son suelos presentes en regiones áridas con un régimen climático donde la evapotranspiración es mucho mayor que la precipitación durante la mayor parte del año. Presentan un contenido en sales solubles que limita el crecimiento de la vegetación (sólo aparecen plantas halófitas). Las sales de los niveles profundos ascienden por capilaridad formando salares o salinas. (Moreno et al., 2010)

En el Este de Payunia predominan los Calciortides típicos y en el sector Sur son dominantes en el paisaje Calciortides líticos y típicos.

Los Calciortides pertenecen a un suborden de los ardisoles: los ortides. Los calciortides típicos son suelos masivos y blandos o débilmente estructurados. Se ubican en pendientes disectadas y/o convergentes, bajadas y conos aluviales, en planicies estructurales y en serranías. Los factores limitantes de los ardisoles ortides se refieren a la erosión hídrica actual, las pendientes y el clima.

Son destacados los suelos basálticos con toda su gama de variaciones texturales desde bloques de rocas escoriales hasta las arenas volcánicas. Los suelos volcánicos, que ocupan una superficie semejante a los salinos, incluyen conos y derrames de escorias basálticas con distintos grados de meteorización.

En el Informe Preliminar y Estacional Invierno del área de Concesión de Llanquanelo (YPF, 2008) se describe el trabajo de campo realizado para determinar los tipos y propiedades del suelo del Bloque de Concesión, en el cual se efectuó una caracterización completa del sitio (rasgos externos) prestando atención a las variaciones de la vegetación y la superficie del suelo. Se realizaron calicatas en las cuales se caracterizó morfológicamente el perfil del suelo (rasgos internos). Se describió su morfología según las normas y recomendaciones del "Field Book for Describing and Sampling Soils" del Dpto. de Agricultura de los EE.UU. (Schoeneberger, 1998): horizontes, tipo y forma del límite entre horizontes, color, textura, estructura, consistencia, presencia y cantidad de raíces y reacción al ácido clorhídrico.

Se determinó que, en general, los suelos en el área de estudio son de textura fina, con un alto contenido salino (dinámica salina importante). Además, presentan características hidromórficas muy marcadas dado que la mayoría del tiempo el agua se encuentra en superficie o muy cercano a ella. (YPF, 2008)

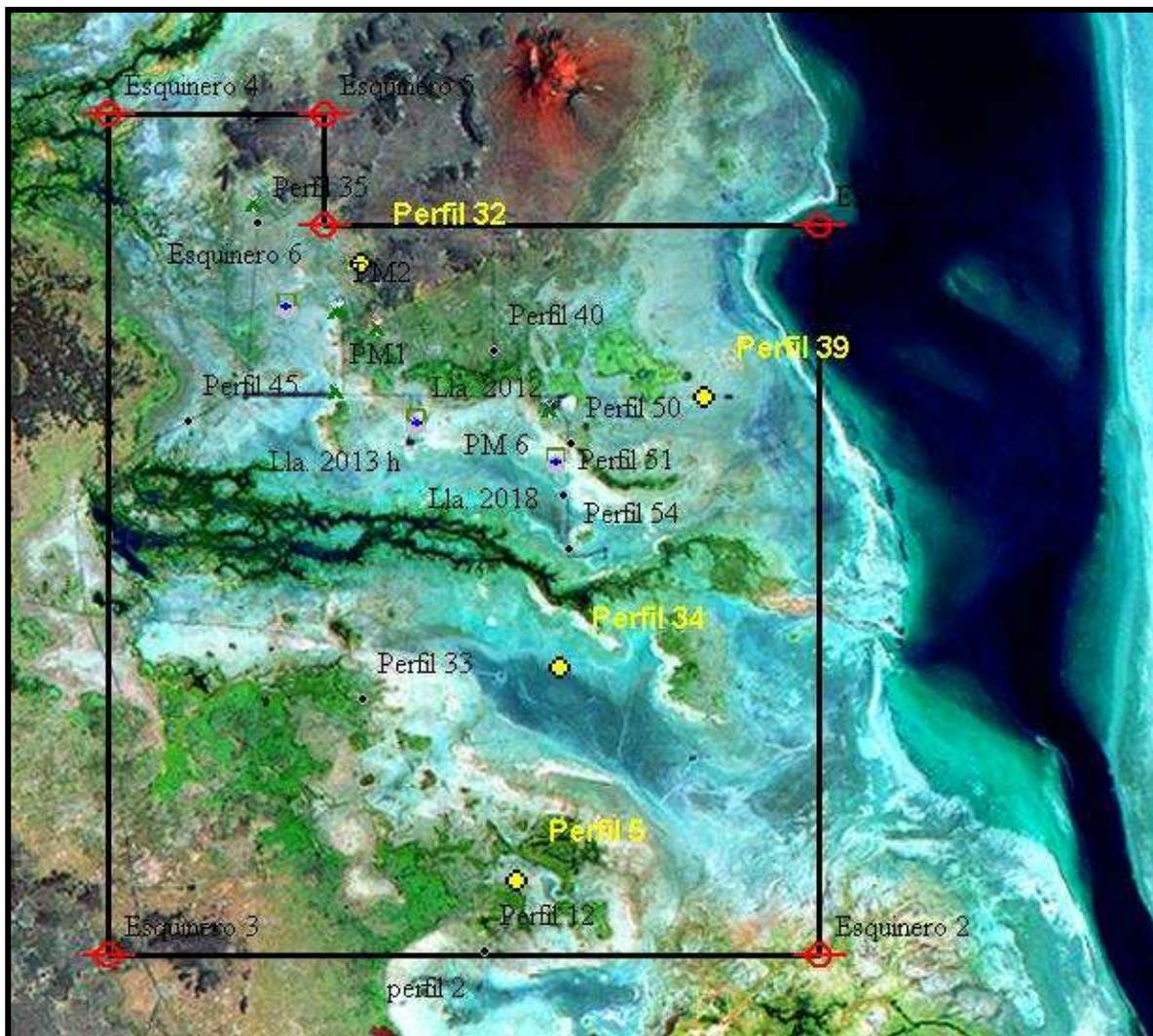


Figura 16: Ubicación de las calicatas realizadas por YPF (Fuente: Elaboración propia).

A continuación se describen algunas de las calicatas realizadas por YPF y sus características, se decidió describir éstas calicatas particulares ya que representan los distintos tipos de cobertura de suelo presentes en el área.

Perfil N° 34: Fecha 20/09/08. Coordenadas geográficas: 35° 68039 – 69° 19922



Figura 17: Perfil N° 34.



Figura 18: Sitio donde se realizó el perfil de suelo.

Información geomórfica del sitio:

Geomorfología: Planicie fluvio lacustre. Bajo salino.
Material originario: Depósitos fluvio lacustres.

Condición de agua:

Clase Natural de drenaje: Muy pobremente Drenado.
Escurrimiento superficial: nulo

Fragmentos Superficiales:

Sales: Sí.

Vegetación:

Cobertura vegetal: 0%

Clasificación de Perfil 34:

En la siguiente tabla se presentan los diferentes horizontes encontrados en el sondeo con sus descripciones y espesores:

Tabla 1: Descripción morfológica Perfil 34.

Horizonte	Descripción
C1 (0-5 cm)	Pardo (10YR 5/3) en húmedo; arenoso con predominio de arenas medias; masivo; no adhesivo y no plástico en mojado; fuertemente carbonatado.
2C2z (5-12 cm)	Blanco (10YR 8/2) en húmedo, franco limoso; masivo, friable en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico en mojado; fuertemente carbonatado.
2C3 (12-24 cm)	Gris claro (10YR 7/2) en húmedo; franco limoso; firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico en mojado; fuertemente carbonatado, presencia de abundantes y pequeños caracolitos (litoridinas); fuertemente carbonatado.
2C4g (40-60 cm)	Pardo grisáceo a pardo grisáceo claro (2.5Y 5/2 y 6/2) en húmedo; franco arenoso fino; friable en húmedo, no adhesivo y no plástico en mojado; fuertemente carbonatado, presencia de abundantes y pequeños caracolitos; moteados abundantes y destacados de color amarillo oliva (2.5Y 6/6).
40 cm	Napa Freática

Perfil N° 39: Fecha 20/09/08. Coordenadas geográficas: 35° 64802 – 69° 17802



Figura 19: Perfil N° 39.



Figura 20: Sitio donde se realizó el perfil de suelo.

Información geomórfica del sitio:

Geomorfología: Planicie fluvio-lacustre.

Material originario: Depósitos aluviales.

Condición de agua:

Clase Natural de drenaje: Imperfectamente Drenado.

Escurrimiento superficial: nulo

Fragmentos Superficiales:

Sales: Si, en forma de manchas.

Vegetación:

Tipo: Cortadera, pichana, pasto salado *Distichlis*.

Cobertura vegetal: 100%

Clasificación de Perfil 39:

En la siguiente tabla se presentan los diferentes horizontes encontrados en el sondeo con sus descripciones y espesores:

Tabla 2: Descripción morfológica Perfil 39.

Horizonte	Descripción
A (0-11 cm)	El color del horizonte es abigarrado (amarillo y negro) difícil de precisarlo; franco a franco arenoso; friable en húmedo, ligeramente adhesivo y no plástico en mojado. En la base del horizonte se observó la presencia de 4 cm de arenas volcánicas gris oscura.
C1 (15-20 cm)	Pardo amarillento claro (2.5Y 6/4) en húmedo, franco arcillo limosa, masivo, firme en húmedo, adhesivo y plástico en mojado; ligeramente carbonatado; moteados abundantes grandes y precisos de color pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2).
C2 (20 - 30 cm)	Pardo grisáceo oscuro (2.5Y 4/2) en húmedo, franco limosa; masivo; firme en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico en mojado; ligeramente carbonatado.
0,30 cm	Napa Freática

Perfil N° 5: Fecha 20/09/08. Coordenadas geográficas: 35° 70610 – 69° 20555



Figura 21: Perfil N° 5.



Figura 22: Sitio donde se realizó el perfil de suelo.

Información geomórfica del sitio:

Geomorfología: Planicie fluvio-lacustre.

Material originario: Depósitos fluvio-lacustres.

Condición de agua:

Clase Natural de drenaje: Pobre a Imperfectamente Drenado.

Escurrimiento superficial: nulo.

Fragmentos Superficiales:

Sales: Si.

Vegetación:

Tipo: pasto salado *Distichlis*, pichana, frankenia.

Cobertura vegetal: 50-60%.

Clasificación de Perfil 5:

En la siguiente tabla se presentan los diferentes horizontes encontrados en el sondeo con sus descripciones y espesores:

Tabla 3: Descripción morfológica Perfil 5.

Horizonte	Descripción
A (0-10 cm)	Pardo pálido (10YR 6/3) en húmedo; franco arenosa con arenas medias; bloques subangulares, medios, moderados; friable en húmedo, ligeramente adhesivo y no plástico en mojado; raíces finas y medias comunes.
C1 (10-45 cm)	Pardo grisáceo (10YR 5/2) en húmedo; franco arcillo limosa, masivo, friable en húmedo, adhesivo y plástico en mojado; ligeramente carbonatado; moteados finos comunes de color pardo amarillento (10YR 5/6). En el horizonte se observaron sales precipitadas.
C2x (45-77+ cm)	Pardo grisáceo claro (10YR 6/2) en húmedo; franco limosa a franco arenosa, firme en húmedo, adhesivo y ligeramente plástico en mojado; fuertemente carbonatado, presencia de concreciones calcáreas (fitolitos); moteados finos, abundantes, de color pardo
C3 (47-127 cm)	Pardo grisáceo a pardo grisáceo claro (10YR 5/2 y 10YR 6/2) en húmedo, fuertemente carbonatado.
C4 (127-152+ cm)	Gris claro (10YR 7/2) en húmedo; fuertemente carbonatado
1,42 cm	Napa Freática

Perfil N° 32: Fecha 20/09/08. Coordenadas geográficas: 35° 6317 – 69° 22814

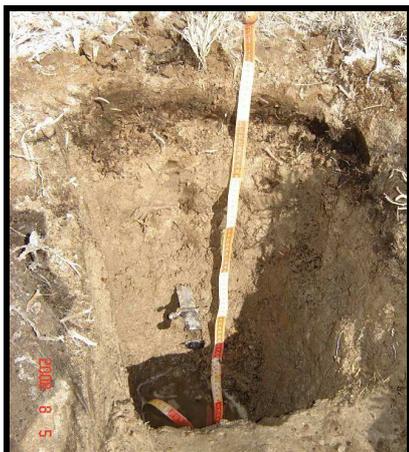


Figura 23: Perfil N° 32.

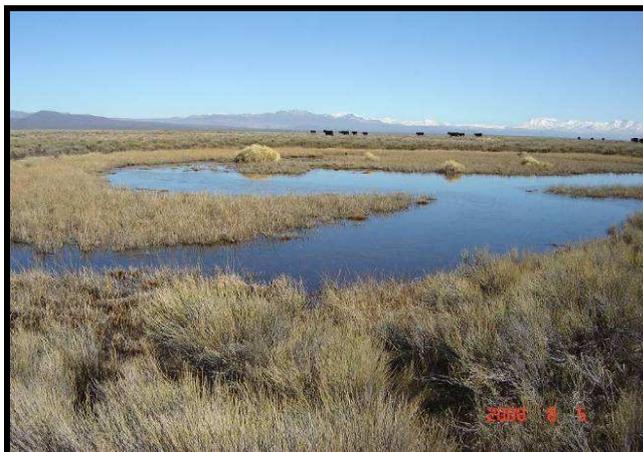


Figura 24: Sitio donde se realizó el perfil de suelo.

Información geomórfica del sitio:

Geomorfología: Planicie fluvio-lacustre.

Material originario: Depósitos fluvio-lacustres.

Condición de Agua:

Clase Natural de drenaje: Pobremente Drenado.

Escurrimiento superficial: nulo.

Fragmentos Superficiales:

Sales: Manchones blancos sobre la superficie del suelo y sales precipitadas sobre la vegetación.

Vegetación:

Tipo: pichana, frankenias, cortaderas, pasto salado *Distichlis*.

Cobertura vegetal: 50%.

Clasificación de Perfil 32:

En la siguiente tabla se presentan los diferentes horizontes encontrados en el sondeo con sus descripciones y espesores:

Tabla 4: Descripción morfológica Perfil 32.

Horizonte	Descripción
A1 (0-5 cm)	Pardo (10YR 5/3) en húmedo; franco arenoso; bloques subangulares, finos, débiles, no adhesivo y no plástico en mojado; raíces finas y medias abundantes.
2A2 (5-20 cm)	Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo, franco; bloques subangulares, finos, débiles, friable en húmedo, ligeramente adhesivo y no plástico en mojado; ligeramente carbonatado.
C1 (20-50 cm)	Pardo grisáceo claro a pardo pálido (10YR 6/2 y 6/3) en húmedo; franco arcillo limoso; firme en húmedo, adhesivo y plástico en mojado; moderadamente carbonatado, con presencia de pequeñas concreciones de carbonato de calcio
C3 (73-100 cm+)	Pardo grisáceo a pardo grisáceo claro (10YR 5/2 y 10YR 6/2) en húmedo, fuertemente carbonatado
0,75 cm	Napa Freática

2.7. HIDROGRAFÍA

Como ya se dijo el bajo Llacanelo es una depresión al pie de las montañas de la región Andina central producto del hundimiento por compensación cuando se elevaron los Andes. A él aportan sus aguas los arroyos Malargüe o Malalhué, Alamo, El Chacay y Malo (este último, al parecer, originado por antiguos desbordes del Salado, hoy afluente del Atuel). En el plano bajo de la cuenca, algunas vertientes forman vegas pastosas, e incluso originan arroyitos de efímeros recorridos.

El sistema de Llacanelo se puede caracterizar a partir de los siguientes componentes físicos (UNC, 2013 a):

- Laguna Llacanelo.
- Tributarios:
 - Malargüe
 - Alamo
 - El Chacay
 - Mocho
 - Malo
 - Arroyo Menuco
 - Arroyo Carilauquen
 - Arroyo Carapacho

A continuación se describen brevemente los componentes de este sistema:

2.7.1. Laguna Llacanelo

La laguna se encuentra situada hacia el este y sudeste de la Ciudad de Malargüe. En el noroeste desemboca el río Malargüe, su principal alimentador de escorrentía superficial, que desemboca formando esteros y bañados. Por lo general, la mayor parte de la cuenca muestra una costra salitrosa, de finos materiales de arrastre. El agua se retrae a las partes más profundas y sólo en épocas de abundancia hídrica supera esos límites estrechos para cubrir espacios mayores.

Numerosos bañados y una llanura salina rodean la laguna. Presenta fluctuaciones estacionales en su profundidad, las cuales dependerán de la acumulación de nieve en el invierno y de los aportes de sus afluentes.

La superficie de la laguna fluctúa estacionalmente de acuerdo al agua que a ella llegue pasando por períodos más ricos y otros más pobres, provocando esto una variación significativa en las hectáreas que ocupa, lo cual está íntimamente relacionado con sus características morfológicas (extremadamente panda). Con un aumento de escasos centímetros en las cotas absolutas de su pelo de agua superficial, se denotan aumentos de superficie muy significativos.

En épocas de sequía el cuerpo de agua se reduce a un mínimo, coincidiendo con el sector más profundo. En las áreas circundantes de la laguna se desarrollan grandes depósitos evaporíticos. Los elevados niveles salinos no homogéneos en sus aguas le confieren características particulares desde el punto de vista hidroquímico y ambiental.

El área máxima de agua abierta ha alcanzado las 65.000 Ha, pero está actualmente reducida a casi un tercio de esta medida. La reducción del volumen del lago ha resultado de la disminución del agua proveniente del Río Malargüe y sus corrientes tributarias (Fulginiti, 2013).

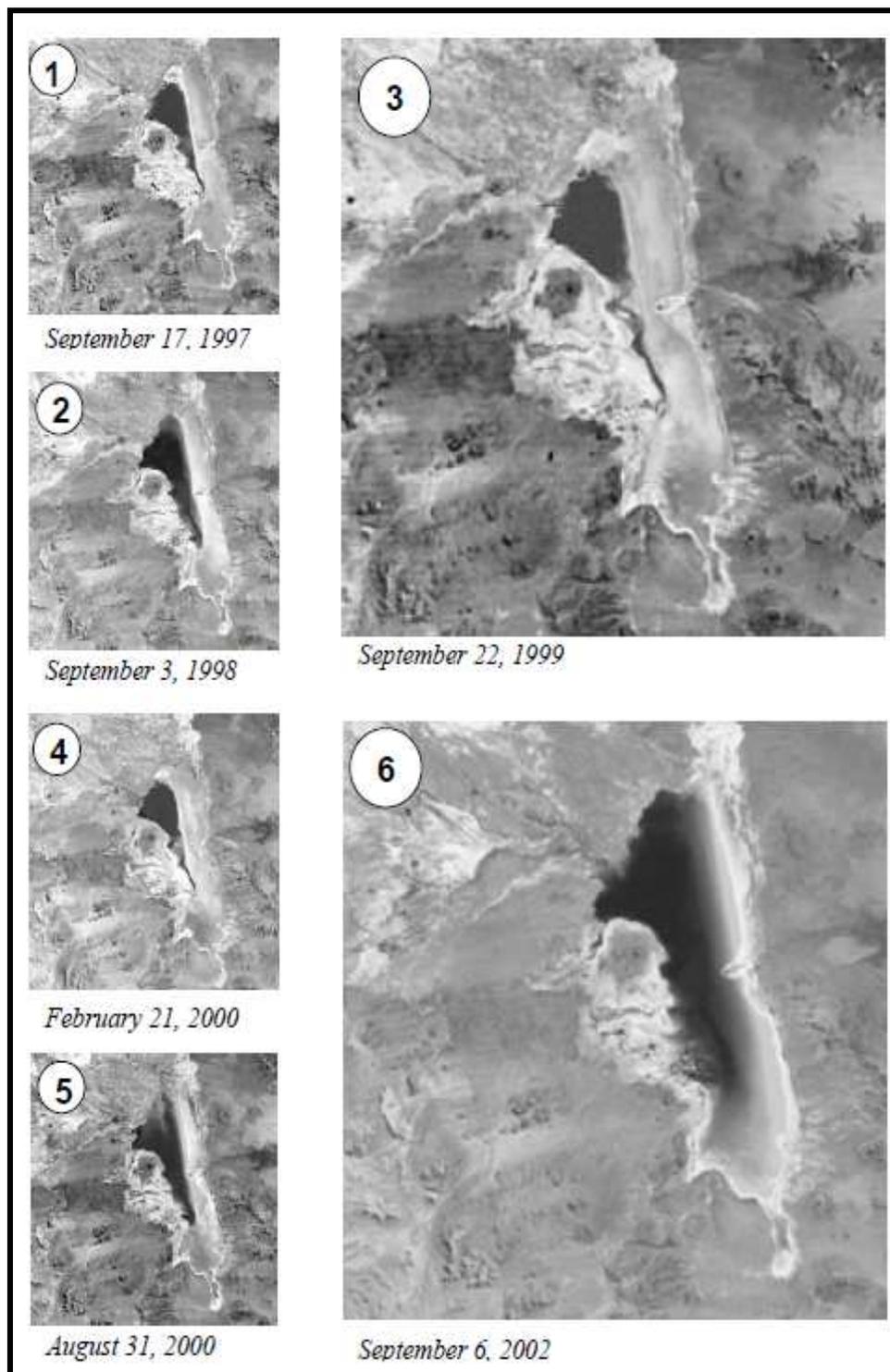


Figura 25: Análisis espacio-temporal de las fluctuaciones de la laguna Llanquanelo entre 1997-2002 realizado con imágenes Landsat. (Fuente: UNC, 2013 a)

La mayor parte del agua que ingresa se origina del derretimiento de nieve a través del Río Malargüe o de varias fuentes al oeste y noroeste del lago, por lo que el nivel de acumulación de nieve en invierno determina la fluctuación estacional del volumen del lago.

Desde el norte, la laguna es alimentada superficialmente por el río Malargüe y los arroyos de los Pescadores (Chacal – Los Alamos), Mocho y Malo. Estos últimos arroyos son alimentados por cuencas superficiales, por aguas de “revenimiento” o lagunas vinculadas al nivel freático y muy probablemente en forma subterránea por agua aportada por los ríos Salado y Atuel.

En el sector sur, sur-oeste y parte del este, comprendido por la Payenia, la laguna es alimentada principalmente por vertientes de agua proveniente de la descarga de los acuíferos en rocas basálticas, o vinculados a ellas. En este sector los cursos de agua superficial son efímeros y temporarios.

Se dispone de información batimétrica generada en trabajos previos (UNC, 2005) mediante análisis de cartografía y batimetrías existentes donde se determinó en detalle la planialtimetría del sistema. A partir de estos análisis se diferenciaron las siguientes zonas de interés:

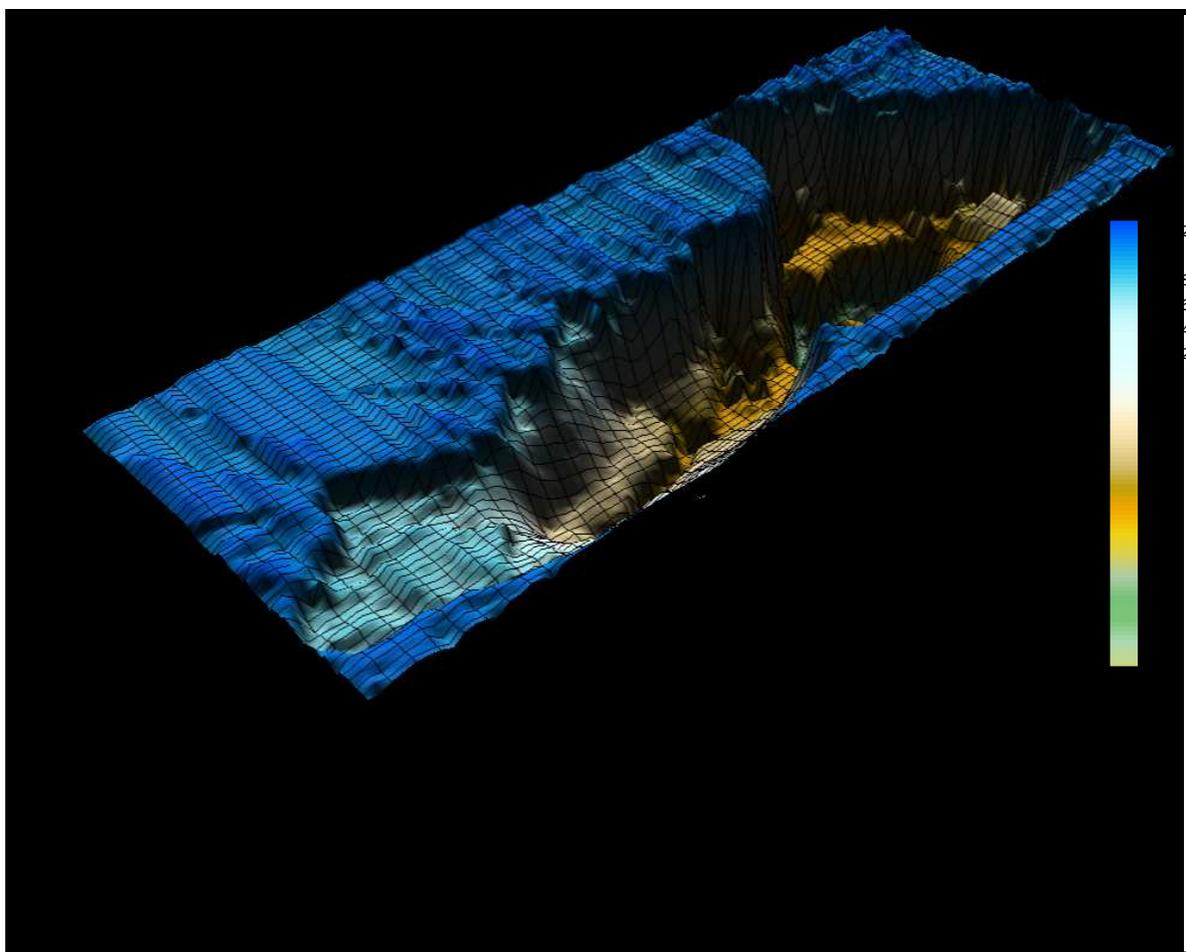


Figura 26: Modelo digital de elevación del fondo de la laguna (Fuente: Fulginiti, 2013)

Vaso de la laguna: zona sujeta a la normal fluctuación de los niveles de agua. Se puede diferenciar dentro de ésta una zona más profunda en el norte, en las cercanías de la desembocadura del río Malargüe, una zona intermedia en la parte central de la laguna y una zona de baja profundidad en el sur y al este de la laguna.

Arroyos surgentes: zona de poca elevación con pendiente general hacia la laguna. Comprende los surgentes de Los Menucos, Carilauquen, Carapacho y Vertiente Agua de la Porteña.

Elevaciones volcánicas: corresponden a las elevaciones de los aparatos volcánicos en las cercanías de la laguna. Los más importantes son el Tronqui-malal y el Cerro Carapacho.

Plataforma de basaltos: con pendiente general de oeste a este, de la zona de la Ruta Nacional Nro. 40 a los bordes de la laguna.

Desembocadura del río Malargüe y arroyos del norte: zona de bajas pendientes con leves ondulaciones.

Borde este y sur: abarca todo el límite este de la laguna, con pendiente general de este a oeste, con pequeñas arroyadas temporales y las últimas elevaciones de los aparatos volcánicos ubicados al este de la laguna. El límite con la laguna lo marca en el sector norte una pequeña barranca de muy poca elevación. Un sitio a destacar es la pequeña elevación denominada Cerro Corales, en la zona central de la laguna.

Todos los ríos se caracterizan por adquirir un comportamiento meandriforme al llegar a la planicie, producto esto del cambio de pendiente a la cual se tienen que adecuar, pasando de 1% en la zona de los conos a 0.07% en la llanura. Este rasgo se va pronunciando a medida que se van alejando del cordón montañoso, donde las cotas del terreno van disminuyendo considerablemente, desde los 1500 m (comienzo de la planicie pedemontana) a los 1350 m (Laguna de Llanquanelo). A raíz de esto se produce un ensanchamiento en los cauces y la disminución en la capacidad de transporte del curso de agua, lo que genera una clasificación mecánica de los materiales. Los depósitos con sedimentos de granulometrías más gruesas (desde cantos rodados a arenas gruesas) se desarrollan al pie de la montaña, luego el depósito de sedimentos con una granulometría intermedia (arenas y limos) y finalmente se depositan los materiales más finos (arcillas).

2.7.2. Tributarios

A continuación se describen los ríos cuyos caudales son representativos para el flujo base, considerando su curso desde el límite de cuenca, o desde el punto en que pueden considerarse permanentes, hasta la laguna.

Río Malargüe

El río Malargüe o Malalhué es el principal afluente superficial de la cuenca hídrica de la Laguna de Llanquanelo abarcando gran parte del departamento de Malargüe.

El Río Malargüe nace al pie del Cerro Cabecera del Colorado, desde donde nace con el nombre de Arroyo Colorado, a unos 10 km aguas abajo, a la altura del Puesto Navarro conforma la Laguna Malargüe, de 200 Ha de extensión (2.500 msnm) y recibe el aporte de las aguas del Arroyo Torrecillas, adoptando a partir de este punto la denominación de Río Malargüe.

Posteriormente a lo largo de su recorrido recibe el aporte de numerosos arroyos como el Arroyo Lagunitas, Agua Hedionda, Arroyo Pincheira o de las Minas que son unos de los tributarios más importantes que tiene el río. A continuación el río recibe los aportes de otro importante afluente por margen derecha, y que corresponden al Arroyo Llano Grande. Seguidamente, al entrar en la llanura, el río se une con el arroyo Loncoche, último tributario que tiene el río.

A partir de esta última confluencia, el río toma un rumbo N-E, hasta las proximidades del Puesto Rodríguez, en ese punto tuerce bruscamente hacia el Sur, para seguir nuevamente en dirección N-E y luego descender hacia el S-E donde desemboca en la Laguna de Llanquanelo.

Con dirección hacia el río Malargüe, pero sin llegar hasta él, corren los arroyos Tronquimalal, Chachao y Maquimalal, aparte de infinidad de quebradas menores que, como las anteriores, descienden de los faldeos septentrionales de los cerros El Chimango, El Gorro, de la Ventana, Mollar, Tronquimalal, Toscal y Miramo.

La principal zona de riego se inicia en el Dique Derivador Blas Brisoli, que deriva sobre margen izquierda al Canal Matriz Cañada Colorada, a través del cual se entrega la dotación para riego a la mayoría de los derechos empadronados. El dique es una obra de derivación para la utilización del agua para riego y abastecimiento poblacional. El resto del caudal que escurre por el río descarga a la Laguna de Llanquanelo tras un recorrido aproximado de unos 75 km.

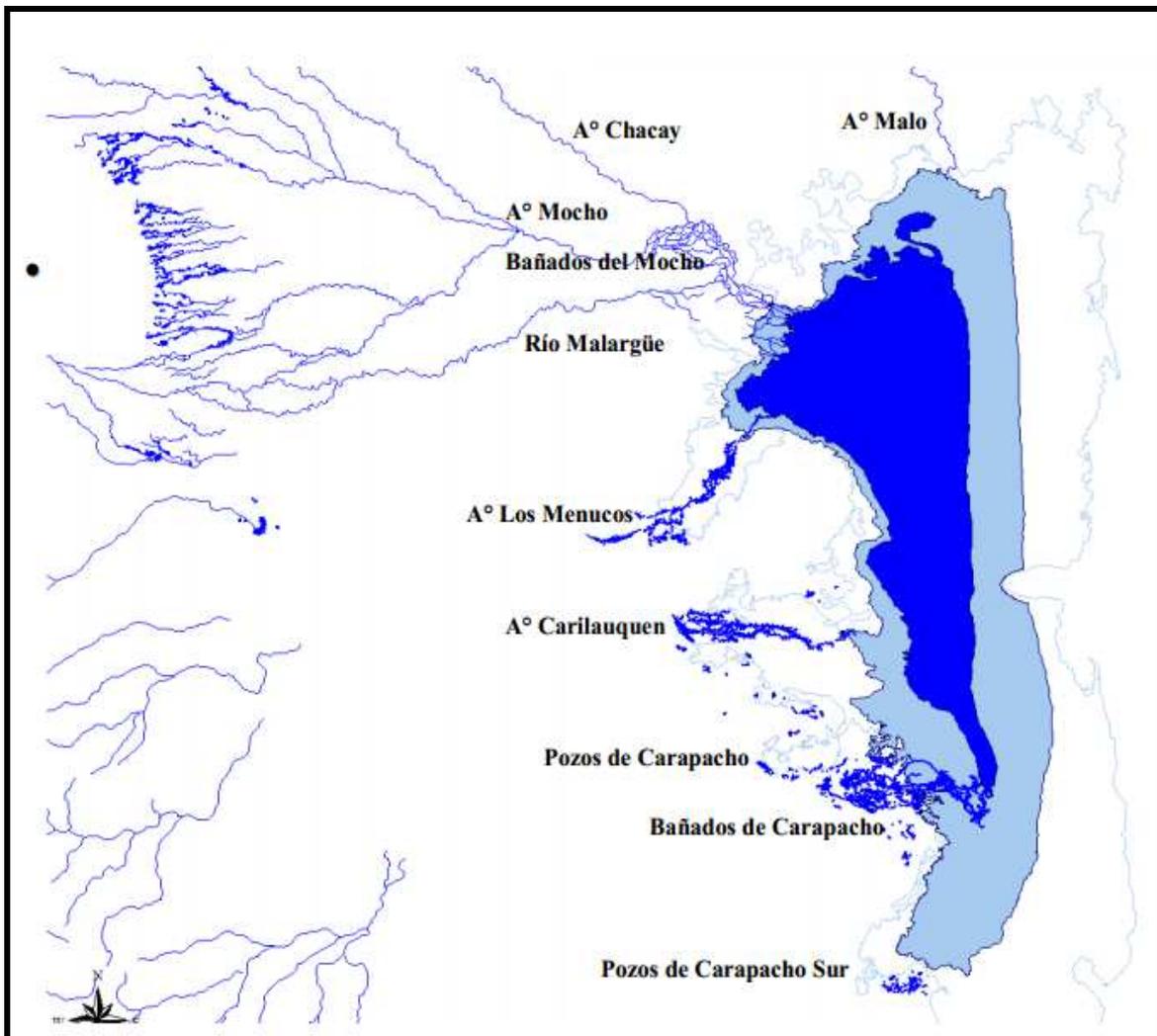


Figura 27: Principales tributarios de la laguna Llanquanelo (Fuente: Fulginiti, 2013)

Arroyo El Chacay

El arroyo El Chacay, es el desagüe de la sierra de las Aguadas y de Alguarás; corre en sentido noroeste-sureste y parte al este hasta diseminarse en unos extensos bañados,

quedando, no obstante, su curso, para unirse con los arroyos Álamo y Mocho antes de entrar a la laguna de Llanquanelo.

Los arroyos Brea, Pequenco y Durazno son tres arroyos secos, que se juntan al norte de la población de Malargüe, a unos 3 km y se pierden en los bañados que quedan al sur del arroyo Chacay.

Arroyo El Álamo

El arroyo del Álamo está formado por los arroyos de Mallín Largo, Manzanos y Antillón, que vienen desde los cerros del oeste (Nucos, Rodeo Viejo, Corrales y del Medio). Corre con ligera dirección sudeste y, al naciente de la estancia El Chacay, recibe por su izquierda al arroyo Alamillo, cuyo cauce corre paralelo al del Álamo, pero al norte. Se junta luego su cauce con el del arroyo Chacay ya descrito.

Arroyo Mocho

El arroyo Mocho viene de la Pampa del Álamo y parece ser un antiguo cauce del Salado. Se confunde con los desagües de riego de este último río y corriendo en franca dirección sudeste, hasta unirse con el arroyo Chacay y caer juntos a la laguna.

Arroyo Malo

El arroyo Malo: también parece haber sido un antiguo cauce del Salado. Tiene su origen muy cerca del mismo, corre paralelo al Salado y luego al Atuel (a unos 2 km) y al llegar a puesto Arroyo Malo, toma hacia el sudeste para caer en el borde norte de la laguna.

Tanto el arroyo Malo como el Mocho son alimentados por cuencas superficiales, por aguas de “revenimiento” o lagunas vinculadas al nivel freático y muy probablemente en forma subterránea por los ríos Salado y Atuel.

Arroyo Menuco

En el contacto de los basaltos con los sedimentos finos del borde occidental, sur y sureste de la laguna, el agua subterránea brota a la superficie generando manantiales que se conocen como Menucos. Este arroyo se origina en dichos surgentes tomando el nombre de los mismos.

Arroyo Carilauquen y Carapacho

Estos arroyos se originan como consecuencia de la surgencia del agua subterránea, siendo esta el área de descarga de la cuenca hidrogeológica vinculada a rocas volcánicas. Dependiendo de la época del año, estos cursos de agua, alimentados por surgencias subterráneas, no siempre llegan a desaguar en la laguna. Por ejemplo, el arroyo Carilauquen normalmente se infiltra o se evapora antes de llegar al perillago.

En la zona del Bloque de Concesión de Llanquanelo, la caracterización de la hidrología superficial se puede dividir en dos partes bien definidas por el relieve. En la zona periférica y hacia el oeste, la existencia de pendientes moderadas posibilita el desarrollo de una red de drenaje superficial definida. En el área central del yacimiento y llanura de inundación de la laguna, la escasa pendiente y precipitaciones no permiten el desarrollo de una red de drenaje importante fuera de los límites de los bañados. Esta situación en un ambiente salino y la existencia de microrelieves favorecen el drenaje impedido y la formación de bajos más húmedos o inundados.

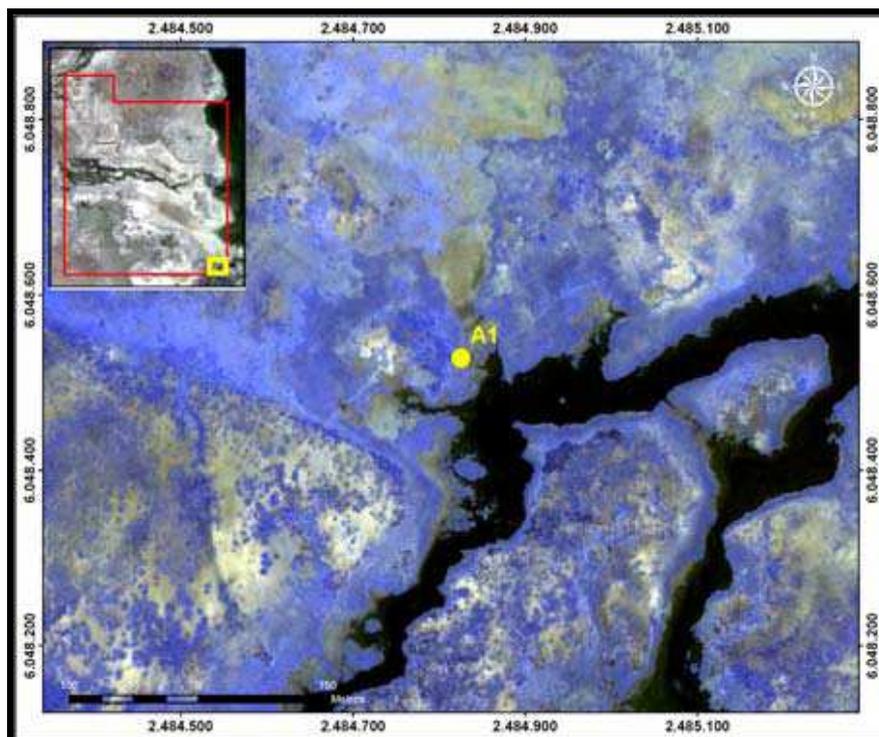


Figura 28: Arroyo Carapacho ubicado sobre el Esquinero Sureste del Bloque de Concesión. (Fuente: YPF, 2009)

Hacia la laguna, vierten sus aguas los bañados del Carilauquen, Los Menucos y Carapacho. Desde sus nacientes dan origen cada una de ellas a cursos superficiales donde se ha desarrollado una abundante vegetación acuática, que sumada a la escasa pendiente determinan un flujo de régimen prácticamente laminar hacia la laguna Llanquanelo.

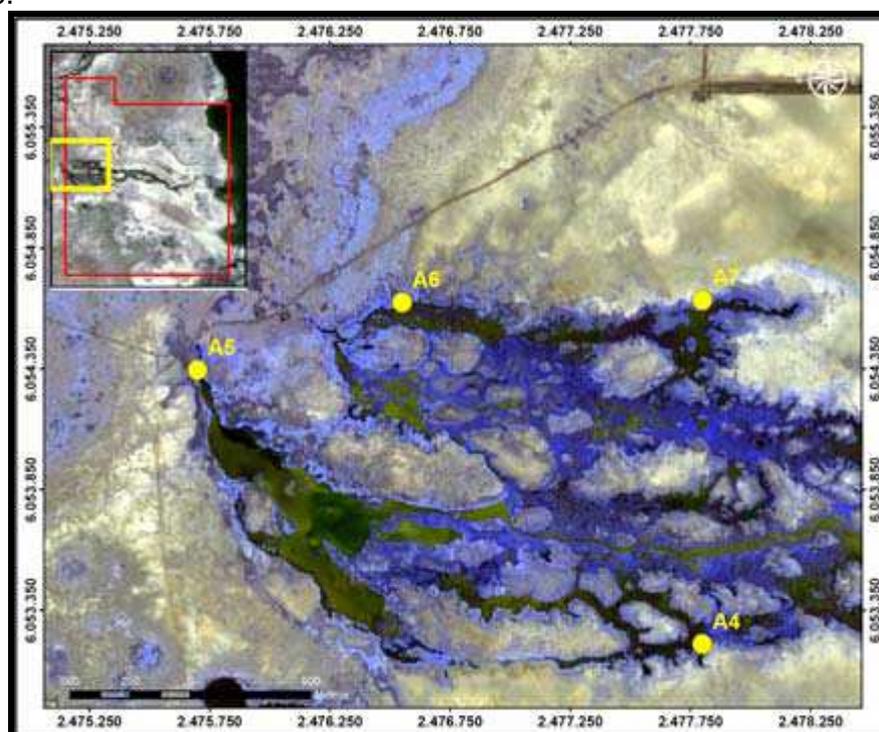


Figura 29: Naciente del Arroyo Carilauquen ubicado en el sector central del Bloque de Concesión. (Fuente: YPF, 2009)

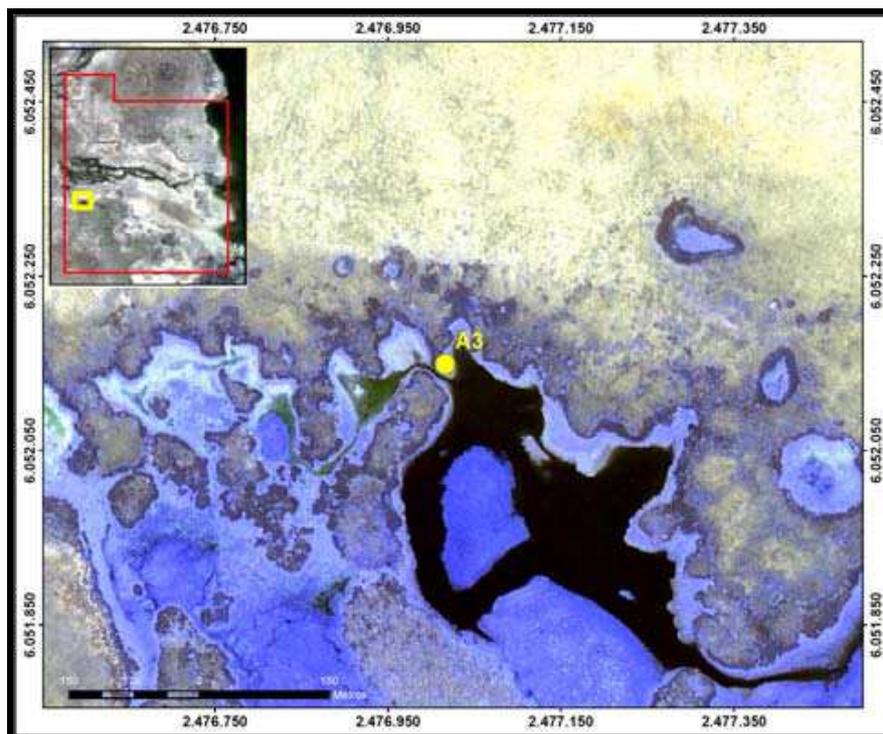


Figura 30: Bajo de disolución ubicado en el margen derecho del Arroyo Carilauquen. (Fuente: YPF, 2009)



Figura 31: Vista de los bañados del Carilauquen.



Figura 32: Panorámica de los Bañados Los Menucos.

2.8. HIDROGEOLOGÍA

En general, las cuencas hidrogeológicas de la provincia de Mendoza responden a un esquema que puede sintetizarse de la siguiente forma (Fulginiti, 2013):

Base impermeable o semipermeable de los acuíferos: constituida por sedimentos continentales del Terciario Superior, que por su litología, compactación y consolidación han perdido o reducido su permeabilidad primaria.

Formaciones acuíferas: constituidas por sedimentos de origen fluvial que durante el proceso de transporte y depositación se han ido clasificando por tamaño, de mayor a menor, desde la zona apical de la cuenca a la zona distal. Así se encuentran preferentemente materiales gruesos, como cantos rodados, gravas, gravillas y arenas gruesas en los conos de deyección, y predominancia de materiales más finos, como arenas finas, limos y arcillas, a medida que se produce un alejamiento en la llanura. Como consecuencia de ello, las permeabilidades también varían, disminuyendo coincidentemente con la disminución del diámetro de los sedimentos. En todas las cuencas mencionadas, también productos del proceso de clasificación en la depositación, se encuentran formaciones acuíferas libres, semiconfinadas y confinadas.

Circulación del agua subterránea: se desarrolla a partir de las zonas de mayor recarga (acuíferos libres) coincidentes en su mayor parte con las zonas proximales de los conos de deyección originados por los cursos de agua superficial, acompañando la pendiente topográfica del terreno hacia las zonas más bajas y de descarga natural. Todos los ríos tienen sus fuentes en la Cordillera y sus caudales discurren para desembocar en la llanura, bajo cuya superficie se desarrollan cuencas sedimentarias modernas que constituyen los reservorios para el agua subterránea.

Particularmente en la cuenca de la laguna de Llanquanelo dos grandes grupos de unidades litoestratigráficas se pueden diferenciar según su comportamiento hidrogeológico: el Basamento y la Cubierta Sedimentaria Inconsolidada (UNC, 2013 a):

Basamento: compuesto por rocas precámbricas, paleozoicas, mesozoicas y terciarias, de orígenes ígneo, metamórfico, efusivo y las sedimentas continentales y marinas, que por su diagenización y compactación han perdido su capacidad primaria de permitir el paso de los fluidos.

El Basamento aflora principalmente en la Cordillera, en el Bloque San Rafael, en las Sierras de Palauco, de Chachahuén, y conforman además el extenso campo lávico de la Payunia. Se encuentra este tipo de rocas aflorando en la franja existente entre el Bloque San Rafael por el Este y la Laguna Llanquanelo por el Oeste. (Figura 33- Sectores A y B).

Cubierta sedimentaria inconsolidada: responden a la misma los conos y planicies aluviales elaboradas por ríos y arroyos, es decir, las áreas compuestas por materiales que poseen permeabilidad primaria y que conforman los acuíferos más importantes.

Conos: en el flanco Este de la cordillera, se encuentran los conos de los ríos Atuel-Salado, que engranan lateralmente con los producidos por los Arroyos del Álamo, Alamito, Chacay y por el Río Malargüe. Están conformados por gravas gruesas, medianas y finas, intercaladas con arenas y escasos lentes de arcillas y limos, poseen las mejores condiciones de permeabilidad. Sus bordes orientales están nítidamente marcados por el comienzo de las zonas de descarga.

Los depósitos de la planicie aluvial se extienden a continuación de los conos aluviales y están conformados por sedimentos de menor granulometría.

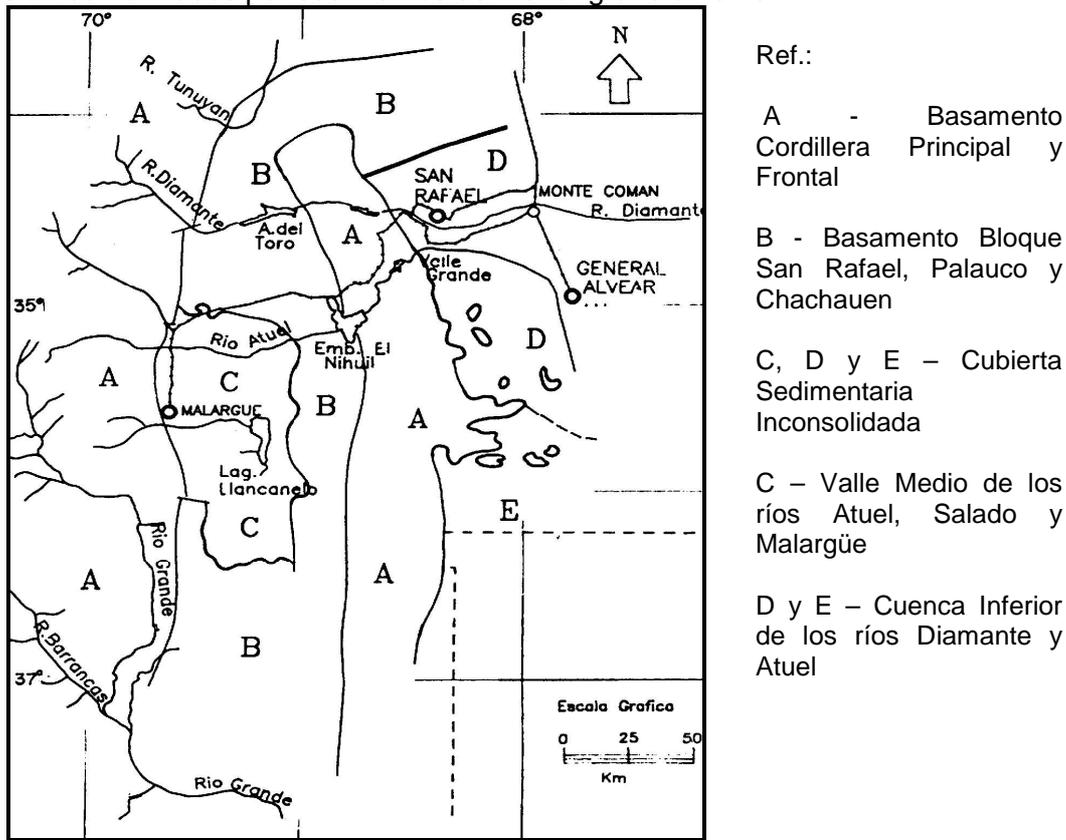


Figura 33: Esquema Hidrogeológico de la Zona Sur de Mendoza (Fuente: Corte y Grosso, 1993)

Por el menor tamaño y las unidades estructurales que contienen la región existe relativo consenso en relación a los límites de la cuenca subterránea de la laguna Llanquanelo. En principio, por las formaciones geológicas que conforman la divisoria hidrográfica de la cuenca, podría interpretarse que la misma está cerrada y que los flujos subterráneos que pudieran salir de ella son nulos o muy bajos (Wetten et al, 2010).

Según el trabajo realizado por el Plan Director de Ordenamiento de Recursos Hídricos de la Cuenca del río Malargüe (DGI, 2008), la cuenca de agua subterránea de los ríos Malargüe, Atuel y Salado o cuenca de Llanquanelo limita por el oeste con la Cordillera Principal (Bloque de la Cordillera Frontal), hacia el este con los afloramientos terciarios del Bloque de San Rafael, por el sur la cuenca está cerrada por las sierras de Palauco y por el norte su límite lo determina la presencia de sedimentitas terciarias.

Los principales acuíferos de esta cuenca hidrogeológica se encuentran en la cubierta sedimentaria inconsolidada que se ha formado principalmente por los productos de la erosión realizada por los ríos Atuel, Salado, Malargüe y sus afluentes.

Los sedimentos, transportados y depositados al salir de la montaña en la Depresión de los Huarpes en el Valle Medio de estos ríos, originaron en la cabecera de los cauces conos aluviales coalescentes en abanico, pasando con el cambio de gradiente topográfico a llanura de inundación fluvial (Abraham, 2000).

El gradiente topográfico que regula la distribución y clasificación del material, dio origen en la zona proximal a sedimentos de grano grueso en todo su desarrollo vertical,

conformando acuíferos que se comportan como libres. Esta zona es el área principal de recarga de la cuenca.

A partir de la culminación de los conos y la disminución del gradiente, también disminuye la granulometría de los sedimentos, que se produce como consecuencia del cambio de velocidad y pérdida de capacidad de transporte fluvial. Estos depósitos dan origen a la existencia de niveles impermeables y a la formación de acuíferos semiconfinados y confinados.

La cubierta sedimentaria se encuentra dispuesta sobre un basamento compuesto por rocas precámbricas, paleozoicas, mesozoicas y terciarias, de orígenes ígneo, metamórfico, efusivo y las sedimentos continentales y marinas, que por su diagenización y compactación han perdido su capacidad primaria de permitir el paso de los fluidos. Ese basamento aflora principalmente en la Cordillera, en el Bloque San Rafael y en las Sierras de Palauco. Salvo algunos sondeos realizados en las proximidades de la ciudad de Malargüe, no se han efectuado hasta el presente estudios geológico-geofísicos sistemáticos que permitan definir sus aspectos geométricos. Se estima, sin embargo que el espesor de la cubierta supera los 1000 m hacia el Sureste de la cuenca.

Superficialmente existe una divisoria de agua, entre el sector de influencia de los ríos Atuel - Salado y el sector del río Malargüe y de la Laguna de Llanquanelo, que es poco perceptible y que subterráneamente es probable que no exista (Figura 35). Sin embargo, si bien las direcciones del flujo de las aguas subterráneas son en general de Este a Oeste, al Sur de la mencionada divisoria de aguas superficiales, las aguas subterráneas procedentes de la recarga en los depósitos sefíticos pedemontanos, convergen hacia la Laguna de Llanquanelo acompañando el recorrido de los cauces superficiales en la dirección de la pendiente natural del terreno. Al Norte de la línea divisoria de aguas superficiales el flujo se dirige hacia el Noreste en dirección al dique embalse El Nihuil.

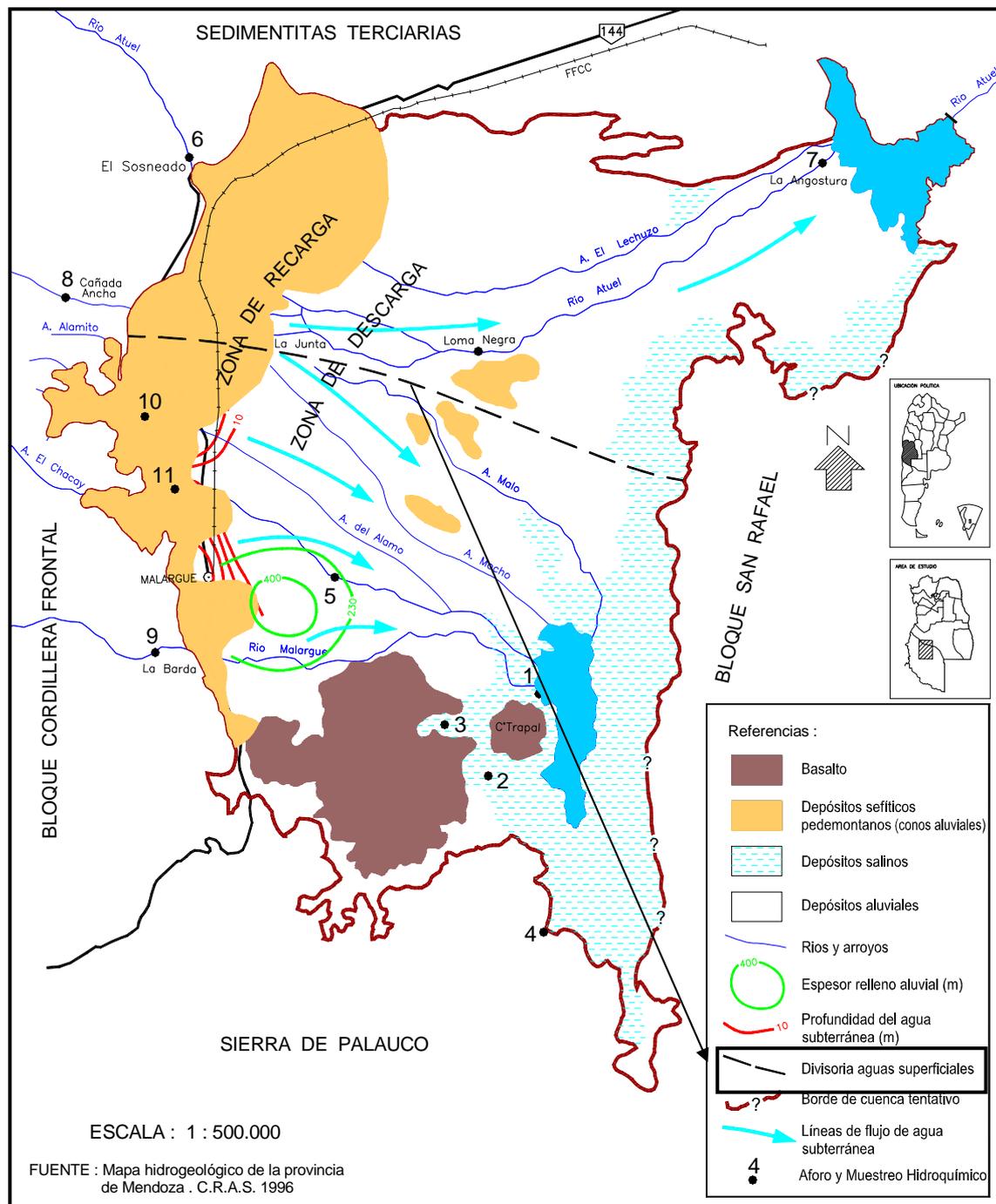


Figura 34: Esquema Hidrogeológico – Cuenca de los Ríos Atuel, Salado y Malargüe (Fuente: Mapa Hidrogeológico de la provincia de Mendoza, C.R.A.S., 1996).

Dentro de la extensa cuenca en análisis, se distinguen dos sectores claramente diferenciados. Un sector vinculado a los depósitos terciarios y cuaternarios, tanto de piedemonte como aluviales, con su área de aporte superficial en la zona montañosa, y un sector vinculado a las áreas volcánicas. En términos generales, el primero comprende la parte norte de la cuenca y el segundo, la parte sur. A continuación se analizarán ambos sectores en forma separada (Fulginiti, 2013).

SECTOR NORTE

De acuerdo con datos recabados en la zona y la información de diversos autores, la cuenca subterránea vinculada a este sector es alimentada en parte por los ríos Atuel, Salado, Malargüe y arroyos menores, además de las infiltraciones que sufren estos cuerpos de agua durante su trayecto.

A criterio de estos autores, las infiltraciones de los ríos Atuel y Salado aportan subterráneamente a la cuenca por el extremo noroeste y se producen en la zona de La Junta.

En las imágenes satelitales, expuestas en la sección 2.4: Geomorfología, se puede ver cómo a partir de revenimientos vinculados a ellos, se generan afluentes, como los Arroyos Malo y Mocho que nacen en la parte distal del cono aluvial del río Salado. Éstos canalizan los drenajes infiltrados de estos dos ríos y llegan a la laguna.

La zona de recarga de la cuenca subterránea se encuentra en el sector ubicado al pie de la cordillera, donde se encuentran los depósitos psefíticos inconsolidados, que dieron origen a los conos aluviales con forma de abanico. Aquí se depositan los sedimentos de granulometría más gruesa, característica que se extiende a todo el perfil vertical del depósito. Estos materiales poseen valores altos de permeabilidad y porosidad primaria, lo que favorece la formación de acuíferos libres. Estos acuíferos tienen la capacidad de almacenar agua y transmitirla a los materiales circundantes.

El límite oriental de estos conos es el comienzo de la zona de descarga. En el sector comprendido al norte del río Malargüe, en forma adyacente a los conos aluviales se encuentra una zona de descarga parcial. Esta zona se denota por la existencia de una cadena de pequeñas lagunas, de las cuales salen pequeños arroyos que drenan sus aguas en dirección este, perdiéndose, en los depósitos aluviales circundantes. Esta descarga parcial está vinculada a un marcado cambio de pendiente de la superficie del terreno.

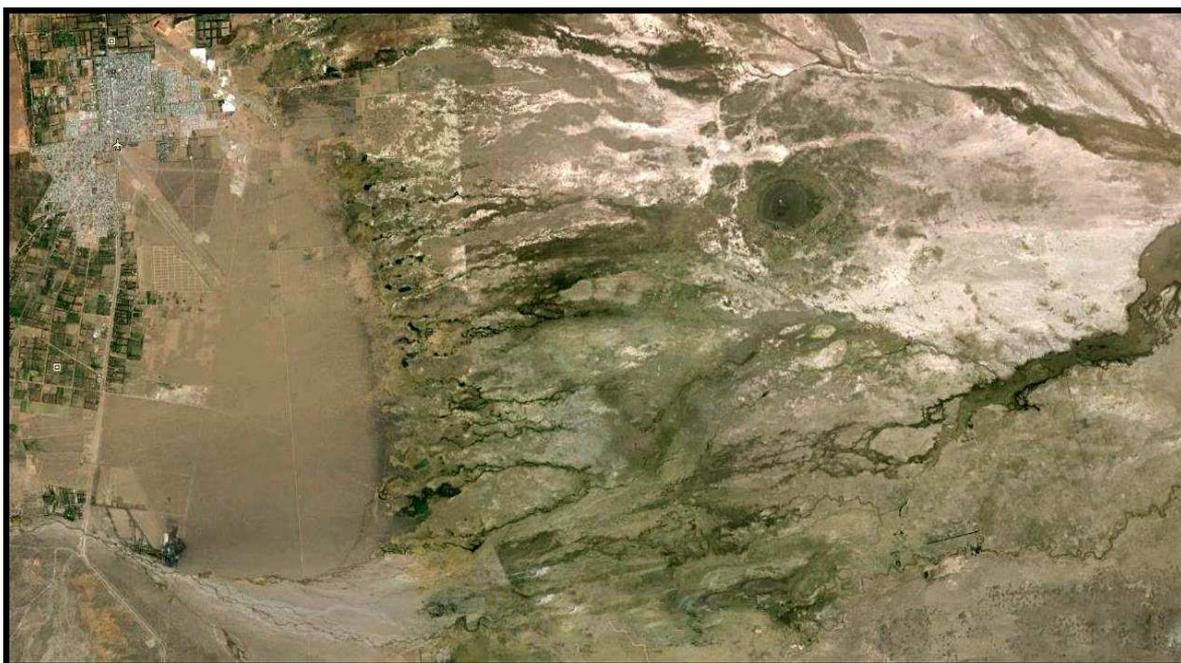


Figura 35: Sector norte del Río Malargüe, zona de descarga parcial.

La zona de descarga principal en esta cuenca, se encuentra en la transición a la llanura pedemontana, donde aflora en forma de bañados circundantes al cuerpo de agua principal (laguna Llanquanelo), en el borde occidental de la misma. Este límite es definido además por la presencia de vegetación de freatófitas que revelan la poca profundidad a la que se encuentra la capa freática.

Aguas abajo de este sector aparecen depósitos evaporíticos, bordeando el cuerpo de agua de la laguna, como consecuencia de la fluctuación del nivel freático. Así se produce una importante descarga por evaporación o evapotranspiración.

En la Cuenca hidrogeológica de Llanquanelo, el flujo de agua subterránea se desplaza de regiones con cargas hidráulicas mayores hacia regiones de cargas hidráulicas menores, en forma concordante con la topografía del lugar. Siguiendo una dirección generalizada oeste-este o noroeste-sureste. Por otro lado, los flujos de agua subterránea provenientes de las pequeñas cuencas sedimentarias del este, se desplazan en cambio, en dirección este-oeste.

La pendiente general de todo el sector norte es del orden del 0,15 al 0,2 %, con sectores en los cuales ésta pendiente es aún menor. El nivel piezométrico del acuífero libre acompaña a la superficie del terreno y en términos generales es menor a los 3 m de profundidad. Esto permite determinar que el nivel de agua de este acuífero tiene un gradiente mínimo. Este bajo gradiente y los sedimentos que tienden a hacerse más finos hacia la laguna, determinan la lentitud de la escorrentía subterránea en el sector y los caudales relativamente bajos aunque muy importantes para la vida de la laguna cuando faltan los aportes superficiales.

El área de recarga queda definida entonces por el sector donde se encuentran los conos aluviales, compuestos en su mayor parte por rodados y arenas; son depósitos inconsolidados y con escasa cementación lo que le confiere elevados valores de porosidad primaria. Estos valores de porosidad varían entre un 40% y 10%. Estos depósitos, presentan además, una buena capacidad para transmitir el fluido a los materiales circundantes, su permeabilidad varía entre 100 m/día en gravas y 0.1 m/día en limos.

Al sur del río Malargüe la zona de recarga se encuentra adyacente a los depósitos volcánicos, en los cuales se observan también sectores con depósitos aluviales, debido al transporte de materiales que realizan los cursos de agua.

La cercanía del acuífero libre a la superficie en la zona baja, la existencia de importantes sectores con agua "revenida", la lentitud de la escorrentía subterránea por la baja transmisividad y la presencia de vegetación freática en las áreas inundadas y húmedas, hacen que la evaporación y la evapotranspiración sean significativas desde el punto de vista del balance general.

SECTOR SUR

Durante el Terciario y el Cuaternario se produjo la deposición de materiales sedimentarios y posteriormente la efusión de lavas volcánicas basálticas sobre este substrato. La alternancia de materiales volcánicos con sedimentarios favorece la formación de acuíferos semiconfinados y confinados. Esta alternancia le confiere cierta permeabilidad al sector.

Los acuíferos semiconfinados son los que se encuentran limitados en su parte superior por un acuitardo y en su porción inferior por un acuitardo o acuitado, en cambio a los

acuíferos confinados le subyacen o sobreyacen material geológico de conductividad hidráulica baja. En este caso las coladas basálticas podrían actuar como niveles relativamente impermeables. Las sedimentitas terciarias depositadas en la base también pueden actuar como base impermeable o semipermeable, debiéndose esto a la compactación y consolidación que sufrieron después de su deposición, reduciendo su permeabilidad primaria. Esto determina la posible existencia de acuíferos confinados y semiconfinados de granulometría gruesa (Reyna et al., 2009).

Según la bibliografía, dentro de las rocas volcánicas, los basaltos son los acuíferos más productivos. Las rocas basálticas en la naturaleza poseen valores de porosidad que varían entre un 1 % y 10 % si son rocas masivas, y entre un 10 % y 50 % si están fracturadas.

La permeabilidad en rocas basálticas es altamente variable y depende principalmente de los siguientes factores: del espesor del flujo; del enfriamiento que sufre el flujo de lava, el cual se acelera cuando entra agua al sistema generando los "Pillow basaltos", que presentan numerosos espacios abiertos interconectados; además depende del número y características de las zonas de interflujo, y del diaclasamiento o fracturamiento generado por el enfriamiento rápido de la lava, esta fracturación es lo que le confiere a estos depósitos su alta permeabilidad, entre otras cosas.

De acuerdo a los antecedentes con que se cuenta, es bastante probable que en los depósitos basálticos del sector en estudio la mayor conductividad hidráulica y permeabilidad, se encuentre en dirección paralela a la dirección del flujo de lava. Esto se da en los sectores libres de volcanes (porción noroccidental). En presencia de los mismos, aumenta la formación de diques, los que entorpecen por cortar en sentido perpendicular a los flujos de lava y dificultan el paso del flujo, disminuyendo su conductividad hidráulica y su permeabilidad (porción centro y suroccidental).

Desde el punto de vista de la recarga de estos acuíferos, se debe considerar la propia infiltración de agua de lluvia en el área basáltica cuya superficie es significativa. Además, entre la zona cordillerana y la zona compuesta por rocas basálticas, existen cuencas endorreicas que forman pequeños cuerpos de agua en sedimentos arenosos y que tienden a evaporarse o infiltrarse.

Si se tienen en cuenta estos antecedentes (materiales basálticos fracturados sobreimpuestos a una columna estratigráfica de materiales gruesos), además de las características topográficas y la conformación areal de las cuencas implicadas, se puede considerar que existen elementos suficientes para la existencia de acuíferos importantes desde el punto de vista volumétrico.

En el contacto de los basaltos con los sedimentos finos del borde occidental, sur y sureste de la laguna, el agua subterránea brota a la superficie generando manantiales que se conocen como Menucos. Este proceso se observa aún en épocas de sequía y probablemente su formación se deba a que el nivel piezométrico del agua libre se encuentra por encima del terreno y actúa como un surtidor natural de agua subterránea dulce. Este fenómeno probablemente también se dé porque el nivel de agua dulce se encuentra colgado sobre un nivel de agua salada vinculado a la laguna o a que los sedimentos finos del área de contacto con el basalto favorecen a la tubificación y la consecuente surgencia.

Como se indicó en anteriormente el agua subterránea alimenta a la laguna de Llanquanelo a través de los surgentes en los bañados, las conexiones del subálveo del Río Atuel y aportes distribuidos en las líneas de costa.

Según el Informe Preliminar y Estacional Invierno de YPF, en el cual la dinámica del agua subterránea ha sido analizada en detalle en algunos sitios mediante perforaciones y mediciones, se ha encontrado al menos dos niveles de agua subterránea, presentando el acuífero inferior un nivel piezométrico superior que el acuífero libre. Esto permite las surgencias en los bañados.

Esta agua proviene de la infiltración del agua de lluvia, del agua de deshielo y de la escorrentía superficial que se infiltra en las rocas y sedimentos permeables de la cuenca.

La escorrentía general del área es de Oeste a Este.

En el área del yacimiento se han observado surcos de escorrentía locales asociados a la presencia de caminos y a huecos de disolución. Este último proceso es de suma importancia en la formación de pozos que luego evolucionarán a bajos de disolución.



Figura 36: Surcos de escorrentía locales asociados a la presencia de caminos y a huecos de disolución.

Las fluctuaciones de nivel del acuífero freático junto con el lento movimiento del agua subterránea son las responsables de la disolución de las sales presentes en los sedimentos de la planicie generando hundimientos locales y pozos de disolución.



Figura 37: Vista de un pozo “volcán” generado por la disolución por escorrentía subterránea. La napa freática se encuentra a 43 cm de profundidad.

Esta dinámica también genera los llamados “volcanes” aunque más asociados a la disolución por escorrentía subterránea que superficial, ya que en estos sitios los hundimientos se producen sin presencia de escorrentía superficial.

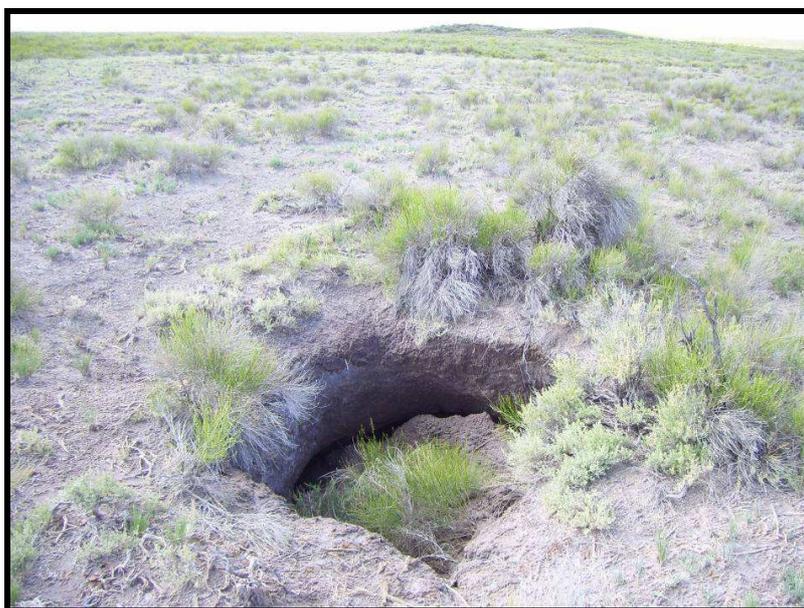


Figura 38: Hundimiento del suelo generado por la disolución del mismo dado por la escorrentía subterránea.

En la siguiente figura, obtenida de YPF: Manifestación General de Impacto Ambiental: Información Complementaria, se observa que el Bloque de Concesión se encuentra dentro del área de descarga, prácticamente en su totalidad.

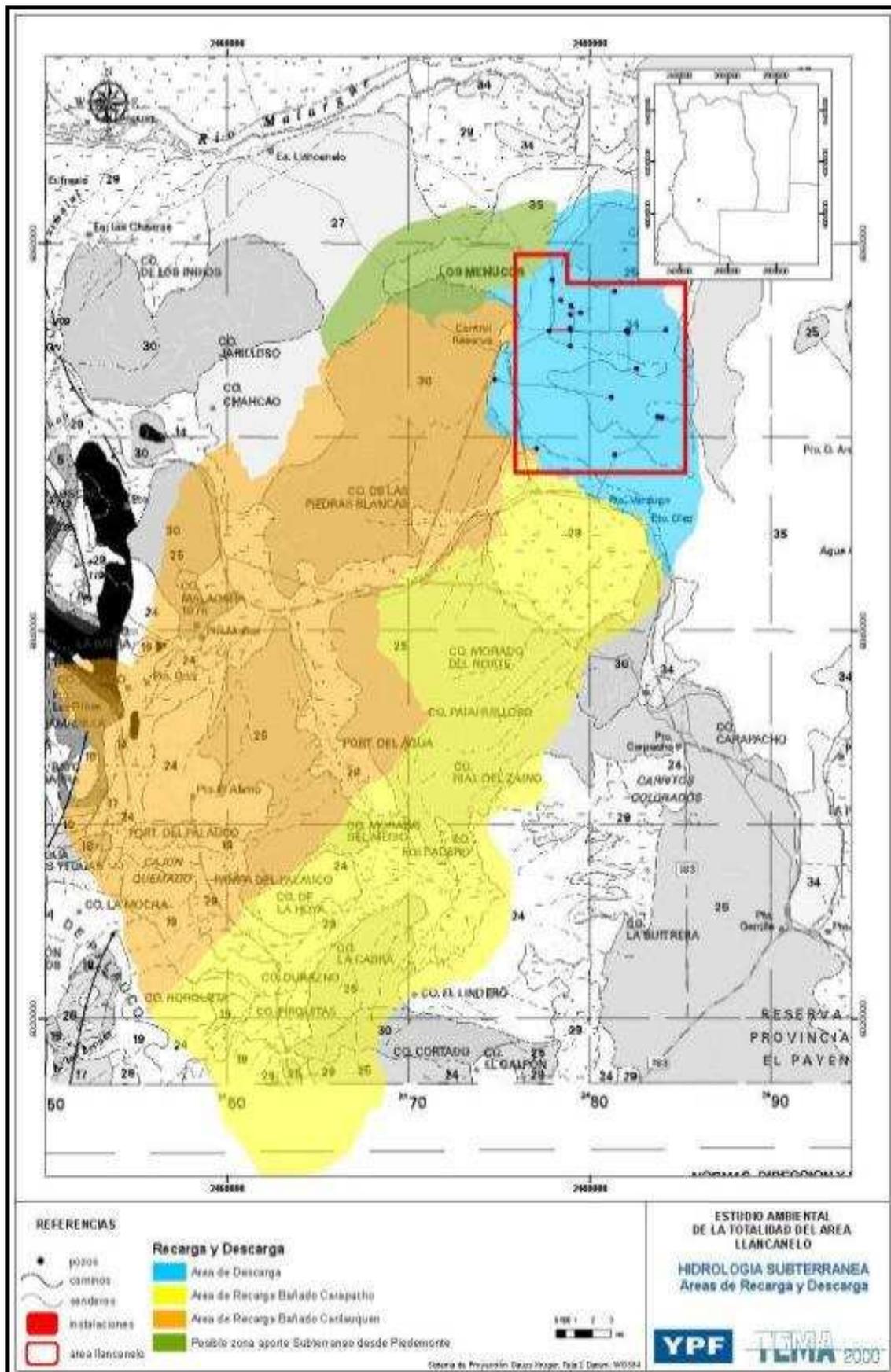


Figura 39: Zonificación en áreas de recarga y descarga (Fuente: YPF, 2009).

2.9. PERFORACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO

La siguiente tabla resume las coordenadas de ubicación de los pozos existentes en el área de concesión. Su ubicación dentro del área de concesión Llanquanelo se muestra en la Figura 41 (YPF, 2009).

Tabla 5: Coordenadas de ubicación de las bocas de pozo existentes en el área de concesión.

Pozos	Coordenadas Posgar 94		Estado
	X	Y	
YPF.Md.NLL-2001h	6056772	2478976	Productor
YPF.Md.NLL.x-5	6055503	2478918	A abandonar
YPF.Md.NLL.e-6	6055483	2477780	A abandonar
YPF.Md.NLL-14	6055599	2478917	Productor
UO.Md.NLL-1006	6058100	2477899	Productor
UO.Md.NLL-1007	6056439	2479495	Productor
YPF.Md.NLL-1	6051234	2483624	Sin datos
UO.Md.NLL-1001	6055501	2482079	A abandonar
UO.Md.NLL-1004	6053544	2482574	Abandonado
UO.Md.NLL-1005	6055394	2482071	A abandonar
YPF.Md.NLL.e-7	6056297	2478911	A abandonar
YPF.Md.NLL-2	6051144	2483174	Sin datos
YPF.Md.NCoH.x-2	6049413	2477087	Sin datos
UO.Md.NLL-1003	6056744	2478974	Productor
YPF.Md.NLL.a-9	6052043	2481197	A abandonar
UO.Md.NLL-1008	6057050	2478445	Sin datos
YPF.Md.NLL.e-8	6054699	2478926	Sin datos
YPF.Md.NLL.a-11	6058100	2477960	Sin datos
YPF.Md.NLL.e-13	6055502	2484198	Sin datos
YPF.Md.NLL.a-12	6049054	2481347	Sin datos
UO.Md.NLL-1002	6057545	2481374	Sin datos
YPF.Md.NLL.a-10h	6055495	2481988	Sin datos
YPF.Md.NLL.es-1	6055565	2481802	Fuera de servicio
YPF.Md.NLL.es-2	6051002	2483861	Abandonado
Pozo de Agua N° 2	6054585	2475954	En servicio

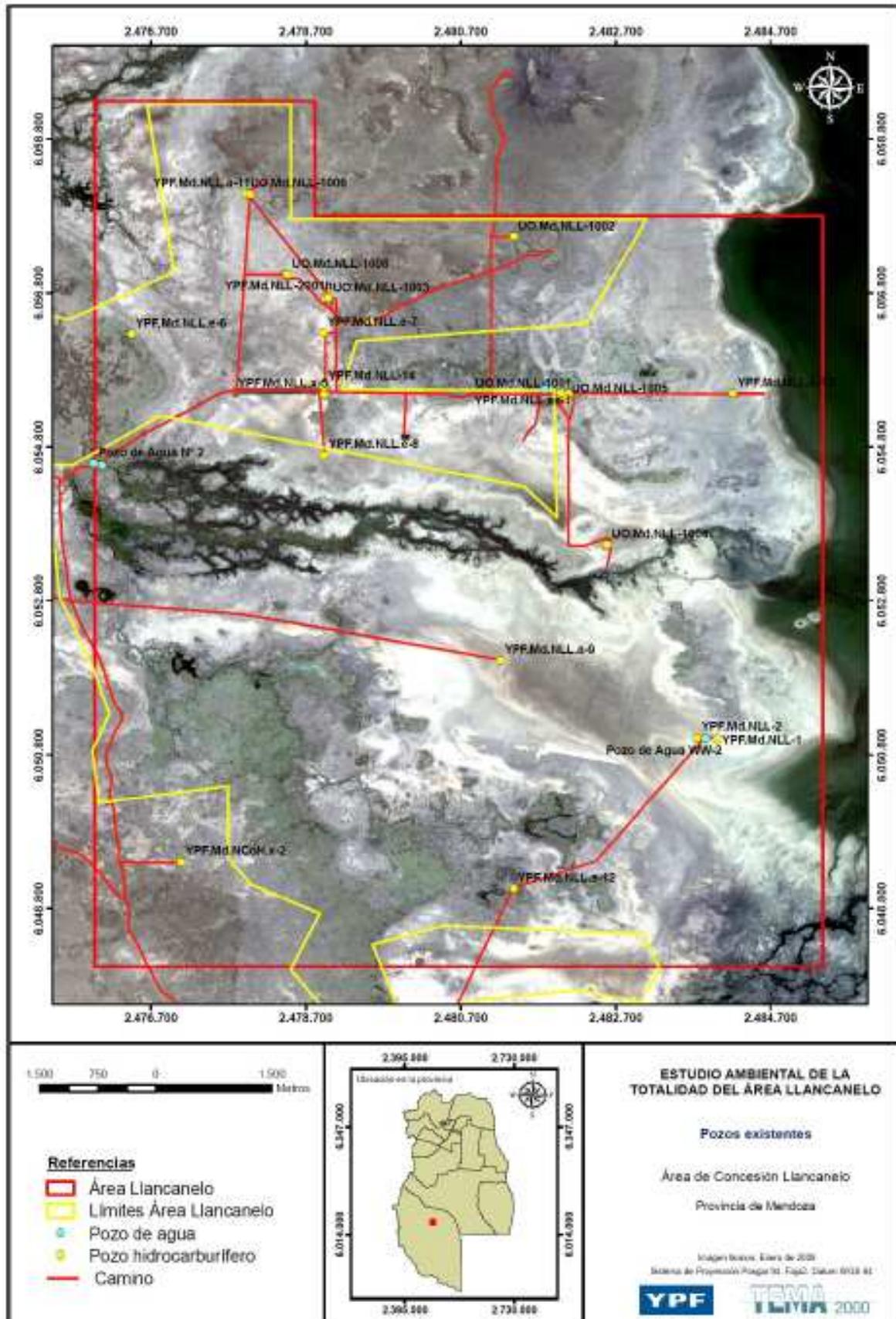


Figura 40: Pozos existentes dentro de área de concesión Llanquanelo (Fuente: YPF, 2009)

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA – CONCEPTOS DE BASE

3.1. ESTUDIO DE VULNERABILIDAD

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos que estén por encima de las normas de utilización del agua (Auge, 2004).

La vulnerabilidad de un acuífero frente a la contaminación del agua subterránea es una propiedad del acuífero cualitativa, relativa, no medible y adimensional. La exactitud de la evaluación de la vulnerabilidad depende, sobre todo, de la cantidad y calidad de los datos, de su fiabilidad y representatividad. De forma genérica, el cálculo de la vulnerabilidad de un acuífero se puede realizar cualitativamente, estableciendo una categorización, por ejemplo, vulnerabilidad muy alta, alta, media, baja.

Los estudios de vulnerabilidad de acuíferos ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea. El uso de mapas de vulnerabilidad permite evaluar la magnitud del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en diferentes sectores de la misma ante la presencia de diversas actividades humanas.

La integración de la protección de las aguas subterráneas mediante mapas de vulnerabilidad en la zonificación o caracterización del territorio de una cuenca hidrográfica, además de ser una herramienta de ayuda en la ordenación de los vertimientos potencialmente contaminantes, podrá utilizarse asimismo en la aplicación de medidas contra la contaminación y en la elaboración de planes de manejo de acuíferos y de ordenación del territorio.

3.1.1. Definiciones

Según Auge (2004) existen muchas definiciones del concepto de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, en la actualidad existen dos grandes corrientes:

Aquellas que no tienen en cuenta la incidencia de la sustancia contaminante solo consideran las propiedades del medio como por ejemplo tipo acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc., llamada Vulnerabilidad Intrínseca; y aquellos que además del comportamiento del medio otorgan trascendencia al contaminante como el tipo y carga del mismo, denominada Vulnerabilidad Específica.

El concepto de **Vulnerabilidad intrínseca** se utiliza en trabajos de planificación del territorio y del agua, particularmente en sitios donde no se realizan prácticas que pudieran afectarlo.

La **Vulnerabilidad específica** incluye parcialmente el concepto de riesgo cuando se refiere al peligro de deterioro en relación a sustancias contaminantes específicas.

Diferentes autores definen la vulnerabilidad:

Vrba y Zaporozec (1994): una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales. En esta definición se incluye al sistema subterráneo y al contaminante que puede ser natural o artificial.

Foster e Hirata (1991) expresan que la vulnerabilidad del acuífero a su contaminación representa su sensibilidad a ser afectado por una carga contaminante impuesta.

Custodio (1995) afirma que la vulnerabilidad a la polución, expresa la incapacidad del sistema a absorber las alteraciones tanto naturales como artificiales.

Carbonell (1993) define la Vulnerabilidad a la contaminación como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero. Aquí solo se considera la acción del contaminante.

EPA (Environmental Protection Agency 1991): Hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas.

3.1.2. Riesgo a la Contaminación y Vulnerabilidad:

Existe otro concepto asociado a la vulnerabilidad, el riesgo. A igual que con la vulnerabilidad, existen varias formas de definir este concepto, algunos autores definen al riesgo como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno. Otros lo relacionan a la vulnerabilidad específica como el peligro de contaminación del agua subterránea respecto a un contaminante o familia de contaminantes de características y comportamientos similares (hidrocarburos, plaguicidas, materia orgánica, etc.), (Auge, 2004).

Para aclarar la relación entre ambos conceptos se formula un ejemplo: Un acuífero puede ser poco vulnerable por la dificultad que encuentra el contaminante para ingresar al mismo, pero puede tener alto riesgo si el área tiene una alta carga de contaminante. O por el contrario puede ser muy fácil el acceso del contaminante al acuífero (alta vulnerabilidad) pero de poco riesgo si en el área no hay presencia de contaminantes.

Generalmente en una evaluación de riesgos en una obra civil, como por ejemplo una presa, se presenta el concepto de riesgo o daño como, la destrucción o pérdida esperada obtenida de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo (Spence, 1990).

Esta evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general:

$$R = (A * V)$$

Donde:

A: es la Amenaza o Peligro. La amenaza está relacionada con el peligro que significa la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, de origen tecnológico o provocado por el hombre que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición prefijado. Es importante diferenciar la amenaza, del evento que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de la ocurrencia de un evento con cierto grado de severidad, mientras que el evento en sí mismo representa al fenómeno en términos de sus características, su dimensión y ubicación geográfica.

V: es la Vulnerabilidad definida como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas.

La vulnerabilidad corresponde a la susceptibilidad que tiene un elemento a ser afectado o a sufrir una pérdida. En consecuencia un análisis de vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica.

La mayoría de los diferentes tipos de amenazas, es imposible evitar que ocurran. El enfoque de las políticas de mitigación contra estas amenazas se centra principalmente en reducir la vulnerabilidad de los elementos que tienen más probabilidad de ser afectados.

Los elementos disponibles para la mitigación de desastres se podrían clasificar de la siguiente manera:

Medida estructurales: que son las medidas generadas por obras de Ingeniería y construcción

Medidas no estructurales: que actúan sobre la planificación física, económica, administrativa e institucional y social.

En una obra civil la amenaza normalmente es un evento sobre el cual no se tiene control y lo que cabe hacer es trabajar sobre la vulnerabilidad de los elementos a los cuales este evento afectaría, es decir, el riesgo al cual el sistema está expuesto puede ser reducido trabajando sobre ciertos elementos o procesos de diseño (medidas estructurales).

Cuando se hace referencia al riesgo de contaminación de un acuífero, la protección del mismo se lograría trabajando sobre las causas de la amenaza o reduciendo la misma, ya que normalmente es de origen antrópica. La vulnerabilidad del acuífero es una cualidad natural del mismo, por lo que las medidas de mitigación a implementar serían del tipo no estructurales.

3.2. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD EN UN ACUÍFERO:

En las últimas décadas se ha observado en los países desarrollados un incremento en el interés por la contaminación del agua subterránea, desarrollándose diversos sistemas de evaluación de la vulnerabilidad regional de acuíferos con objeto de elaborar mapas de vulnerabilidad, los cuales ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea y la planificación del usos de la tierra.

La caracterización de la vulnerabilidad es una aproximación cualitativa y no cuantitativa, es decir que tiene un componente subjetivo que afecta el resultado final. Por tanto, dependiendo del método que se utilice, los resultados para un mismo acuífero pueden ser diferentes y su validez es relativa. Así mismo, la selección del método a usar depende de la cantidad, calidad y disponibilidad de información.

Existen cuatro grupos de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación: (1) los métodos de simulación, (2) los métodos estadísticos, (3) los métodos de índices y de superposición y (4) el método de ambientes hidrogeológicos.

1. Modelos de simulación. Usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.

2. Métodos estadísticos. Los métodos estadísticos son utilizados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación observada, las condiciones ambientales observadas que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación. La vulnerabilidad se expresa como probabilidad de contaminación, cuanto más alta es la probabilidad de contaminación, más alta será la vulnerabilidad.

3. Métodos de superposición e índices (o paramétricos). Están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (iV). Para un método n de parámetros P y n factores de ponderación fP , el índice de vulnerabilidad iV se calcula como:

$$iV = \sum_{j=1}^n fP \times P_j$$

Mediante la obtención de este valor iV , y de acuerdo con el método usado, la vulnerabilidad de los acuíferos se clasifica desde baja, media, alta, muy alta hasta extrema.

4. Ambientes Hidrogeológicos. Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

En esta sección se desarrollarán los métodos de índice o paramétricos: DRASTIC, GOD, SINTACS, etc. dado su amplio reconocimiento y utilización. La mayoría de estos métodos evalúan la vulnerabilidad a una carga contaminante puesta en superficie, es decir flujos verticales descendentes.

3.2.1. Método DRASTIC

Desarrollado por Aller et al. en el año 1987 para EPA (Environmental Protection Agency) para evaluar la vulnerabilidad *intrínseca* de los acuíferos. Se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10 de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo **DRASTIC**: **D** (depth to water - profundidad del agua freática) **R** (recharge - recarga neta) **A** (aquifer media- litología del acuífero) **S** (soil media - tipo de suelo) **T** (topography - topografía) **I** (impact of vadose zone- litología de la sección subsaturada) **C** (hydraulic conductivity-conductividad hidráulica del acuífero). El índice 1 indica la mínima vulnerabilidad y el 10 la máxima.

Asimismo a cada variable se le asigna un peso o ponderación, de acuerdo a la influencia respecto a la vulnerabilidad. Para el peso ponderado se emplean índices entre 1 y 5, adoptando el mayor (5) para la profundidad del agua (D) y la litología de la sección subsaturada (I) y el menor (1) para la topografía (T). Ambos índices se multiplican y luego se suman los 7 resultados, para obtener un valor final o índice de vulnerabilidad, cuyos extremos son 23 (mínima) y 230 (máxima), aunque en la práctica el índice dominante varía entre 50 y 200. Tanto este como el resto de los métodos que aquí se mencionan, califican a la vulnerabilidad en forma cualitativa y su mayor utilidad es que permiten realizar comparaciones relativas dentro de una misma región, o entre regiones distintas.

3.2.2. Método SINTACS

Es una derivación del DRASTIC, desarrollado por Civita et al. (1990) en Italia. El acrónimo SINTACS comprende: **S** (soggiacenza -profundidad del agua) **I** (infiltrazione - infiltración) **N** (non saturo -sección subsaturada) **T** (tipologia della copertura - tipo de suelo) **A** (acquifero - características hidrogeológicas del acuífero) **C** (conducibilità - conductividad hidráulica) **S** (superficie topográfica – pendiente topográfica). Este método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un software preparado especialmente para el mismo. A las variables mencionadas, que influyen en la vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso de la tierra.

3.2.3. Método GOD

Este método propuesto por Foster (1987), se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables que son las que nominan el acrónimo: **G** (ground water occurrence - tipo de acuífero), **O** (overall aquifer class - litología de la cobertura), **D** (depth - profundidad del agua o del acuífero). En la figura siguiente (Foster e Hirata, 1991) se reproduce el diagrama para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Los 3 índices que se multiplican entre sí, resultan en uno final (diagrama de salida - output) que puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (mínima).

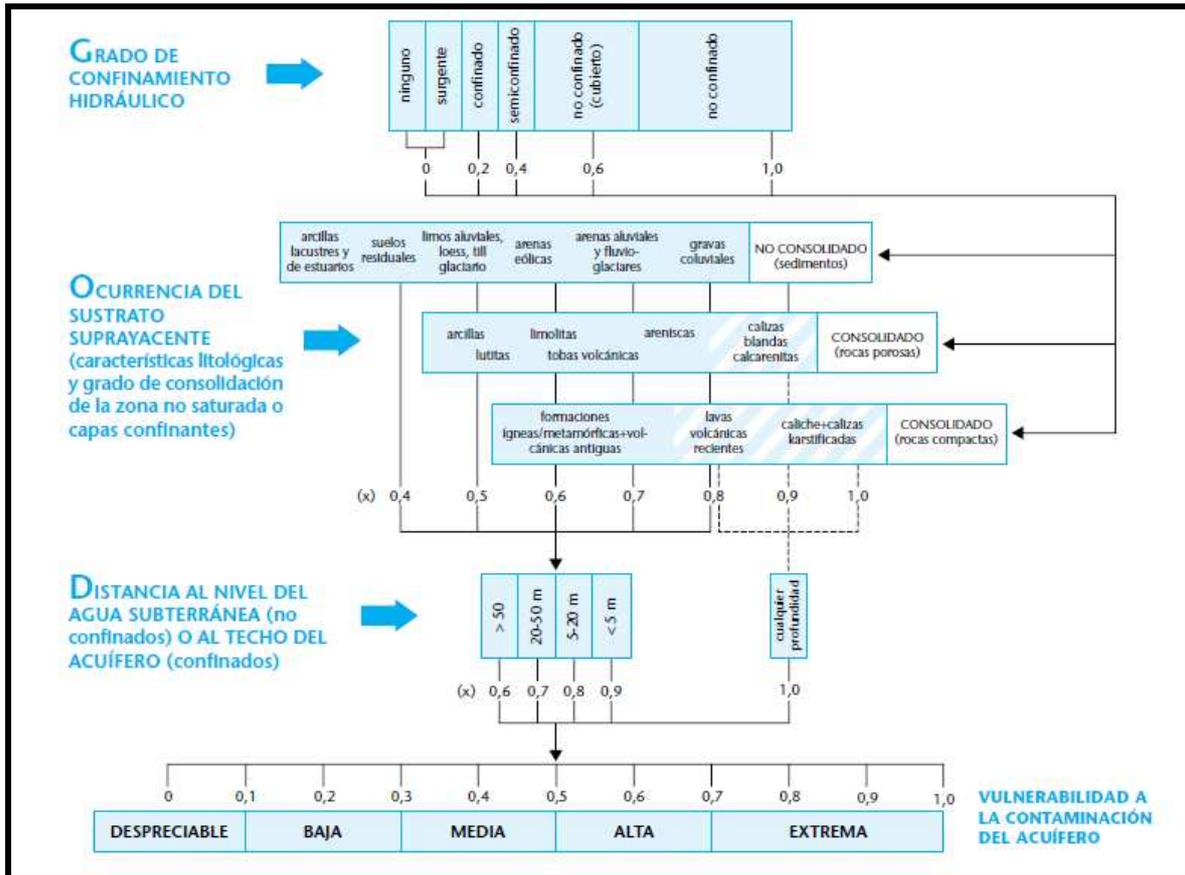


Figura 41: Método GOD, caracterización de los componentes de la vulnerabilidad del acuífero. (Fuente: Auge, 2004)

3.2.4. Método EPIK

Es un método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para acuíferos kársticos. El acrónimo significa: Epikarst (**E**), Protective cover (**P**), Infiltration conditions (**I**), Karst network development (**K**), que son 4 caracteres trascendentes en el flujo y el transporte a través de sistemas kársticos.

El Epikarst (**E**) es una zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad, cercana a la superficie (Tripet et al, 1997), al que se le asignan 3 valores: **E1** corresponde a la red kárstica típica (dolinas, depresiones, cavidades, grutas, etc.); **E2** cuando hay superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos (valles secos, alineación de dolinas, etc.) y **E3** ausencia de morfología epikárstica. El Protective cover (**P**) está formado por el suelo y otros materiales de cobertura como depósitos glaciales, loess, limos aluviales, etc. A este parámetro se le asignan 4 valores (de **P1 a P4**), en función del espesor de la cobertura. El parámetro Infiltration (**I**) es el de más complicada estimación: **I1** se aplica a regiones con vías accesibles para la infiltración directa. **I2 e I3** se emplean para zonas con pendientes topográficas entre 0 y 25%. Contrariamente a otros métodos paramétricos, en éste la vulnerabilidad aumenta con el incremento de la pendiente, que favorece la concentración de la escorrentía en los sitios más karstificados. Al parámetro Karst network (**K**) (red kárstica) se le asigna 3 valores: **K1** para una red kárstica bien desarrollada, **K2** para zonas pobremente karstificadas, **K3** para acuíferos kársticos con descarga en medios porosos, o que presentan fisuración, pero subordinada.

El método incluye 4 factores de ponderación (α , β , γ , δ), aplicables a cada parámetro (EPIK), para valorar su peso relativo en el cálculo del índice de vulnerabilidad intrínseca. Este índice de vulnerabilidad, denominado también factor de protección es:

$$Vi = (\alpha \cdot Ei) + (\beta \cdot Pi) + (\gamma \cdot li) + (\delta \cdot Ki)$$

Vi: índice de vulnerabilidad en el área i

Ei, Pi, li, Ki: valores relativos de los parámetros E, P, I, K

α , β , γ , δ : factores de ponderación correspondientes a los parámetros EPIK.

En la tabla siguiente se presentan los valores relativos para los parámetros E,P,I y K

Tabla 6: valores relativos para los parámetros E,P,I y K. (Fuente: Auge, 2004)

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

A diferencia de la mayoría de los otros métodos, el EPIK brinda vulnerabilidades crecientes a medida que disminuyen los valores relativos de los parámetros considerados, pues el método apunta a definir el factor de protección para el agua subterránea, más que la vulnerabilidad.

Para los factores de ponderación los autores proponen:

$$\alpha = 3$$

$$\beta = 1$$

$$\gamma = 3$$

$$\delta = 2$$

Considerando los valores relativos y los factores de ponderación, surge que el índice de vulnerabilidad o factor de protección de un acuífero en medio kárstico puede variar entre extremos de 9 (más vulnerable) y 34 (menos vulnerable). Los mismos autores recomiendan emplear las siguientes categorías:

Vulnerabilidad alta (9 - 19)

Vulnerabilidad media (20 -25)

Vulnerabilidad baja (26 - 34)

Y muy baja cuando existe una cobertura de suelo detrítico, de por los menos 8 m de espesor, con baja conductividad hidráulica.

3.2.5. Método EKv

Auge (1995), considera que la vulnerabilidad es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello también se la conoce como protección o defensa natural.

En relación a los acuíferos libres desarrolla una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (E) y en la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv), parámetros que también considera el método AVI (Acuífer Vulnerability Index). A ambas les asigna índices que van de 1 (menos vulnerable) a 5 (más vulnerable), finalizando en el diagrama de la tabla 10 donde Kv es la permeabilidad vertical y E el espesor de la sección no saturada.

Tabla 7: Valores asignados al parámetro E.

	Espesor de la zona subsaturada (E)				
m	> 30	> 10 a 30	> 5 a 10	> 2 a 5	< 2
índice	1	2	3	4	5

Tabla 8: Valores asignados al parámetro Kv.

Permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv)					
m/día	<1.10 ⁻³	1.10 ⁻³ a 0.01	>0.01 a 1	>1 a 50	> 50 a 500
Índice	1	2	3	4	5
Vulnerabilidad	muy baja	baja	media	alta	muy alta

5: con permeabilidades verticales (Kv) de 50 a 500 m/día, está representado por arena mediana y gruesa, grava arenosa y grava.

4: Kv de 1 a 50 m/d, por arena muy fina a limosa, arena fina y arena mediana a gruesa.

3: Kv de 0,01 a 1 m/d, por limo y limo arenoso.

2: Kv de 0,001 a 0,01 m/d, por limo y limo arcilloso.

1: Kv < de 0,001 m/d, por arcilla y arcilla limosa.

Tabla 9: Diagrama de Vulnerabilidad para acuíferos libres.

Kv	1	6	5	4	3	2
	2	7	6	5	4	3
	3	8	7	6	5	4
	4	9	8	7	6	5
	5	10	9	8	7	6
		5	4	3	2	1
	E					

Ambos valores se suman brindando un índice final, con extremos de 2 y 10.

Para índices de E + Kv entre 2 y 4 la vulnerabilidad es baja, entre 5 y 7 media y de 8 a 10 alta.

3.2.6. Método ΔhT

Desarrollado para Acuíferos semiconfinados (Auge, 2001). La vulnerabilidad de este tipo de acuífero, está controlada por las propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo (permeabilidad vertical, porosidad y espesor) y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el libre sobrepuesto.

Esta diferencia, que bajo condiciones de no alteración generalmente es pequeña (algunos dm a pocos m), se magnifica en los ámbitos bajo explotación, donde puede alcanzar decenas y aún centenas de metros. En la figura siguiente se señala una relación hidráulica natural con un Δh_1 favorable al acuífero libre, que define el sector de recarga del semiconfinado y un Δh_2 , favorable a este último que tipifica al ámbito de descarga. El acuífero semiconfinado sólo puede contaminarse a partir del libre en el ámbito de recarga, pero no en el de descarga.

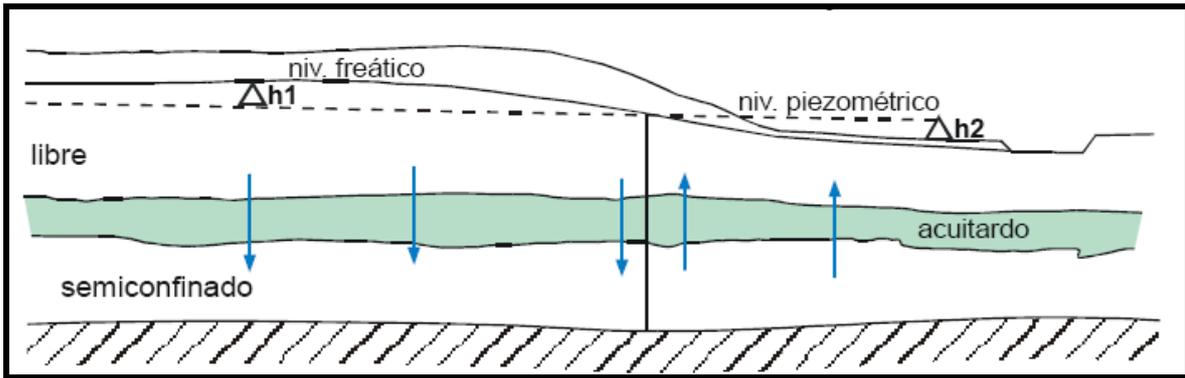


Figura 42: Potenciales hidráulicos naturales entre acuíferos libres y confinados. (Fuente: Auge, 2004).

En la figura 43 se representa la nueva relación hidráulica entre los dos acuíferos que la extracción generó, cuya consecuencia más trascendente respecto a la vulnerabilidad del semiconfinado, es el descenso de su superficie piezométrica con la consecuente sobrecarga hidráulica del libre en el techo del acuitardo, lo que facilita la filtración vertical descendente y el acceso de contaminantes al semiconfinado.

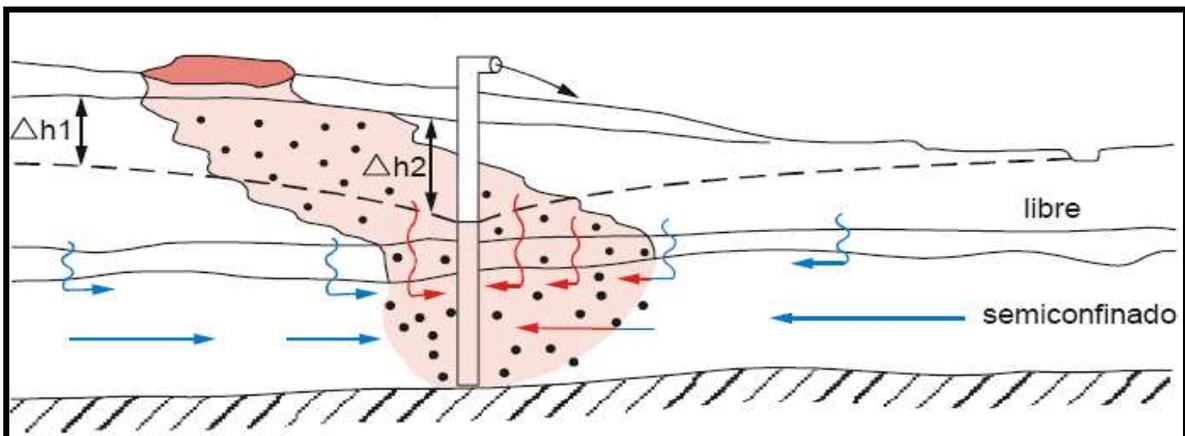


Figura 43: Contaminación por bombeo en el acuífero confinado. (Fuente: Auge, 2004).

De los esquemas se desprende que la situación menos favorable para la protección del acuífero parcialmente confinado, se da cuando su potencial hidráulico es menor que el del freático; o sea existe un gradiente hidráulico vertical negativo en profundidad.

Otro factor que incide en la comunicación hidráulica es la continuidad areal y litológica del sellante, dado que los cambios en las superficies suelen modificar notablemente su capacidad respecto a la transmisión de agua.

Considerando las variables potenciales hidráulicos y transmisividades verticales se pueden establecer 3 grados de vulnerabilidad (alta, media y baja), determinados primariamente por el gradiente vertical de potenciales hidráulicos y secundariamente por la T' (transmisividad vertical del acuitardo). Resulta importante señalar que los potenciales hidráulicos pueden variar, tanto por causas naturales (períodos de exceso o déficit) como artificiales (extracción) y que ello puede modificar el sentido del flujo vertical. Por lo tanto debe seguirse periódicamente (monitoreo) la evolución espacial y temporal de los mismos.

Si se denomina H1 al potencial hidráulico del acuífero libre y H2 al del parcialmente confinado, se tiene:

Tabla 10: Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en función de su potencial hidráulico respecto al del libre asociado.

H2 > H1	Vulnerabilidad Baja
H2 ~ H1	Vulnerabilidad Media
H2 < H1	Vulnerabilidad Alta

A esto se le puede adicionar la resistencia hidráulica que ofrece el sellante al pasaje vertical.

Tabla 11: Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en relación a la transmisividad vertical del acuitardo sobrepuesto.

$T' < 10^{-5}$ 1/día	Vulnerabilidad Baja
$10^{-5} < T' < 10^{-3}$ 1/día	Vulnerabilidad Media
$T' > 10^{-3}$ 1/día	Vulnerabilidad Alta

En la tabla 12 se indican los métodos descriptos y los parámetros que emplea cada uno para evaluar la vulnerabilidad.

Tabla 12: Resumen de los métodos más importantes para la determinación de la vulnerabilidad en un acuífero (Fuente: M. Auge, 2004).

	DRASTIC		GOD		SINTACS		EPIK		Ekv		$\Delta HT'$
D	Depth: Profundidad de la Sup. Freática	G	Ground water occurrence Tipo de acuífero	S	Soggiacenza Prof. del agua	E	Epikarstic Características del epikarst	E	Espesor de la sección subsaturada	Δh	Diferencia de potencial hidráulico (libre – semiconfinado)
R	Recharge: Recarga neta	O	Overall aquifer class Litología de la cobertura	I	Infiltrazione Infiltración	P	Protective cover Cobertura edáfica	Kv	Permeabilidad vertical de la sección subsaturada	T'	Transmisividad vertical del acuitardo
A	Aquifer Media: Litología del Acuífero	D	Depth Prof. del agua o del acuífero	N	Non saturo Zona subsaturada	I	Infiltration Infiltración				
S	Soil: Suelo			T	Tipologia della copertura Tipo de suelo	K	Karst network Red kárstica				
T	Topography Topografía			A	Acquifero Características del acuífero						
I	Impact: Litología de la zona subsaturada			C	Conductibilità idraulica Conductividad hidráulica						
C	Hydraulic Conductivity Conductividad hidráulica			S	Superficie topografica Topografía						

4. METODO DRASTIC

El DRASTIC es un modelo empírico desarrollado por Aller et al (1987) para la Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).

Es un método usado para evaluar cualitativamente la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, y además para la confección de mapas de vulnerabilidad. Se basa en la combinación de siete factores que se considera que incluyen los requerimientos básicos necesarios para evaluar la contaminación potencial de una región hidrológica.

Las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC son:

D: Depth to water. Profundidad del agua subterránea.

R: (Net) Recharge. Recarga neta.

A: Aquifer media. Litología del acuífero.

S: Soil media. Tipo de suelo.

T: Topography. Topografía.

I: Impact of the vadose zone. Naturaleza de la zona no saturada.

C: (Hydraulic) Conductivity. Conductividad hidráulica del acuífero.

El índice DRASTIC se desarrolló a partir de asumir cuatro hipótesis básicas (Salhi et al. 2008):

El contaminante se introduce desde la superficie del terreno a través del suelo, cruzando la zona no saturada, penetrando en el acuífero;

El contaminante se incorpora al agua subterránea con la precipitación;

El contaminante tiene la misma movilidad del agua;

El área de estudio es mayor a 40 hectáreas.

En situaciones donde tienen lugar desviaciones de estas condiciones, la evaluación debe ser hecha con precaución. Por ejemplo, un contaminante puede tener distintas características que el agua para moverse, por ser más denso o tener otras propiedades químicas. La inyección de contaminantes directamente en el agua subterránea, hace que no se produzcan muchos mecanismos de atenuación, y que la evaluación DRASTIC no sea la más adecuada para el potencial de polución.

El método permite determinar un valor numérico por medio de un sistema de ranking, el cual contiene tres partes: pesos, rangos y clasificaciones.

Pesos: Como ya se mencionó, la capacidad de protección de un acuífero es el resultado de un conjunto de factores. Estos factores difieren en la importancia relativa que tienen a la hora de evaluar la vulnerabilidad, cada factor DRASTIC se valúa con respecto a los otros. A cada factor se le asigna un peso ponderado que va del 1 (uno) al 5 (cinco), el menos importante recibe un peso de 1.

A continuación se presenta una tabla con los pesos asignados a cada factor DRASTIC.

Tabla 13: Pesos asignados a cada factor DRASTIC (Fuente: Auge, 2004).

Factor	Peso	
Profundidad del agua	D	5
Recarga Neta	R	4
Litología de Acuífero	A	3
Tipo de Suelo	S	2
Topografía	T	1
Litología de la zona no saturada	I	5
Conductividad Hidráulica del acuífero	C	3

Rangos y Valoraciones: a cada factor se lo subdivide en rangos o en tipos de medio característico en base a las condiciones físico-naturales en que se presenta el parámetro y al impacto relativo que esta condición juega en la sensibilidad natural del acuífero, por lo cual a cada rango se le asigna una valoración que va desde el 1 (uno) al 10 (diez). Es decir a cada factor DRASTIC se lo evalúa determinando la importancia relativa de cada rango en relación a la contaminación potencial. En las tablas siguientes se presentan los parámetros DRASTIC con sus rangos y puntuaciones.

Tabla 14: Rangos y puntuación para el factor profundidad del Nivel de agua (Fuente: Auge, 2004).

Profundidad del nivel del agua.	
Profundidad (m)	Valoración Dr
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

Tabla 15: Rangos y puntuación para el factor Recarga neta del acuífero (Fuente: Auge, 2004).

Recarga neta.	
Recarga (mm)	Valoración R _r
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9

Tabla 16: Rangos y puntuación para el factor Litología del acuífero (Fuente: Auge, 2004).

Formación geológica que constituye el acuífero.		
Litología del acuífero	Valoración Ar	ValorTípico Ar
Lutita masiva	1 a 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 a 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 a 5	4
Till glacial	4 a 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 a 9	6
Arenisca masiva	4 a 9	6
Caliza masiva	4 a 9	6
Arena o grava	4 a 9	8
Basaltos	2 a 10	9
Caliza kárstica	9 a 10	10

Tabla 17: Rangos y puntuación para el factor tipo de Suelo (Fuente: Auge, 2004).

Cubierta edáfica bajo la superficie del terreno.	
Tipo de suelo	Valoración S _r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Tabla 18: Rangos y puntuación para el factor Topografía (Fuente: Auge, 2004).

Pendiente del terreno	
Pendiente (%)	Valoración T _r
0-2	10
02 a 06	9
06 a 12	5
12 a 18	3
> 18	1

Tabla 19: Rangos y puntuación para el factor Impacto de la zona no saturada (Fuente: Auge, 2004).

Tipo de material geológico de la zona no saturada.		
Naturaleza de la zona no saturada	Valoración I _r	Valor típico I _r
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	02 a 06	3
Lutita	02 a 05	3
Caliza	02 a 07	6
Arenisca	04 a 08	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	04 a 08	6
Arena o grava con contenido de cieno (limo) y arcilla significativo	04 a 08	6
Metamórfica/Ígnea	02 a 08	4
Grava y arena	06 a 09	8
Basalto	02 a 10	9
Caliza kárstica	08 a 10	10

Tabla 20: Rangos y puntuación para el factor Conductividad hidráulica del acuífero (Fuente: Auge, 2004).

Conductividad hidráulica del acuífero.	
Conductividad hidráulica (m/día)	Valoración C _r
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8
> 81,49	10

En resumen cada uno de los siete factores recibe un peso ponderado y conjuntamente se los divide en rangos o medios característicos los cuales reciben una valoración, luego la vulnerabilidad puede evaluarse a partir de la siguiente ecuación de la cual obtenemos el **Índice de Vulnerabilidad**:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = (Dw \cdot Dr) + (Rw \cdot Rr) + (Aw \cdot Ar) + (Sw \cdot Sr) + (Tw \cdot Tr) + (Iw \cdot Ir) + (Cw \cdot Cr). \quad (\text{Ecuación 1}).$$

Donde:

Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw y Cw corresponden a la ponderación de cada uno de parámetros o factores señalados anteriormente.

Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir y Cr corresponden a la reclasificación o valoración interna de cada parámetro de acuerdo a la variabilidad de la propiedad.

Cuanto más alto es el índice DRASTIC mayor es la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Los índices pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), de los cuales se obtienen los siguientes rangos de vulnerabilidad:

Tabla 21: Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca (Fuente: Auge, 2004).

Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Calificación
Muy bajo	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy alto	187-230	5

Una vez obtenido el índice de vulnerabilidad es posible identificar las zonas que son más propensas a ser susceptibles a la contaminación del agua subterránea, en relación con otras áreas, y así realizar los mapas de vulnerabilidad.

El uso de los mapas de vulnerabilidad permite evaluar el grado de protección natural de un acuífero respecto a la contaminación del agua subterránea en diferentes sectores del mismo ante la presencia de diversas actividades humanas.

Este índice proporciona solo una herramienta de evaluación relativa y el método no está diseñado para proveer respuestas absolutas. Sin embargo, resulta sumamente útil cuando se desean realizar comparaciones, siendo de extrema importancia en la toma de decisiones.

4.1. INFLUENCIA DE CADA FACTOR SOBRE EL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

4.1.1. Profundidad del agua subterránea.

El nivel freático delimita la superficie debajo del nivel de suelo donde los poros están llenos de agua. Sobre el nivel freático los poros están parcialmente llenos de agua y aire (Aller et al., 1987).

En las zonas de descarga natural el nivel freático se emplaza a menor profundidad que en las de recarga, y en las de conducción, se ubica en una posición intermedia. Las curvas de isoprofundidad de la superficie freática, indican además el espesor de la zona de aireación o subsaturada. Esto resulta de interés para establecer sitios donde la cercanía del agua puede favorecer el ingreso de contaminantes por vía superficial.

La profundidad del acuífero es uno de los factores más influyentes en la determinación del índice de Vulnerabilidad y en la evaluación del riesgo asociado a la contaminación del cuerpo de agua, ya que la misma determina el espesor de la capa de suelo por la cual el contaminante debe transitar antes de llegar al acuífero y como consecuencia se puede inferir la cantidad de tiempo en que el mismo alcanzaría el nivel freático. En general cuanto más profunda se encuentre la superficie freática mayor será la posibilidad de atenuar las consecuencias de la infiltración de algún contaminante debido a los procesos de degradación que sufre al atravesar la capa de suelo superior.

El mapa de profundidad del nivel del agua se obtiene a partir de la medición de niveles en pozos o piezómetros destinados para ello en un acuífero libre, mientras que en un acuífero confinado se debe realizar un mapa del techo del acuífero utilizando perfiles litológicos.

Este parámetro, por la naturaleza del relieve puede ser extremadamente variable, sin embargo, al ser estandarizado permite asignarle una ponderación dentro del modelo y cuantificar su contribución, estableciendo una aportación concreta en la determinación de la contaminación potencial (Auge, 2004).

4.1.2. Recarga neta.

La fuente primordial para que se lleve a cabo la recarga de los acuíferos es la precipitación, la cual infiltra a través de la superficie del suelo y percola al manto freático. Este parámetro se refiere a la recarga debida a la infiltración de la precipitación cuando el balance hídrico es favorable. La recarga neta indica la cantidad de agua por unidad de área que penetra la superficie del suelo y alcanza el nivel freático (Aller et al., 1987).

Esta recarga de agua puede transportar el contaminante verticalmente hacia la freática y horizontalmente dentro del acuífero de acuerdo al movimiento del agua dentro de la masa del suelo. Conjuntamente este parámetro se relaciona con la cantidad de agua disponible para la dispersión y dilución del contaminante dentro del acuífero.

Los acuíferos libres presentan mayor vulnerabilidad a la contaminación que los acuíferos confinados en relación a este parámetro. Los acuíferos confinados están parcialmente protegidos de contaminantes introducidos desde la superficie por las capas de baja permeabilidad que los confinan.

La recarga de agua es entonces el principal vehículo para la penetración y transporte de contaminantes al acuífero. Por lo tanto cuanto mayor es la recarga mayor es el potencial de contaminación.

El parámetro de Recarga Neta utiliza el promedio de la cantidad anual de agua que es depositada en el acuífero mediante la infiltración, por lo que no toma en consideración su distribución, intensidad o duración de cada evento de lluvia.

En resumen, la cantidad de agua disponible para la dispersión y dilución de los contaminantes en la zona media vadosa y en la zona saturada está controlada por este parámetro. Por lo tanto, la Recarga Neta es el principal vehículo para la conducción y transporte de contaminantes sólidos o líquidos hacia el agua subterránea.

4.1.3. Litología del acuífero.

El parámetro **A** (Acuífer media) valora la litología que constituye al acuífero, ésta se refiere al tipo de formación geológica que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea. El agua es contenida por el acuífero en los espacios porosos y en las aperturas por fracturas y disolución de la roca. Según Aller L. (1987) las rocas que contienen el agua en los poros tienen porosidad primaria y las rocas que la contienen en sus grietas, las cuales fueron creadas luego de su formación, tienen porosidad secundaria.

El sistema de flujo dentro del acuífero es afectado por el medio que lo conforma. La formación geológica que constituye el acuífero ejerce control sobre la ruta y distancia que el contaminante debe seguir, y por lo tanto, del tiempo en que el mismo tarda en llegar al agua. El material del acuífero representa las diferentes características físicas de la roca que proporcionan mecanismos de atenuación tales como sorción, reactividad y dispersión, así como en la cantidad de área superficial efectiva de los materiales con los cuales el contaminante puede estar en contacto. El recorrido que el contaminante tome puede estar fuertemente influenciado por las fracturas de la formación rocosa, que pueden facilitar el flujo.

En general a mayor granulometría o mayor diaclasamiento, mayor permeabilidad y, consecuentemente, un grado de vulnerabilidad más elevado.

4.1.4. Tipo de suelo.

Este parámetro (Soil media -S-) se refiere a la fracción superficial de la zona no saturada caracterizada por una importante actividad biológica. Para propósitos del modelo, el suelo es comúnmente considerado como la zona húmeda superficial de la tierra la cual tiene una profundidad promedio de 1.80 m (seis pies) o menos, dependiendo del grosor de los horizontes, así como el grado de erosión y arrastre de suelo.

El tipo suelo tiene un impacto relevante en la cantidad de agua de recarga que pueda infiltrarse en el terreno y por lo tanto en la capacidad que tiene un contaminante de desplazarse verticalmente en la zona no saturada (Aller et al. 1987).

La presencia de materiales de textura fina tales como arcillas y limos pueden reducir la permeabilidad del suelo y limitar la migración de los contaminantes. Se puede decir, que la contaminación potencial de un suelo se ve afectada por el tamaño y tipo de partículas que conforman su estructura, así como la proporción de éstas. En general, los suelos arcillosos brindan mayor protección al acuífero. Sin embargo, en los suelos que contienen arcillas expansivas, la protección es mucho menor debido a las fisuras que se desarrollan como consecuencia de la contracción y expansión de sus partículas bajo el efecto de la

humedad. Esta permeabilidad secundaria sucede mientras el suelo está seco (las fisuras se cierran cuando el suelo está hidratado), pero cuando se inicia la hidratación, los contaminantes pueden moverse a través de las fisuras que aún no se han cerrado. La cantidad de materia orgánica presente es otro factor importante, sobre todo cuando nos referimos a la atenuación de pesticidas. De esta manera la entrada de cualquier contaminante hacia las aguas subterráneas tendrá un comportamiento distinto según el tipo de suelo presente en la superficie de corteza terrestre.

En resumen, el parámetro **S** considera la capacidad que tiene un suelo de amortiguar el paso de un contaminante debido, básicamente, a dos factores: la actividad biológica y la textura del suelo. Por un lado, la capacidad de los organismos del suelo de metabolizar una carga contaminante y, por otro, la textura del suelo que regula la velocidad del pasaje de un contaminante. Generalmente, cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, menor es el potencial de contaminación.

4.1.5. Topografía.

Para los términos del modelo, podemos entender a la topografía (T- Topography), como el porcentaje de pendiente de terreno y su variación. La pendiente controla la posibilidad de que un contaminante circule o se estanque en la superficie de un área el tiempo suficiente como para infiltrarse. Igualmente, la topografía influye en el desarrollo de los suelos y, por lo tanto, en la atenuación de la contaminación. Por lo tanto a mayor probabilidad de infiltración, mayor es el potencial de contaminación asociada a la pendiente.

Si se tiene una pendiente pronunciada, la velocidad del flujo de la escorrentía impedirá la infiltración de los contaminantes, pero si por el contrario se tienen pendientes ligeras y de gran longitud la oportunidad de que el contaminante arrastrado por la lluvia se infiltre será mayor (Aller et al. 1987).

4.1.6. Naturaleza de la zona no saturada.

La naturaleza de la zona no saturada (I - Impact of the vadose zone) se refiere a la litología de la zona no saturada, define la facilidad o dificultad con que podría viajar un contaminante por este medio.

La zona no saturada es considerada como la porción de materiales presentes entre el límite final de la capa de suelo y los límites de la parte superior del acuífero o zona saturada. El tipo de materiales presentes en esta zona definen las características de atenuación que se le pueden dar a los contaminantes ya que procesos como la biodegradación, filtración mecánica, neutralización, volatilización, dispersión y reacciones químicas ocurren en esta parte. La posibilidad de degradación y volatilización disminuyen conforme a la profundidad. Por todo esto la conducción del contaminante en su trayecto hasta el acuífero depende de los materiales presentes en esta porción (Aller et al., 1987).

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. De esta manera, el medio controla el tiempo en que los contaminantes están sometidos a los procesos de atenuación.

Por ser muchos de estos procesos de carácter superficial, la atenuación es mucho más importante si el agua encuentra material granular de pequeña granulometría, ya que el contaminante tiene mayor área efectiva de sólido con quien entrar en contacto. Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de arcilla y limo presente en la zona no saturada,

mayor será el tiempo de recorrido y más complicado será el camino para el agua, teniendo el acuífero mayor potencial para protegerse. Contrariamente si el existen diaclasas que faciliten el recorrido del agua, habrá mayor potencial de contaminación.

4.1.7. Conductividad hidráulica del acuífero.

La conductividad hidráulica del acuífero (C – Hydraulic Conductivity) se refiere a la habilidad de los materiales constituyentes del acuífero a conducir el agua, los cuales, a su vez, controlan la velocidad a la que el agua subterránea fluye bajo un gradiente hidráulico dado. Esta velocidad controla la velocidad a la que el contaminante circulará desde su punto de ingreso al acuífero. La conductividad hidráulica está controlada por la cantidad e interconexión de los espacios vacíos, los cuales se pueden producir como consecuencia de factores como porosidad intergranular, diaclasamiento y planos de estratificación (Aller et al., 1987).

Altas conductividades hidráulicas están asociadas a una mayor circulación el contaminante incorporado al cuerpo de agua, y por lo tanto, mayor vulnerabilidad.

4.1.8. Relación entre parámetros

La profundidad al acuífero y el impacto de la zona no saturada se complementan, ya que el primero afecta el espesor y el segundo afecta la naturaleza del material que el contaminante tiene que atravesar.

La recarga neta, que influye sobre el transporte, dispersión y dilución del líquido contaminado, comparte dicha influencia con la profundidad al acuífero y el impacto de la zona no saturada. A la vez, la topografía y el tipo de suelo afectan a la recarga.

El suelo ejerce impacto para la atenuación a través del largo y dirección de la ruta y el tiempo disponible para penetrar, en tanto que la topografía está a su vez relacionada con el espesor y desarrollo del perfil del suelo, y también puede tener relación con el gradiente hidráulico.

La porción superior de la zona no saturada influye sobre el tipo de suelo, y ambos son los responsables de los procesos biológicos.

La conductividad hidráulica conjuntamente con el gradiente son determinantes de la velocidad y la dirección del movimiento, y también son afectados por el tamaño de grano, la estratificación y la fracturación.

Es así que todos los factores que se toman como parámetros para este método, son variables dependientes e interactuantes.

En el presente estudio se realizó una descripción de los factores geológicos e hidrogeológicos de la zona del Bloque de Concesión Llanquanelo para determinar los Índices de Vulnerabilidad de esta área específica para distintas zonas de la misma y obtener un mapa que represente una distribución espacial de los mismos.

5. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

5.1. METODOLOGÍA

Como se mencionó, el método elegido para la determinación del índice de vulnerabilidad y la obtención de mapas de vulnerabilidad para el acuífero de la Laguna de Llanquanelo en la zona del Bloque de concesión operado por YPF, fue el método DRASTIC.

El presente trabajo se estructuró de la siguiente manera:

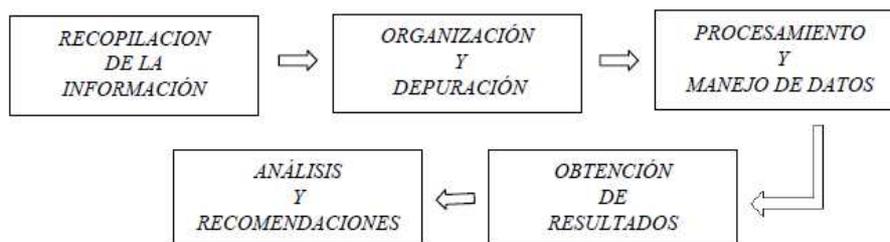


Figura 44: Metodología utilizada en la realización del presente trabajo.

Se efectuó un análisis y estudio del modelo DRASTIC para entender sus alcances, aplicaciones y limitantes.

Se realizó una revisión bibliográfica y cartográfica para el área de estudio, así como trabajos realizados sobre vulnerabilidad a la contaminación que sirven como referencia, lo cual permitió integrar todos los datos requeridos. En esta etapa de relevamiento de la información se consultaron diversos informes de estudios realizados en la zona por la UNC y por YPF. Estos informes son:

- Informe Preliminar y Estacional Invierno. Llanquanelo. YPF (2008).
- Manifestación General de Impacto Ambiental: Información Complementaria. YPF (2009).
- DRASTIC- A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Aller, L. et al. (1987).
- Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3. (www.aguaysig.com). Villegas Yepes, P. (2011)
- Modelación Hidrogeológica en cuencas endorreicas, aplicación a la cuenca de la Laguna de Mar Chiquita y Llanquanelo, Fulginiti, F. (2013).
- Modelación Hidrogeológica y Transporte de Contaminantes. Flores Nieto, F. (2013).
- Servicio de Estudios Hidrogeológicos para Proyecto Llanquanelo – Unidad de Negocios Mendoza. *Informe final*. UNC (2013).

A partir de ellos se obtuvieron datos de distintas perforaciones distribuidas dentro de la zona de estudio, de las cuales se extrajo información para obtener los parámetros DRASTIC. Fue necesario inferir algunos de éstos parámetros extrapolando la información obtenida de las perforaciones, modelando superficies, etc.

Se aplicó la metodología establecida por DRASTIC, en la construcción de todas las coberturas o mapas que conforman el modelo y que representan sus parámetros, a través de un Sistema de Información Geográfica. Para la generación de este SIG se utilizó el software ArcGis 9.3 de ESRI. El ArcGis es un programa informático producido por ESRI, que agrupa varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Se obtuvo el índice y el mapa de vulnerabilidad del Área de Concesión Llacanelo para establecer las zonas de mayor susceptibilidad a ser contaminadas.

Se realizó una evaluación acerca de cuáles son los parámetros que contribuyen de manera más importante en la determinación de los índices de alta vulnerabilidad.

Se concluyó con un análisis de los resultados, y generación de sugerencias y recomendaciones acerca de las medidas necesarias para evitar daños irreversibles en los acuíferos de esta zona.

5.1.1. Descripción del software a utilizar

Un SIG, Sistema de Información Geográfica, o GIS, Geographic Information System, es el resultado de una tecnología de manejo de información geográfica, integrada por hardware, software y datos geográficos, cuyo objetivo es capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones (UNC ,2013 b).

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial, ya que el sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y almacenarlas independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente. Esta información puede ser almacenada en el SIG básicamente de dos formas diferentes, pudiéndose así distinguir los SIG vectoriales y los SIG raster.

Un tipo de datos raster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. Así, el SIG raster o de retícula se trata de un modelo de datos muy útil para la representación de variables continuas en el espacio, que se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de su localización, dividiendo el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor numérico en representación de su valor temático. Dado que la malla es regular y el tamaño de la celda, o también llamado pixel, constante y que conocemos la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixeles están georreferenciados.

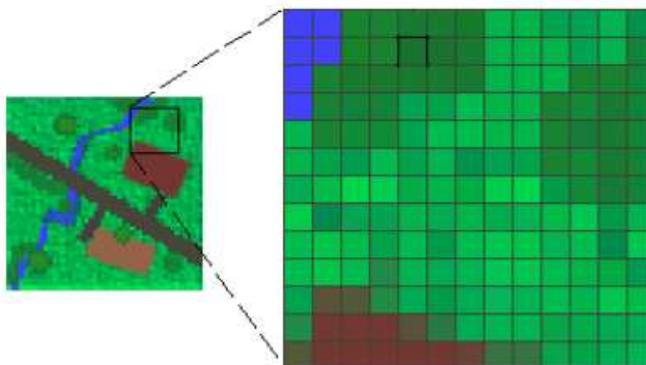


Figura 45: Imagen RASTER. (Fuente: ESRI; <http://resources.arcgis.com/>)

Por otro lado, en el caso de los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos (perforaciones, puntos de muestreo, puestos e hitos puntuales en general).

Así, los SIG vectoriales son aquellos que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico. Con un par de coordenadas y su altitud se gestiona un punto, que se utiliza para aquellas entidades geográficas que pueden ser expresadas por un único punto de referencia, con dos puntos se genera una línea, que se utiliza especialmente para representar aquellas entidades geográficas de tipo lineal como ser ríos, caminos, vías férreas, curvas de nivel, etc., y con una agrupación de líneas se obtienen polígonos, que

permiten representar entidades geográficas que cubren una determinada área en el espacio (cultivos, cuencas, coberturas del suelo, etc.).

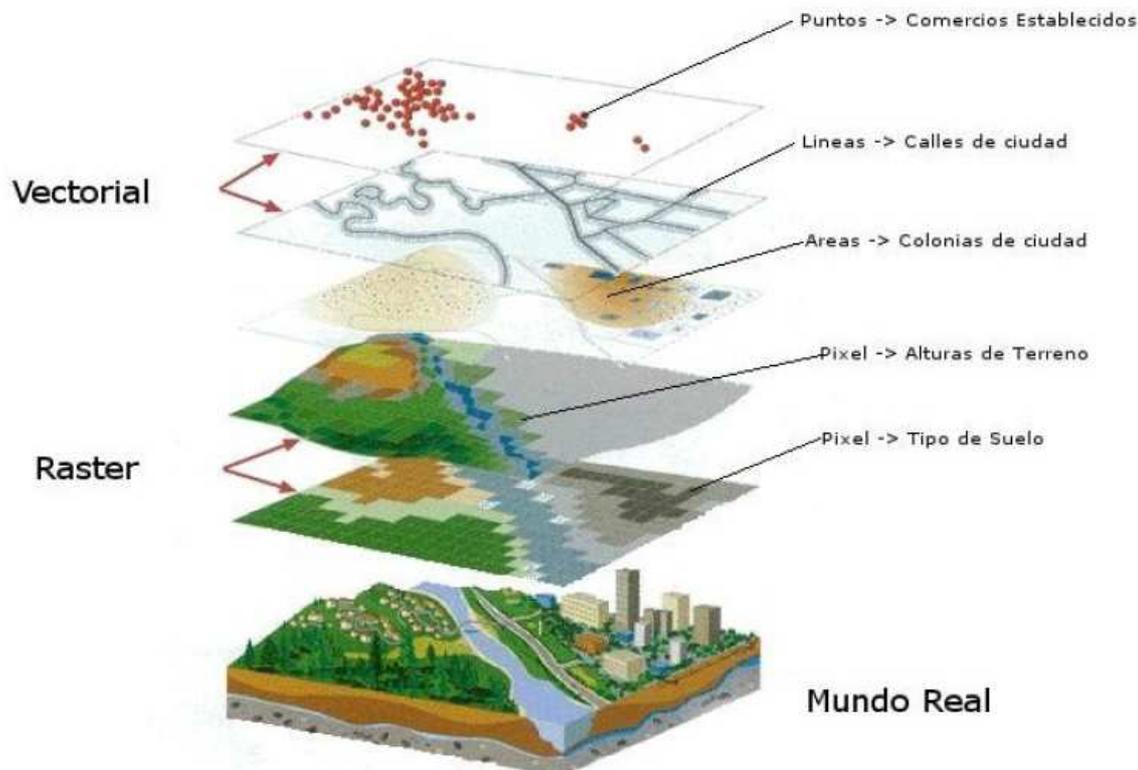


Figura 46: Modelo de Datos. (Fuente: www.aulati.net)

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) destinados a la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como ArcGIS Server, para la publicación y gestión web, o ArcGIS Móvil para la captura y gestión de información en campo.

ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, y se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son: ArcView, ArcEditor y ArcInfo. Entre las principales aplicaciones que integran ArcGIS, se destacan cuatro que se mencionan a continuación, que a pesar de estar por separado, funcionalmente se encuentran muy relacionadas entre sí.

ArcReader: es un visualizador de mapas gratuitos en el que se puede visualizar, consultar e imprimir mapas de forma sencilla.

ArcMap: está dedicada a visualizar, consultar, analizar y editar datos geográficos y realizar salidas cartográficas.

ArcCatalog: es la herramienta utilizada para explorar y organizar las fuentes de datos geográficos, crear y actualizar los datos informativos propios de cada capa.

ArcToolbox: es la aplicación dedicada al geoprocésamiento, es decir a todas aquellas operaciones de conversión, edición, análisis y manipulación de datos.

5.1.2. Trabajo con ArcGis en la realización de mapas

Los mapas de distribución espacial de la vulnerabilidad DRASTIC fueron realizados mediante Arcgis 9.3, a partir los datos obtenidos de cada una de las variables. Las capas necesarias para aplicar el método fueron generadas en formato Raster, con un tamaño de pixel de 30 metros por lado. Se procedió de la siguiente manera:

Los valores puntuales de fenómenos continuos como los niveles estáticos fueron interpolados con objeto de generar una superficie continua del fenómeno respectivo. Para el mapa de la Profundidad del acuífero se utilizó el método de interpolación Inverso de la Distancia al Cuadrado IDW, y para el mapa de la Recarga Neta el método empleado para la interpolación fue el Krigin.

Para los datos no numéricos como "Litología del acuífero, Tipo de suelo, Tipo de material geológico de la zona no saturada y Conductividad Hidráulica, que se encontraban como capa vector, simplemente se les dio una valoración al tipo de material de acuerdo a las tablas anteriores para construir el Raster correspondiente, y así realizar el álgebra de mapas.

Como se detalla más adelante la topografía se obtuvo a partir de un Modelo Digital del Terreno DEM.

Todas las capas de información fueron reclasificadas según los intervalos que sugiere DRASTIC. Esta operación consiste en transformar los valores originales de cada variable a valores consignados en las tablas de la 13 a la 19, estos valores están dentro de un rango de 1 a 10, donde 1 significa que es menos susceptible al fenómeno en cuestión y 10, más susceptible, como se había mencionado.

Teniendo todas las variables reclasificadas y en formato Raster se procedió a realizar el álgebra de mapas. Los sistemas de información geográfica SIG son muy importantes en este paso, ya que brindan la posibilidad de sumar todas las capas y que cada una sea multiplicada por su respectivo factor de ponderación.

El resultado obtenido en el paso anterior se reclasificó de acuerdo a la tabla 20 para finalmente obtener el mapa de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

Para realizar el trabajo descrito anteriormente se utilizaron distintas funciones de la herramienta Spatial Analyst del ArcGis 9.3 como son: análisis de superficie, interpolación, reclasificación y álgebra de mapas.

5.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS PARA EL MODELO

Como ya se mencionó la aplicación de este método se realizó dentro del área de concesión de YPF en las inmediaciones de la Laguna de Llanquanelo, la cual se ubica en la parte Centro Oeste de la Argentina, al Sur de la provincia de Mendoza, en el departamento Malargüe. Las coordenadas de esquineros del área son:

Tabla 22: Coordenadas de los esquineros del área de estudio.

Coordenadas	
X	Y
6057797	2485368
6048047	2485368
6048047	2475969
6059297	2475968
6059297	2478818
6057797	2478819

Proyección Posgar 94



Figura 47: Ubicación de Área de Estudio. (Fuente: Elaboración propia)

5.2.1. Mapa de la Profundidad de la Capa Freática.

De acuerdo a informes de YPF la dinámica del agua subterránea ha sido analizada en detalle en algunos sitios mediante perforaciones y mediciones, encontrando al menos dos niveles de agua subterránea, presentando el acuífero inferior un nivel piezométrico superior que el acuífero libre. Esto permite las surgencias en los bañados. En el caso de este estudio el análisis se realizó sobre el acuífero libre.

Los datos utilizados para la realización del mapa se obtuvieron de estudios realizados por YPF en agosto de 2008 para monitoreo de la freática. Específicamente se tomaron las coordenadas y los datos de profundidad de pozos. Una vez establecidos los puntos que representaban a cada uno de los pozos, con sus respectivas coordenadas, se procedió a llevar a cabo una interpolación mediante la extensión Spatial Analyst de ArcMap GIS 9.3.

El método que emplea la extensión de ArcMap es el Inverso de la Distancia al Cuadrado IDW, el mismo se utilizó debido a que es de los más prácticos y a su vez genera buenos resultados. Esto permitió determinar el área de influencia de la profundidad de cada pozo y en consecuencia estimar la profundidad del nivel freático de la zona de estudio.

En la tabla siguiente se muestran los puntos con sus coordenadas y la lectura freaticométrica.

Tabla 23: Puntos de observación de niveles freáticos.

Punto	Coordenadas		Nivel Freático (m)
	X	Y	
PM1	6055585,16	2478975,51	2,205
PM2	6056692,97	2479028,9	1,732
PM3	6056666,86	2479011,61	1,818
PM4	6056673,26	2478967,43	1,797
PM5	6056446,75	2479509,27	2,166
PM6	6055342,48	2481789,34	2,887
PM7	6058090,39	2477873,28	2,540
PM8	6058097,31	2477885,32	2,428
PM9	6058106,220	2477874,54	2,538
P2	6048098,384	2480945,985	0,870
P34	6051867,403	2481965,38	0,400
P50	6054868,939	2482086,075	0,680
P51	6054189,705	2481986,931	0,400
P39	6055462,635	2483878,03	0,300
P5	6049013,607	2481398,32	1,420
P32	6057264,006	2479334,82	0,750
P54	6053457,556	2482058,131	0,340
P22	6046777,468	2480185,211	1,000
P33	6051452,250	2479331,111	0,680
P40	6056117,287	2481073,708	0,950
P35	6057827,662	2477952,052	1,540
P45	6055179,123	2477041,228	0,680
2	6047716	2480959	0
3	6048195	2481206	0,3

4	6048346	2481223	0
5	6048632	2481303	1,45
7	6048448	2476647	0
12	6049918	2476164	0
13	6050430	2476133	0
14	6052037	2475825	1
18	6051637	2477861	0
19	6052840	2477818	0
20	6049355	2481412	0
24	6050278	2481298	1
35	6052791	2478888	0
38	6052233	2479222	1,5
39	6052189	2479453	1,7
40	6052204	2479423	1,84
42	6051494	2479550	1,5
43	6051502	2479570	1,5
44	6051171	2479361	0,75
45	6051482	2481973	0,4
52	6051417	2483442	0
53	6051446	2483440	0
55	6051503	2483387	0,25
56	6051628	2483031	0,38
58	6057902	2478257	0
67	6057229	2477935	1,54
70	6055111	2484642	0,2
71	6055106	2484291	0,79
72	6055067	2483874	0,93
73	6055150	2481833	0,43
75	6055477	2481113	0,3
77	6054230	2479816	0,8
78	6053652	2479636	0
80	6055729	2481080	0,92
84	6056579	2481085	1,18
85	6054078	2475715	0,1
87	6054064	2482059	0,685
89	6053768	2481962	0,44
93	6052649	2481891	0
103	6057304	2474589	0
104	6057483	2474579	0
110	6056380	2475939	0,8
112	6056147	2477761	0,8
115	6055492	2477362	0,8
116	6046404	2480210	2,6
117	6056751	2480048	1,63

En base a estos datos se obtuvo la representación de la profundidad de la freática (isobata) en el área del yacimiento. Los resultados se observan en el mapa adjunto:

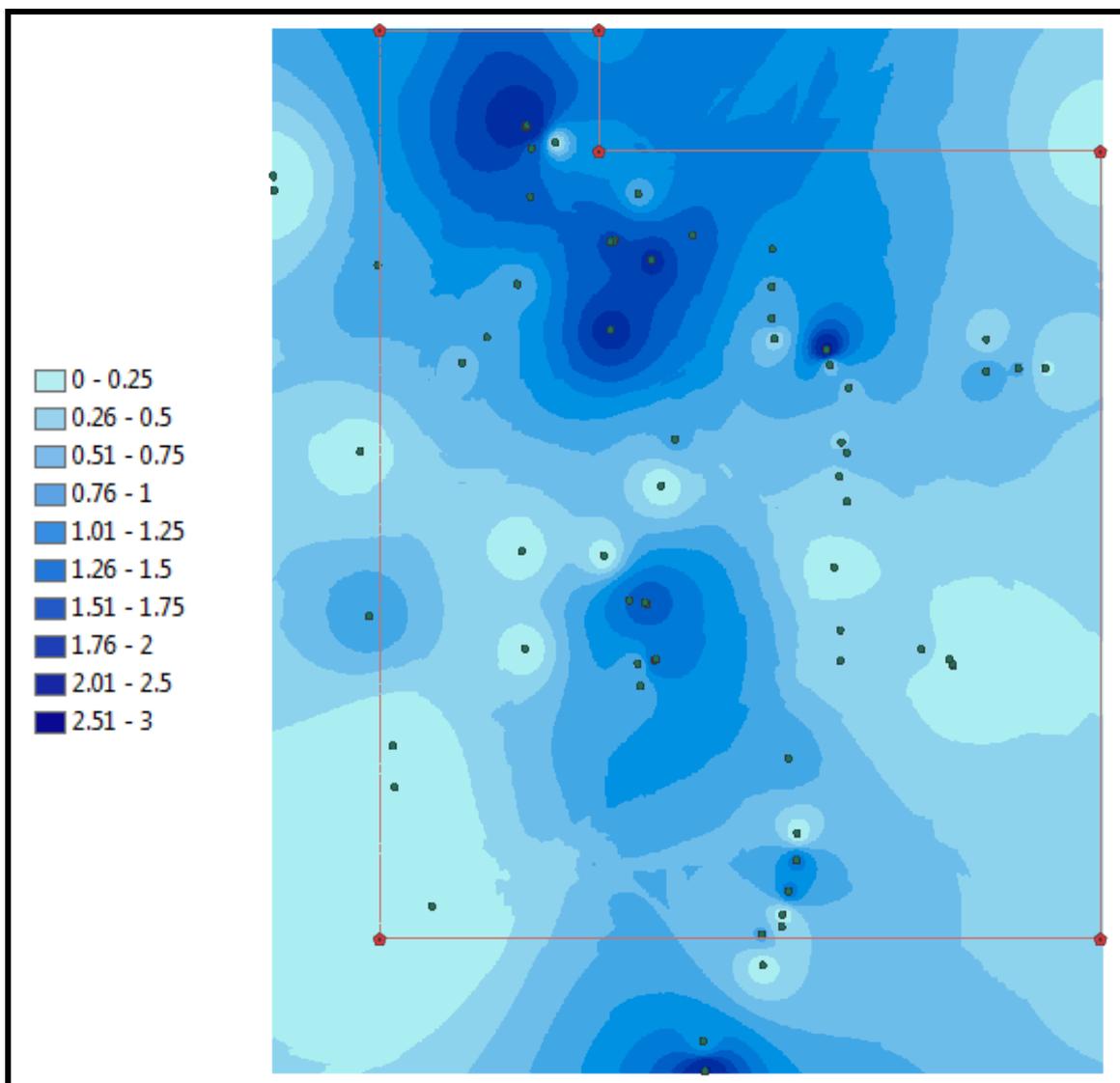


Figura 48: Representación del parámetro D: profundidad de la freática (Fuente: Elaboración propia).

Una vez obtenido el mapa se realizó una reclasificación del mismo para poder visualizarlo de acuerdo a los rangos establecidos, por DRASTIC, para este parámetro (tabla 13) y darle su valoración.

La extensión Spatial Analyst, del software ArcMap de Esri, permite darle un peso o un valor a las propiedades de un Raster de acuerdo a un criterio dado. La reclasificación es espacialmente útil en la construcción de estos mapas de vulnerabilidad de acuíferos en la que los atributos de cada uno de los mapas utilizados en DRASTIC se deben reclasificar de acuerdo a tablas de factores de ponderación dados (Villegas Yepes, 2011).

Los resultados se muestran en la figura siguiente:

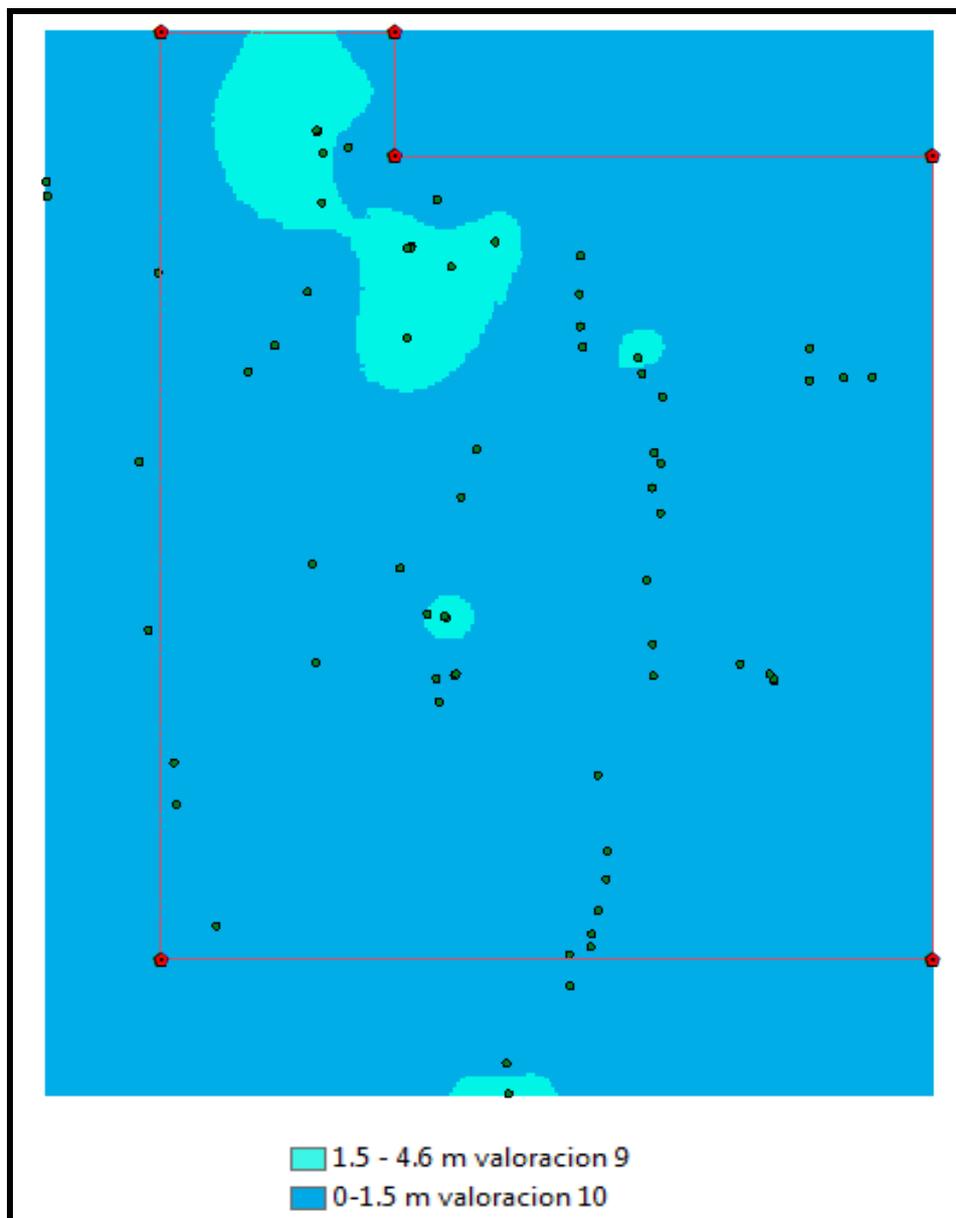


Figura 49: Reclasificación del parámetro D: profundidad de la freática.

Analizando las representaciones expuestas en las figuras 48 y 49 se observa que el nivel freático se encuentra entre valores de 0,00 m (metros) y los 2,9 m aproximadamente, con una profundidad media de 0,86 m. Esto significa que, en general, se presentan niveles freáticos cercanos a la superficie en toda la cuenca, lo que indicaría un alto grado de exposición del acuífero ante eventuales derrames superficiales de contaminantes.

El mapa de reclasificación manifiesta gran uniformidad sin mostrar amplias variaciones espaciales.

5.2.2. Recarga Neta.

Como se mencionó anteriormente la cantidad de agua disponible para la dispersión y dilución de los contaminantes está controlada por este parámetro. Por lo tanto, la Recarga Neta es el principal vehículo para la conducción y transporte de contaminantes sólidos o líquidos hacia el agua subterránea.

Para el cálculo de la infiltración que constituye la recarga al acuífero freático se consideró solo la extensión del área de concesión de YPF, que corresponde con el área en estudio, y se empleó el método propuesto por Schosinsky (2006), junto al valor de evapotranspiración calculado a partir de la fórmula de Thornthwaite.

La metodología propuesta por Schosinsky ha sido bastante utilizada, generando un error de recarga menor del ochenta por ciento, en los casos que se ha podido comprobar, en forma confiable.

Una de las ventajas de esta metodología es que considera diversas variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: la precipitación mensual, la retención en follaje, la capacidad de infiltración de los suelos y sus características, la cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno.

Este método considera que la recarga de un acuífero se determina conociendo, en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo.

Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Se considera que las lluvias mensuales menores de 5 mm, no van a generar infiltración ya que se asume que en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky y Losilla, 2000). Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% de la precipitación mensual. Sin embargo, en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20% (Linsley et al., 1958).

Se define al coeficiente de follaje (Cfo) como el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno.

Para el 12% de retención $Cfo = 0,12$.

Para el 20% de retención $Cfo = 0,20$.

Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicará el siguiente criterio:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$.

Si P es mayor de 5 mm/mes y el producto (P)(Cfo) menor de 5, $Ret = 5$. (ec.1)

Si el producto (P)(Cfo) es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret = (P)(Cfo)$.

Donde:

P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret = Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

Cfo = Coeficiente de retención del follaje [adimensional].

Infiltración

Se define un coeficiente de infiltración (C_i), el mismo es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración.

Se define el coeficiente de infiltración del suelo (C_i), en base a la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Si } K_p + K_v + K_{fc} \text{ es mayor de } 1, C_i &= 1. \\ \text{Si } K_p + K_v + K_{fc} \text{ es menor o igual a } 1, \text{ entonces } C_i &= K_p + K_v + K_{fc}. \end{aligned} \quad (\text{ec.2})$$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional] (Tabla 24).

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional] (Tabla 24).

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional] (ecuación 3).

Los valores sugeridos de estos componentes, que conforman el coeficiente de infiltración, se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 24: Coeficientes de infiltración por pendiente y por cobertura vegetal.

Por pendiente		Kp
Muy plana	0,02%-0,06%	0,32
Plana	0,3%-0,4%	0,22
Algo plana	1%-2%	0,17
Promedio	2%-7%	0,12
Fuerte	mayor de 7%	0,08
Por cobertura vegetal:		Kv
Cobertura con zacate menos del 50%		0,11
Terrenos cultivados		0,12
Cobertura con pastizal		0,2
Bosques		0,22
Cobertura con zacate más del 75%		0,23

Uno de los factores que más influyen en la infiltración es la textura del suelo (K_{fc}), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky y Losilla, 2000):

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

Donde:

K_{fc} [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo);
 fc [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Para aplicar esta ecuación, el rango de f_c ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día, por lo que:

Para valores de f_c menores a 16 mm/día, $K_{fc} = 0,0148f_c/16$.

Para valores de f_c mayor a 1568 mm/día, $K_{fc} = 1$.

Con las observaciones mencionadas en el párrafo anterior, el cálculo del coeficiente de infiltración por textura del suelo, se representa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Si } f_c \text{ está entre 16 y 1568 mm/día, } K_{fc} &= 0,267\ln(f_c) - 0,000154f_c - 0,723 \\ \text{Si } f_c \text{ es menor a 16 mm/día, } K_{fc} &= 0,0148f_c/16, \\ \text{Si } f_c \text{ es mayor de 1568 mm/día, } K_{fc} &= 1 \end{aligned} \quad (\text{ec.3})$$

El valor de f_c corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia.

El valor de K_{fc} fue derivado para los valores de lluvia mensual. Por lo tanto, la fracción que infiltra debido a la textura del suelo, nos permite obtener la infiltración mensual debido a este concepto.

Cálculo de la infiltración pluvial mensual

En el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, se han de considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje (ecuación 1) y el coeficiente de infiltración (ecuación 2).

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente (P_i) al suelo, está dado por la siguiente expresión:

$$P_i = (C_i)(P - \text{Ret}) \quad (\text{ec.4})$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes] (ecuación 1).

En ningún caso el coeficiente de infiltración (C_i) ha de ser mayor de 1, si así fuese, se le asigna a C_i el valor de 1.

Escorrentía superficial

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - \text{Ret} - P_i \quad (\text{ec.5})$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.

P = Precipitación en mm/mes (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes (ecuación 1).

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes (ecuación 4).

Balance del suelo

Una vez determinada la infiltración mensual al suelo, generada por la lluvia, es necesario conocer la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo. Estos valores se obtienen directamente del laboratorio de suelos o se evalúan mediante estimaciones de diversos autores. La tabla 24 presenta las estimaciones de Grassi (1976).

También es necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, en la zona donde se ha de realizar el balance.

El balance se realizará en un prisma rectangular, que tiene en la cara superior un cuadrado de 1 metro de lado y de profundidad, la de las raíces, con capacidad de absorción del agua en el suelo. La tabla 25 muestra la profundidad mencionada de raíces de algunas plantas.

Tabla 25: Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos (Fuente: Grassi, 1976).

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

Tabla 26: Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Fuente: Grassi, 1976).

PROFUNDIDAD DE RAÍCES	
Cultivo	Profundidad (m)
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1,7
Banano	0,5-0,8
Caña de azúcar	1,20-2
Frijol	0,5-0,7
Cebolla	0,3-0,5
Cítricos	1,20-2,0
Zacate	0,3-0,5
Bosques	2,0-3,0

La máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, es igual a la capacidad de campo, es entonces cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. La mínima humedad que puede tener un suelo es aproximadamente igual al punto de marchitez, pues con humedades menores la planta muere. De lo anterior se deduce que un suelo, no saturado, a profundidades mayores que la profundidad de raíces se encuentra a capacidad de campo.

Evapotranspiración

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando los estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua.

La Evapotranspiración Potencial (ETP) es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua (colmada su capacidad de campo) y cubierto con una cobertura vegetal completa. Este parámetro se calcula.

La Evapotranspiración Real (ETR): es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación. Este valor se mide, si bien hay fórmulas que permiten evaluarlo.

Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente (PM), la planta no transpira y muere. Se asume que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento.

$$ETPR = (ETP) (HS - PM) / (CC-PM) \quad (\text{ec.6})$$

Donde:

ETPR = Evapotranspiración potencial real [mm/día]

HS = Humedad del suelo [%]

ETP = Evapotranspiración potencial a capacidad de campo [mm/día]

CC = Capacidad de campo [%]

PM = Punto de marchitez permanente [%]

Debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación. Cada planta tiene una evapotranspiración diferente y va a depender de la temperatura de ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y grado de desarrollo de la planta. Por este motivo toman importancia los métodos que estiman una evapotranspiración promedio para la cuenca. Esta evapotranspiración promedio de la cuenca, se asume que es igual la evapotranspiración potencial (ETP).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren series de datos de difícil obtención. Por este motivo, se

utilizará la expresión de Thornthwaite (1948). Sus cálculos están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en Hidrología y en la estimación del balance hídrico para Climatología e Hidrología de cuencas. También es empleado en los índices y clasificaciones climáticas (Almorox, 2010).

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial, a .

$$e = 16 \left(10 \frac{t_m}{I} \right)^a \quad (\text{ec.7})$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

t_m : temperatura media mensual en °C

I : Índice de calor anual

$$I = \sum_{j=1}^{j=12} i_j \quad (\text{ec.8})$$

Que se calcula a partir del índice de calor mensual, i , como suma de los doce índices de calor mensuales:

$$i_j = \left(\frac{t_{mj}}{5} \right)^{1.514} \quad (\text{ec.9})$$

a : parámetro que se calcula, en función de I según la expresión:

$$a = 0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.01792 I + 0.49239 \quad (\text{ec.10})$$

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar "e" mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la ETP sin ajustar, para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes).

$$ETP_{Tho} = e.L \quad (\text{ec.11})$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual sin ajustar en mm/mes

L : factor de corrección del número de días del mes (N_{di}) y la duración astronómica del día N_i (horas de sol)

$$L_i = N_{di} / 30.N_i / 12 \quad (\text{ec.12})$$

El valor de "L" se puede obtener, así mismo, tabulado para distintas latitudes para las que se considera la duración media de la luz solar".

Tabla 27: Valor del coeficiente L para la corrección de la ETP debida a la duración media de la luz solar para un determinado mes y latitud (Fuente: Thornthwaite, 1948).

Latitud Sur	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
35	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,20	1,29
42	1,28	1,07	1,07	0,92	0,85	0,76	0,82	0,92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,30	1,08	1,07	0,92	0,83	0,74	0,81	0,91	0,99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,10	1,07	0,91	0,82	0,72	0,79	0,90	0,99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	0,90	0,80	0,70	0,76	0,89	0,99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41

Los cálculos de la evapotranspiración para la zona en estudio se pueden apreciar en las tablas siguientes:

Tabla 28: Valores de Evapotranspiración mensual aplicando el método de Thornthwaite para la zona Norte.

Mes	Precipitación mensual	T media mensual (°C)	i_{ij}	l	a	L_i	ETP sin corregir (mm/mes)	ETP corregido (mm/mes)
Enero	9,31	20,24	8,305	51,946	1,310	1,238	95,013	117,626
Febrero	19,86	19,19	7,662	51,946	1,310	1,044	88,609	92,508
Marzo	42,86	16,92	6,332	51,946	1,310	1,062	75,139	79,798
Abril	56,83	12,21	3,864	51,946	1,310	0,938	49,010	45,971
Mayo	43,05	8,32	2,162	51,946	1,310	0,884	29,653	26,214
Junio	43,62	5,7	1,219	51,946	1,310	0,812	18,069	14,672
Julio	43,51	5,37	1,114	51,946	1,310	0,864	16,711	14,439
Agosto	54,76	6,77	1,582	51,946	1,310	0,936	22,636	21,187
Septiembre	15,49	8,89	2,390	51,946	1,310	1,000	32,342	32,342
Octubre	14,48	13,17	4,333	51,946	1,310	1,134	54,117	61,369
Noviembre	32,81	15,56	5,578	51,946	1,310	1,176	67,329	79,179
Diciembre	32,35	18,76	7,403	51,946	1,310	1,258	86,018	108,210
Totales	408,93			51,946				

Tabla 29: Valores de Evapotranspiración mensual aplicando el método de Thornthwaite para la zona Centro y Sur.

Mes	Precipitación mensual	T media mensual (°C)	i_{ij}	l	a	L_i	ETP sin corregir (mm/mes)	ETP corregido (mm/mes)
Enero	4,43	20,24	8,305	51,946	1,310	1,238	95,013	117,626
Febrero	9,73	19,19	7,662	51,946	1,310	1,044	88,609	92,508
Marzo	16,21	16,92	6,332	51,946	1,310	1,062	75,139	79,798
Abril	24,11	12,21	3,864	51,946	1,310	0,938	49,010	45,971
Mayo	46,24	8,32	2,162	51,946	1,310	0,884	29,653	26,214
Junio	117,36	5,7	1,219	51,946	1,310	0,812	18,069	14,672
Julio	60,33	5,37	1,114	51,946	1,310	0,864	16,711	14,439
Agosto	71,44	6,77	1,582	51,946	1,310	0,936	22,636	21,187
Septiembre	30,02	8,89	2,390	51,946	1,310	1,000	32,342	32,342
Octubre	17,59	13,17	4,333	51,946	1,310	1,134	54,117	61,369
Noviembre	8,53	15,56	5,578	51,946	1,310	1,176	67,329	79,179
Diciembre	4,97	18,76	7,403	51,946	1,310	1,258	86,018	108,210
Totales	410,96		51,946					

Recarga al acuífero

Cuando ocurre la precipitación, el agua que infiltra se acumula en los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado. Posteriormente, una vez terminada la lluvia, se lleva a cabo la evapotranspiración, tomando las raíces el agua que se encuentra en los poros del suelo. Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante del agua que infiltra, percola para recargar al acuífero.

Al coeficiente contenido en la ecuación 6, se lo designa coeficiente de humedad (Ch):
 $Ch = (\text{humedad de suelo} - \text{punto de marchitez}) / (\text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez})$.

$$Ch = (H_s - PM) / (CC - PM)$$

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (HSi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C1):

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM) \quad (\text{ec.13})$$

Donde:

- C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.
- Hsi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en [mm].
- PM = Punto de marchitez en [mm].
- Pi = Precipitación que infiltra en [mm/mes].
- CC = Capacidad de campo en [mm].

Si consideramos que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC-PM) \quad (\text{ec.14})$$

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

Donde:

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1 = Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, C1. Por lo tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes.

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea, $(C1+C2)/2$; esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es:

$$ETPR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2) ETP \quad (\text{ec.15})$$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes [mm/mes]

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes]

Ninguno de los coeficientes de humedad, C1 y C2, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que C1 o C2, sea mayor de 1, se tomará igual a 1. Si C1 o C2 son negativos se tomarán con valor de 0.

Se define como humedad disponible (HD), aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

$$HD \text{ (mm/mes)} = HSi + Pi - PM \quad (\text{ec.16})$$

Donde:

HD = Humedad disponible [mm/mes].

Hsi = Humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

Si la humedad disponible es menor que la ETPR de la ecuación 15, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará únicamente la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ecuación 15. Sin embargo, si la humedad disponible (HD) es mayor que la cantidad de agua indicada en la ecuación 15, la planta evapotranspirará la cantidad expresada en dicha ecuación. Por lo tanto la evapotranspiración real será:

$$\text{Si } ((C1+C2)/2)ETP \text{ es menor o igual a HD, } ETR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2)ETP \quad (\text{ec.17})$$

$$\text{Si } ((C1+C2)/2)ETP \text{ es mayor que HD, } ETR \text{ (mm/mes)} = HD$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional].

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1, [adimensional].

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

HD = Humedad disponible [mm/mes]

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad de suelo final (HSf), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{Si } (HD+PM-ETR) \text{ es menor que la capacidad de campo, } HSf = HD+PM-ETR \quad (\text{ec.18})$$

$$\text{Si } (HD+PM-ETR) \text{ es mayor o igual que la capacidad de campo, } HSf = CC$$

Donde:

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

HD = Humedad disponible [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

ETR= Evapotranspiración real [mm/mes].

CC = Capacidad de campo [mm].

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesaria la humedad de suelo al inicio del mes, o sea, humedad inicial (HSi). La humedad inicial de un mes dado es la siguiente (ec.19):

$$HSi = \text{Es igual a la humedad de suelo final del mes anterior (HSf de ec.18)}$$

Donde:

HSi = Humedad del suelo inicial (inicio de mes) [mm].

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de

las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad (\text{ec.20})$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra en mm/mes.

H_{Sf} = Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

5.2.2.1. Cálculos de la recarga potencial del acuífero

Para realizar los cálculos de recarga del acuífero se utilizó información proporcionada en el Informe Preliminar y Estacional Invierno Llanquanelo llevado a cabo por YPF en Noviembre de 2008. A continuación se detallan los trabajos de gabinete y de campo que YPF ejecutó para realizar el análisis del sitio: Se efectuó una caracterización completa del sitio (rasgos externos) prestando atención a las variaciones de la vegetación y la superficie del suelo. Para realizar esta caracterización se consideraron las siguientes propiedades: Ubicación geográfica: coordenadas geográficas y altitud, posición geomorfológica, material originario de suelos, relieve y pendiente, clase natural de drenaje, pedregosidad superficial, presencia de sales, grado de cobertura vegetal y rasgos de degradación del suelo si los hubiere. Luego se seleccionaron los lugares para la apertura de calicatas en las zonas de interés. Seguidamente, con las calicatas abiertas, se caracterizó morfológicamente el perfil del suelo (rasgos internos). Se describió su morfología: horizontes, tipo y forma del límite entre horizontes, color, textura, estructura, consistencia. También se extrajeron muestras de cada uno de los horizontes descriptos, con fines analíticos. En ese trabajo se describieron 24 calicatas y se realizaron 128 observaciones, también con descripciones del perfil suelo pero sin extracción de muestras (YPF, 2009).

Así con la posición y descripción de cada calicata se agruparon los pozos según características uniformes quedando dividida el área de estudio en tres zonas: Norte Centro y Sur.

Para cada zona se obtuvo el porcentaje promedio de cobertura vegetal para el mes de septiembre que fue cuando se realizaron las tareas de campaña, luego de acuerdo a la precipitación de cada mes se infirió el mismo para los demás meses del año. De acuerdo a la información analizada no toda la superficie del suelo posee vegetación que interceptará la precipitación por lo que este factor fue reducido en función del porcentaje de áreas verdes obtenidas.

Seguidamente a partir del tipo de vegetación preponderante para cada zona y a través de la Tabla 23 se obtuvo el Coeficiente de cobertura vegetal promedio K_v .

Con el objetivo de obtener el coeficiente de infiltración por pendiente K_p se modeló en el programa CivilCad la superficie del terreno, a continuación se posicionaron en ella los pozos y se obtuvo la pendiente media del área circundante de cada pozo, luego se promediaron estas pendientes y se obtuvo, para cada zona, la pendiente promedio. Ingresando a la tabla 23 se extrajo el coeficiente K_p .

Para modelar la superficie del terreno a partir de un modelo digital del terreno (DEM) y utilizando el software GlobalMapper se extrajeron puntos representativos de la superficie con sus coordenadas y elevaciones, los cuales se importaron en el programa CivilCad para lograr el modelado de la superficie.

El coeficiente de infiltración por textura del suelo se lo calcula en función de la permeabilidad del suelo saturado, estos valores se extrajeron del Informe de Práctica Supervisada para Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Córdoba de Federico Flores Nieto: "Modelación Hidrogeológica y Transporte de Contaminantes. Llacanelo, Mendoza". (2013), los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 30: Valores de Conductividad hidráulica (Fuente: Flores Nieto, 2013).

CONDUCTIVIDAD	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
Depósitos fluviales	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04
Depósitos eólicos	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05
Depósitos lacustres	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
Basalto	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05

Para la caracterización climática, datos de precipitación y temperatura, se dispone de información de dos estaciones meteorológicas distintas: la estación *Arroyo la Vaina* y la estación *Malargüe Aero*. Mediante el método de los *Polígonos de Thiessen* se determinó el área de influencia de cada una, resultando la estación meteorológica más apropiada para el estudio la del *Arroyo la Vaina*. Considerando que esta estación sólo dispone de datos de precipitación se decidió utilizar los datos de temperatura de la estación meteorológica *Malargüe Aero* para el cálculo de evapotranspiración. La descripción de las Estaciones Meteorológicas mencionadas se presenta a continuación (YPF, 2009):

Tabla 31: Datos de las Estaciones Meteorológicas.

Estación Meteorológica	Arroyo la Vaina	Malargüe Aero
Provincia	Mendoza	Mendoza
Latitud	35° 55' 09.00'' S	35° 30' S
Longitud	69° 05' 24.00'' O	69° 34' 48,00'' O
Altitud (msnm)	1545	1426
Período x	1996-2006	1996-2006
Fuente	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Servicio Meteorológico Nacional

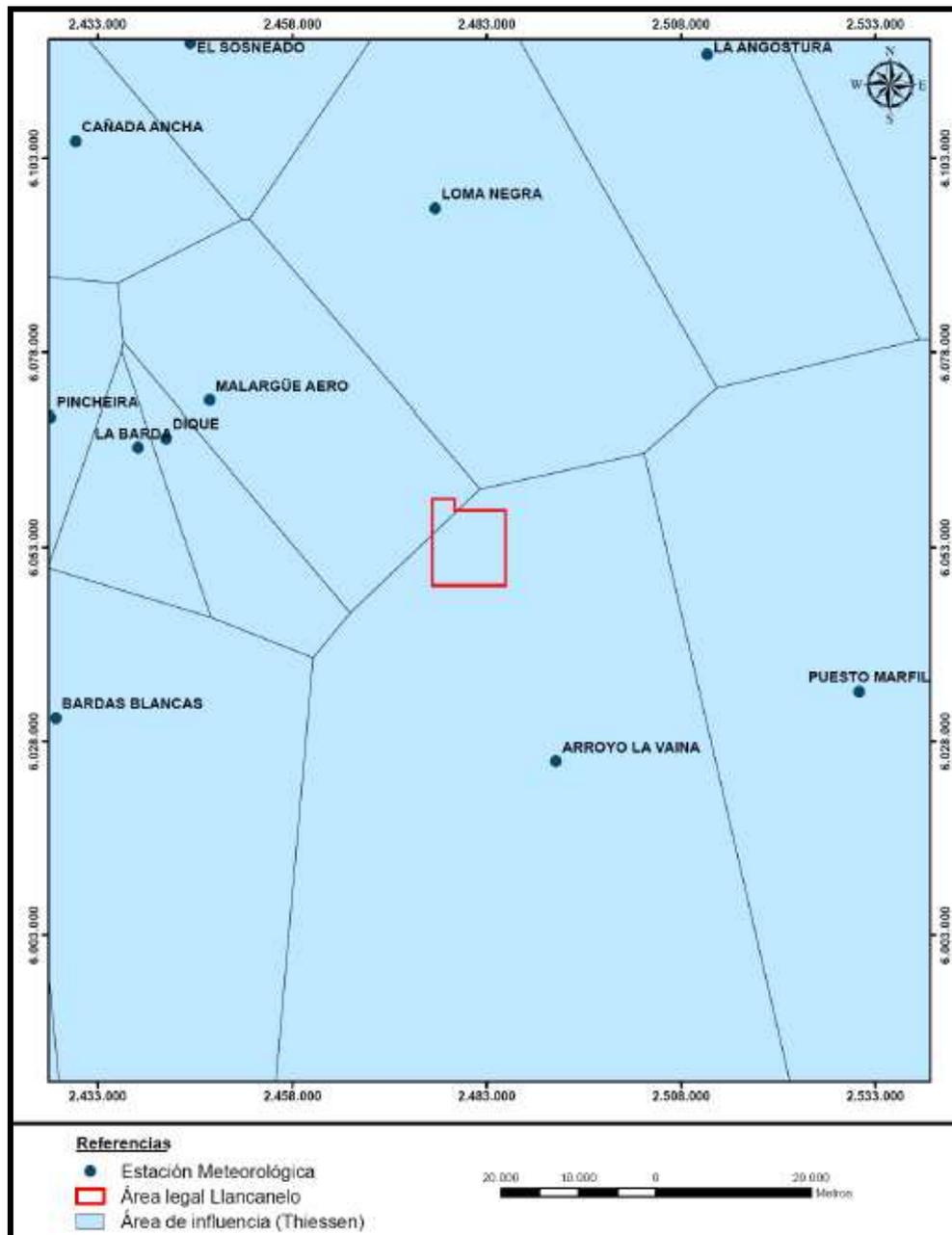


Figura 50: Determinación del área de influencia de las estaciones meteorológicas, según el método de los Polígonos de Thiessen. (Fuente: YPF, 2009)

A continuación se presentan las tablas de cálculo de la recarga potencial para cada zona. En las mismas se observa que los meses que más influyen en la recarga del acuífero son Junio, Julio y Agosto en los cuales se presentan mayores precipitaciones.

Tabla 32: Cálculo de la recarga potencial para la zona Norte.

Mes	Precipitación mensual (mm)	Zona con Follaje %	Retención en follaje Cf ₀	P*Cf ₀	Ret (mm)	Permeabilidad del suelo saturado fc (mm/día)	Pendiente media de la cuenca %	Coef. de Infiltración Textura del suelo Kfc	Coef. de Infiltración Pendiente Kp	Coef. de Infiltración por cobertura vegetal Kv	Coeficiente de infiltración Ci=Kp+Kv+Kfc	Pi = Ci*(P-Ret) (mm)	Escorrentía	ETP (mm)	
Enero	4,43	30	0,12	0,16	4,43	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	0,00	0,00	117,626	
Febrero	9,73	50	0,12	0,58	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	4,73	0,00	92,508	
Marzo	16,21	60	0,12	1,17	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	11,21	0,00	79,798	
Abril	24,11	60	0,12	1,74	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	19,11	0,00	45,971	
Mayo	46,24	60	0,12	3,33	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	41,24	0,00	26,214	
Junio	117,36	60	0,12	8,45	8,45	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	108,91	0,00	14,672	
Julio	60,33	60	0,12	4,34	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	55,33	0,00	14,439	
Agosto	71,44	60	0,12	5,14	5,14	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	66,30	0,00	21,187	
Septiembre	30,02	49,5	0,12	1,78	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	25,02	0,00	32,342	
Octubre	17,59	45	0,12	0,95	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	12,59	0,00	61,369	
Noviembre	8,53	45	0,12	0,46	5,00	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	3,53	0,00	79,179	
Diciembre	4,97	45	0,12	0,27	4,97	1296	12,00	0,99	0,08	0,16	1,00	0,00	0,00	108,210	
Mes	PM	Cc	Densidad aparente	Prof. Media raíces	PM	Cc	Hsi	C1 = (Hsi - PM + Pi)/(Cc - PM)	ETR1 = C1*ETP	C2 = (Hsi - PM+Pi- ETR1)/(Cc-PM)	ETPR = (C1+C2)/2*ETP	HD = Hsi + Pi - PM	ETR	Hsf = HD + PM- ETR	Rp = Pi + Hsi-Hsf - ETR
	(% en peso de suelo seco)			(m)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	1,000	117,626	-1,451	58,81	48,00	48,00	38,40	0,00
Febrero	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	38,40	0,099	9,116	-0,091	4,56	4,73	4,56	38,57	0,00
Marzo	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	38,57	0,237	18,922	-0,157	9,46	11,38	9,46	40,32	0,00
Abril	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	40,32	0,438	20,142	0,019	10,50	21,03	10,50	48,93	0,00
Mayo	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	48,93	1,079	26,214	0,533	20,09	51,77	20,09	70,09	0,00
Junio	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	70,09	2,929	14,672	2,623	14,67	140,60	14,67	86,40	77,93
Julio	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	2,153	14,439	1,852	14,44	103,33	14,44	86,40	40,89
Agosto	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	2,381	21,187	1,940	21,19	114,30	21,19	86,40	45,11
Septiembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	1,521	32,342	0,847	29,88	73,02	29,88	81,54	0,00
Octubre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	81,54	1,161	61,369	-0,117	30,68	55,73	30,68	63,45	0,00
Noviembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	63,45	0,595	47,144	-0,387	23,57	28,58	23,57	43,41	0,00
Diciembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	43,41	0,104	11,290	-0,131	5,64	5,01	5,01	38,40	0,00
	Recarga Total Anual:														163,93

Tabla 33: Cálculo de la recarga potencial para la zona Centro.

Mes	Precipitación mensual	Zona con Follaje	Retención en follaje Cf_0	$P * Cf_0$	Ret	Permeabilidad del suelo saturado f_c	Pendiente media de la cuenca	Coefficiente Infiltración Textura del Suelo K_{fc}	Coefficiente Infiltración Pendiente K_p	Coefficiente Infiltración Cobertura Vegetal K_v	Coefficiente de Infiltración $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$	$P_i = C_i * (P - Ret)$	Escurrimiento	ETP
	(mm)	%			(mm)	(mm/día)	%					(mm)		(mm)
Enero	4,43	15	0,12	0,08	4,43	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	0,00	0,00	117,626
Febrero	9,73	20	0,12	0,23	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	4,73	0,00	92,508
Marzo	16,21	20	0,12	0,39	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	11,21	0,00	79,798
Abril	24,11	20	0,12	0,58	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	19,11	0,00	45,971
Mayo	46,24	40	0,12	2,22	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	41,24	0,00	26,214
Junio	117,36	60	0,12	8,45	8,45	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	108,91	0,00	14,672
Julio	60,33	50	0,12	3,62	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	55,33	0,00	14,439
Agosto	71,44	50	0,12	4,29	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	66,44	0,00	21,187
Septiembre	30,02	30	0,12	1,08	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	25,02	0,00	32,342
Octubre	17,59	20	0,12	0,42	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	12,59	0,00	61,369
Noviembre	8,53	15	0,12	0,15	5,00	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	3,53	0,00	79,179
Diciembre	4,97	15	0,12	0,09	4,97	8640	14,00	1,00	0,08	0,11	1,00	0,00	0,00	108,210

Mes	PM	Cc	Densidad aparente	Prof. Media raíces	PM	Cc	Hsi	$C1 = (Hsi - PM + Pi) / (Cc - PM)$	$ETR1 = C1 * ETP$	$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1) / (Cc - PM)$	$ETPR = (C1 + C2) / 2 * ETP$	$HD = Hsi + Pi - PM$	ETR	$Hsf = HD + PM - ETR$	$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR$
	(% en peso de suelo seco)			(m)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	117,60	1,000	117,626	-0,750	58,81	67,20	58,81	58,79	0,00
Febrero	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	58,79	0,195	18,057	-0,074	9,03	13,12	9,03	54,49	0,00
Marzo	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	54,49	0,228	18,166	-0,043	9,08	15,30	9,08	56,62	0,00
Abril	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	56,62	0,377	17,325	0,119	11,40	25,33	11,40	64,33	0,00
Mayo	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	64,33	0,821	21,520	0,501	17,32	55,17	17,32	88,24	0,00
Junio	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	88,24	2,184	14,672	1,966	14,67	146,75	14,67	117,60	64,88
Julio	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	117,60	1,823	14,439	1,609	14,44	122,53	14,44	117,60	40,89
Agosto	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	117,60	1,989	21,187	1,673	21,19	133,64	21,19	117,60	45,25
Septiembre	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	117,60	1,372	32,342	0,891	30,58	92,22	30,58	112,04	0,00
Octubre	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	112,04	1,105	61,369	0,191	36,56	74,23	36,56	88,07	0,00
Noviembre	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	88,07	0,613	48,547	-0,109	24,27	41,20	24,27	67,33	0,00
Diciembre	6	14	1,4	0,6	50,40	117,60	71,66	0,316	34,228	-0,193	13,63	16,93	13,63	53,70	0,00

Recarga Total Anual: 151,03

Tabla 34: Cálculo de la recarga potencial para la zona Sur.

Mes	Precipitación mensual	Zona con Follaje	Retención en follaje C_f	$P * C_f$	Ret	Permeabilidad del suelo saturado f_c	Pendiente media de la cuenca	Coefficiente Infiltración Textura del Suelo K_f	Coefficiente Infiltración Pendiente K_p	Coefficiente Infiltración Cobertura Vegetal K_v	Coefficiente de Infiltración $C_i = K_p + K_v + K_f$	$P_i = C_i * (P - Ret)$	Escurrim.	ETP
	(mm)	%			(mm)	(mm/día)	%					(mm)		(mm)
Enero	4,43	15	0,12	0,08	4,43	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	0,00	0,00	117,626
Febrero	9,73	20	0,12	0,23	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	4,73	0,00	92,508
Marzo	16,21	20	0,12	0,39	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	11,21	0,00	79,798
Abril	24,11	30	0,12	0,87	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	19,11	0,00	45,971
Mayo	46,24	50	0,12	2,77	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	41,24	0,00	26,214
Junio	117,36	80	0,12	11,27	11,27	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	106,09	0,00	14,672
Julio	60,33	60	0,12	4,34	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	55,33	0,00	14,439
Agosto	71,44	70	0,12	6,00	6,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	65,44	0,00	21,187
Septiembre	30,02	50	0,12	1,80	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	25,02	0,00	32,342
Octubre	17,59	20	0,12	0,42	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	12,59	0,00	61,369
Noviembre	8,53	20	0,12	0,20	5,00	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	3,53	0,00	79,179
Diciembre	4,97	15	0,12	0,09	4,97	1296	11,00	0,99	0,08	0,11	1,00	0,00	0,00	108,210

	PM	Cc	Densidad aparente	Prof. Media raíces	PM	Cc	Hsi	$C1 = (Hsi - PM + Pi) / (Cc - PM)$	$ETR1 = C1 * ETP$	$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1) / (Cc - PM)$	$ETPR = (C1 + C2) / 2 * ETP$	$HD = Hsi + Pi - PM$	ETR	$Hsf = HD + PM - ETR$	$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR$
	(% en peso de suelo seco)			(m)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	1,000	117,626	-1,451	58,81	48,00	48,00	38,40	0,00
Febrero	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	38,40	0,099	9,116	-0,091	4,56	4,73	4,56	38,57	0,00
Marzo	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	38,57	0,237	18,922	-0,157	9,46	11,38	9,46	40,32	0,00
Abril	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	40,32	0,438	20,142	0,019	10,50	21,03	10,50	48,93	0,00
Mayo	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	48,93	1,079	26,214	0,533	20,09	51,77	20,09	70,09	0,00
Junio	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	70,09	2,870	14,672	2,565	14,67	137,78	14,67	86,40	75,11
Julio	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	2,153	14,439	1,852	14,44	103,33	14,44	86,40	40,89
Agosto	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	2,363	21,187	1,922	21,19	113,44	21,19	86,40	44,25
Septiembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	86,40	1,521	32,342	0,847	29,88	73,02	29,88	81,54	0,00
Octubre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	81,54	1,161	61,369	-0,117	30,68	55,73	30,68	63,45	0,00
Noviembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	63,45	0,595	47,144	-0,387	23,57	28,58	23,57	43,41	0,00
Diciembre	4	9	1,6	0,6	38,40	86,40	43,41	0,104	11,290	-0,131	5,64	5,01	5,01	38,40	0,00

Recarga Total Anual: 160,25

5.2.2.2. Mapa de Recarga Neta

Se le asignó el valor de la recarga, estimados anteriormente en cada zona, a los pozos ubicados dentro de las mismas. Luego se realizó una interpolación utilizando el método Kriging, con los puntos con los valores de recarga asignados, y así se obtuvo el mapa de recarga.

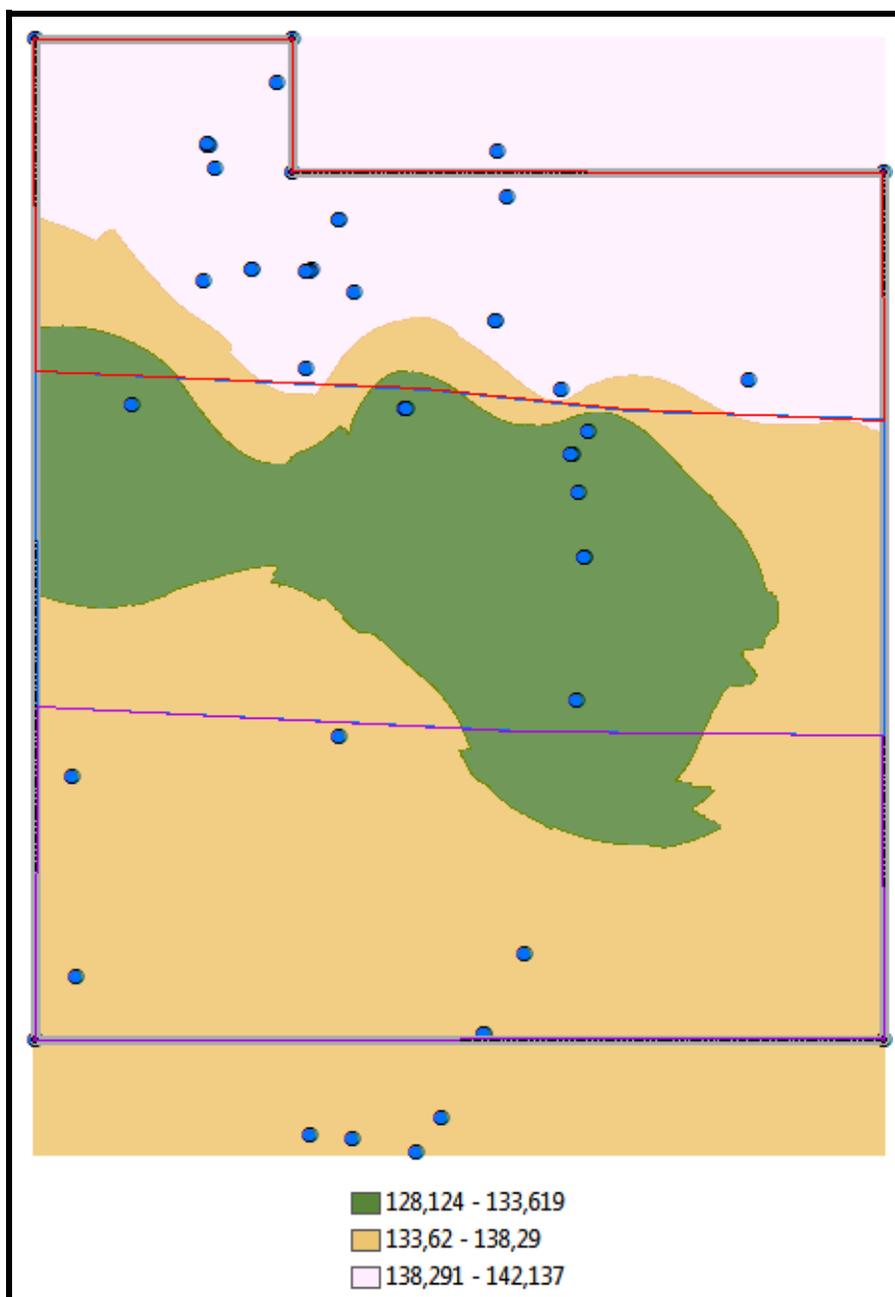


Figura 51: Representación del parámetro Recarga Neta. (Fuente: Elaboración propia).

Una vez obtenido este mapa se realizó una reclasificación del mismo para poder visualizarlo de acuerdo a los rangos establecidos para este parámetro y darle su valoración. Los resultados se muestran en la figura siguiente:

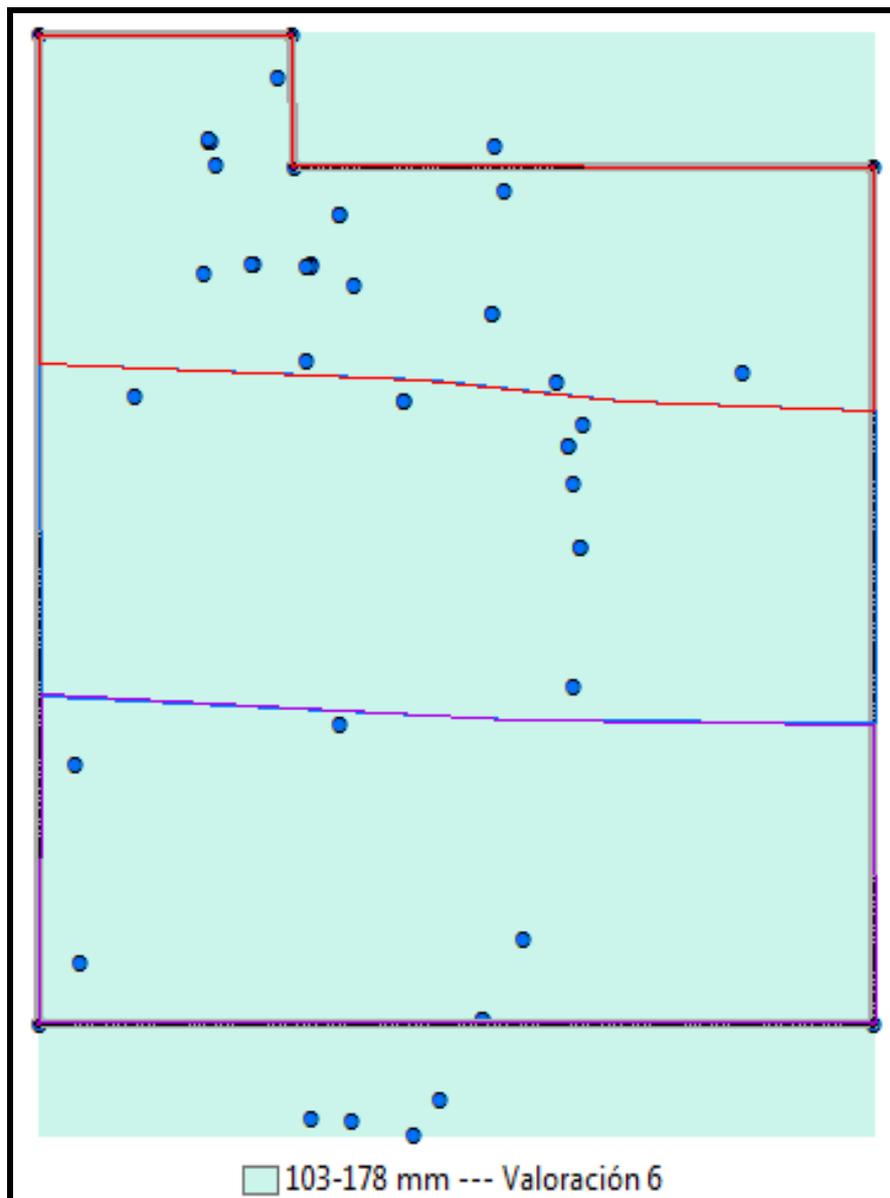


Figura 52: Reclasificación del parámetro R: Recarga Neta (Fuente: Elaboración propia).

La recarga estimada osciló entre los 151.03 mm/año (milímetros por año) y los 163.93 mm/año, esto indica una distribución uniforme de la misma dentro del área en estudio, encontrándose estos valores dentro del rango de valoración 6 de la reclasificación. Es por esto que la recarga no presentará variaciones espaciales.

5.2.3. Mapa de la Litología del Acuífero.

Como se dijo la región se caracteriza por la heterogeneidad estratigráfica producto de la intercalación de coladas lávicas y basálticas con depósitos de tipo aluvial y pedemontano.

La continuidad e interconexión entre las distintas capas no es claramente conocida, especialmente en los primeros metros de profundidad donde se aloja el acuífero freático y las primeras unidades confinadas o semiconfinadas.

Por no revestir interés para la explotación petrolífera existe poca información sobre los estratos en los primeros metros de profundidad, detallándose las mismas a partir de los 600 a 700m de profundidad.

Se utilizó una conceptualización que se realizó de la estratigrafía de la zona (Flores Nieto, 2013) en la cual se divide la misma en capas de profundidades progresivas y a su vez cada capa fue zonificada en áreas de transmisividad y permeabilidad semejantes.

Aquí se trabajó con el primer estrato correspondiente al nivel superficial y se extiende hasta los 20 m. de profundidad aproximadamente, abarcando el acuífero libre en cuestión compuesto principalmente de arenisca. En cuanto a sus propiedades hidráulicas se pueden distinguir claramente cuatro zonas:

Depósitos lacustres muy finos de baja permeabilidad en las proximidades de la laguna.

Depósitos fluviales en las adyacencias de los bañados del Carilauquen.

Afloramientos basálticos hacia el norte, en las proximidades del Cerro Trapal, y hacia el suroeste.

Depósitos eólicos en el resto del área de concesión.

En la figura siguiente se pueden apreciar la división de zonas:

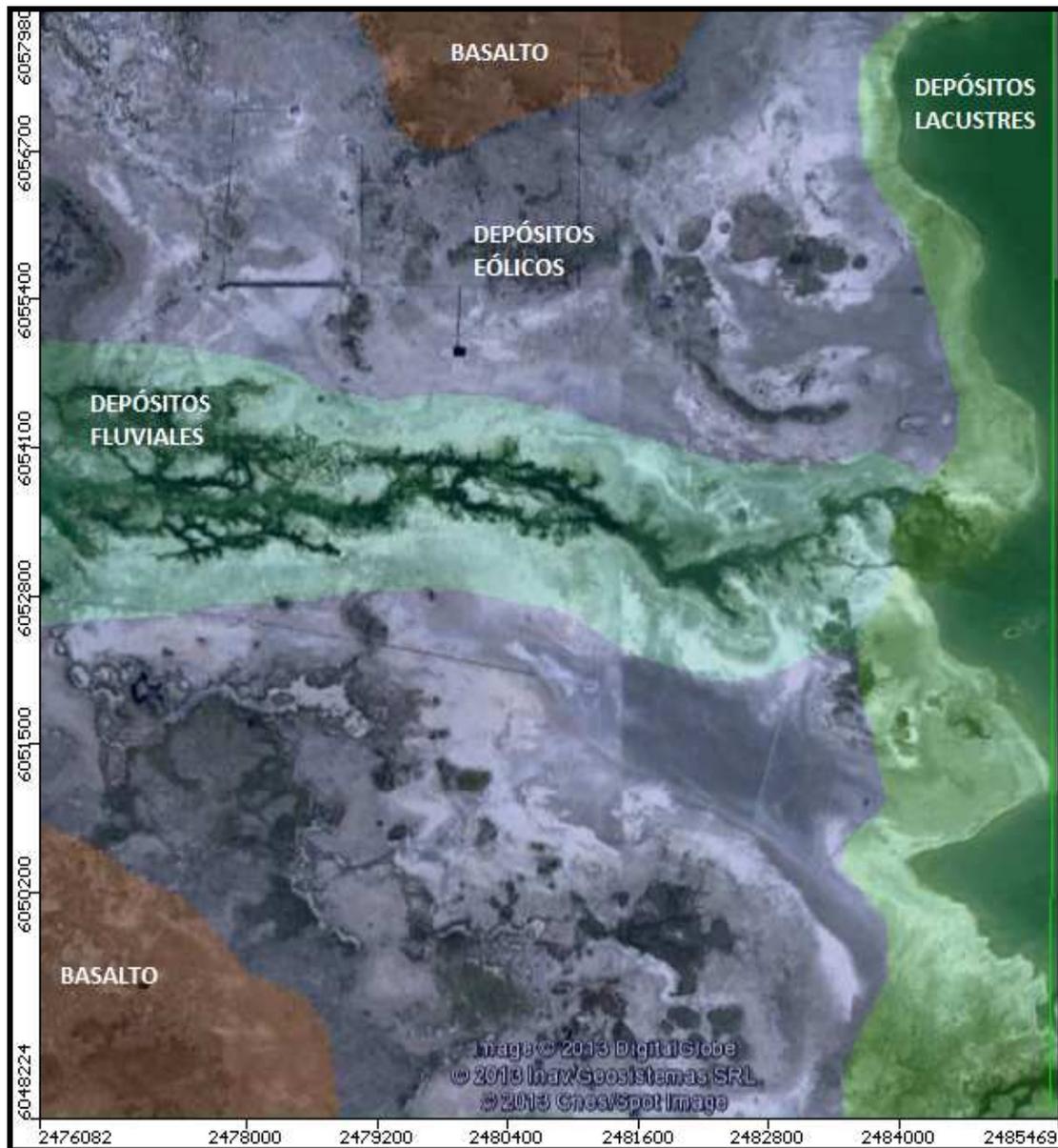


Figura 53: Zonificación de la litología del acuífero (Fuente: Flores Nieto, 2013).

Dado que este mapa no representa valor numérico, se realizó la valoración de la litología de acuerdo a la tabla 15. Con ello se obtuvo el nuevo mapa de valoración de la litología del acuífero.



Figura 54: Reclasificación del parámetro Litología del acuífero (A) (Fuente: Elaboración propia).

La valoración utilizada fue:

Depósitos lacustres..... Valoración entre 1 y 3, valor típico 2

Depósitos fluviales..... Valoración entre 4 y 9, valor típico 6

Afloramientos basálticos..... Valoración entre 2 y 10, valor típico 9

Depósitos eólicos..... Valoración entre 4 y 9, valor usado 4

Se destaca la valoración dada a los afloramientos basálticos, ya que un valor de 9 es muy alto, no obstante los estudios indican que estos afloramientos presentan un fuerte diaclasamiento que facilitarían la circulación del contaminante dentro del acuífero.

5.2.4. Mapa del Tipo de Suelo

A partir de la información obtenida en imágenes satelitales del sitio y en el Informe Preliminar y Estacional Invierno Llanquanelo llevado a cabo por YPF en Noviembre de 2008, en el que, se realizaron calicatas en las cuales, se caracterizó morfológicamente el perfil del suelo: horizontes, tipo y forma del límite entre horizontes, color, textura, estructura, etc.; se dividió la zona en estudio según la textura del mismo en distintas áreas. Se lo puede observar en la figura siguiente:

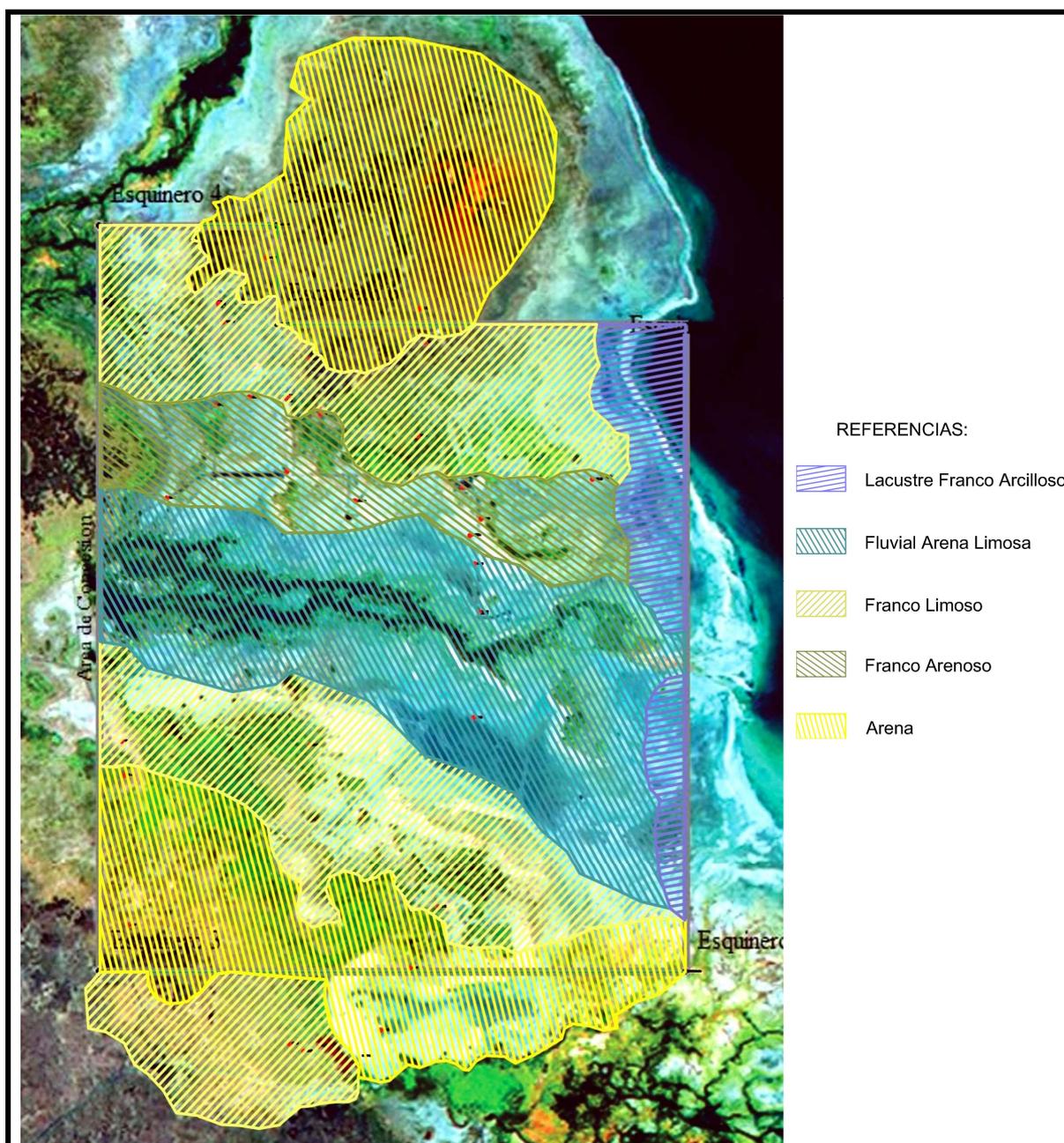


Figura 55: Zonificación según textura de suelo (Fuente: Elaboración propia)

Dado que este mapa no representa valor numérico se valoró el tipo de suelo de acuerdo a la tabla 16. Así se obtuvo el nuevo mapa de valoración de la cubierta edáfica bajo la superficie del terreno.

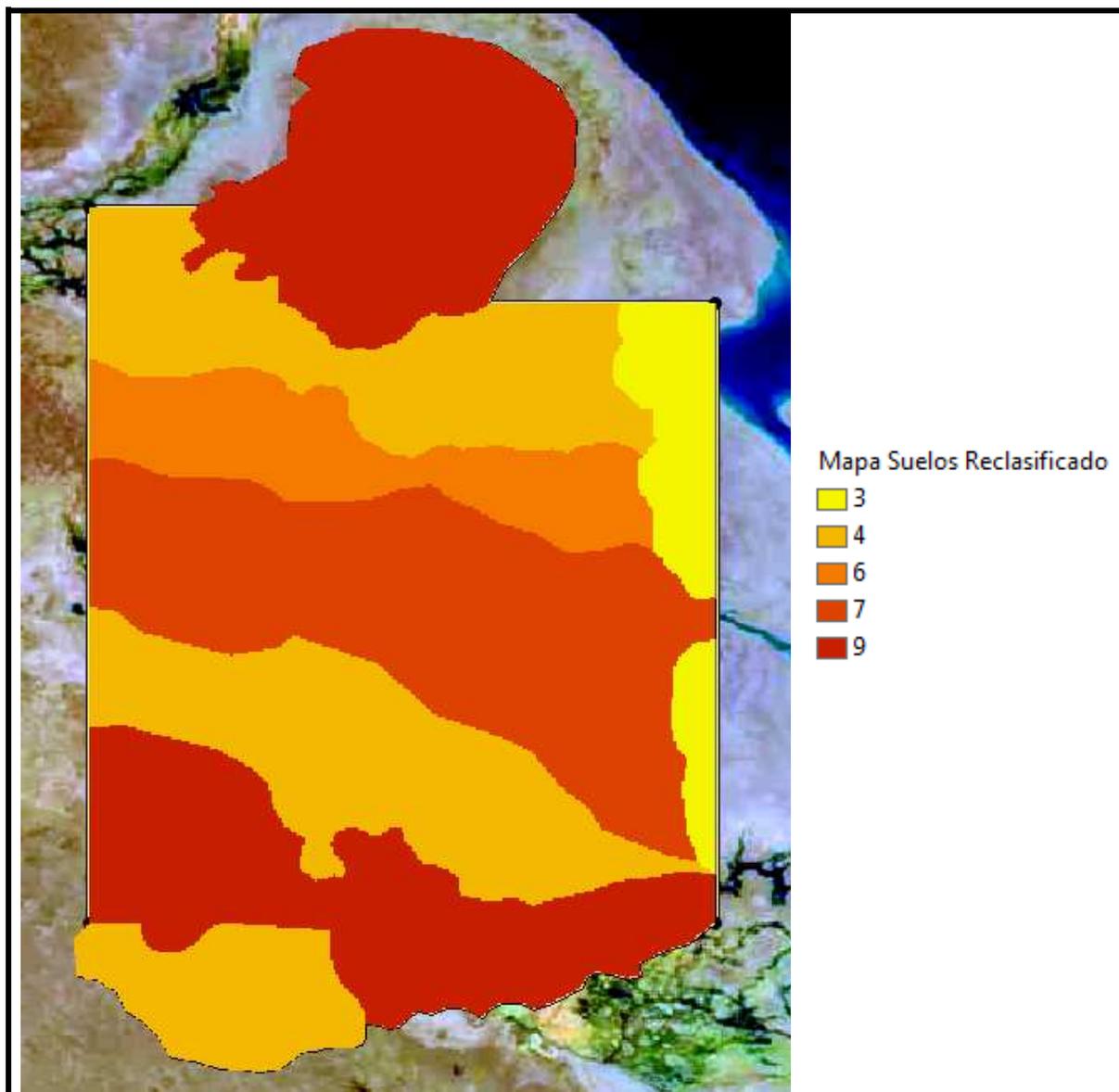


Figura 56: Reclasificación del parámetro S: Tipo de Suelo (Fuente: Elaboración propia).

Los valores utilizados en la reclasificación fueron:

Tabla 35: Valoración utilizada en los tipos de suelos encontrados en el área de estudio.

Tipo de Suelo	Valoración
Lacustre Franco arcilloso	3
Franco Limoso	4
Fluvial arena Limosa	6
Franco Arenoso	7
Arena	9

5.2.5. Mapa de la Topografía

El mapa de pendiente se obtiene a partir de un modelo digital del terreno o curvas de nivel.

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

El tipo de Modelo Digital del Terreno (MDT) más conocido es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), un caso particular de aquel, en el que la variable representada es la cota del terreno en relación a un sistema de referencia concreto, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo Raster con estructura regular.

Existe una variedad de datos de DEM disponible para áreas desarrolladas. En regiones donde se dispone de pocos o ningún dato de referencia, el DEM puede producirse por una extracción automática DEM de las escenas en estéreo del satélite a partir de los siguientes sensores satelitales:

Tabla 36: sensores satelitales

Sensor satelital	Resolución DEM
ASTER	15-25 metros
SPOT	5-10 metros
IKONOS	2-5 metros

También puede proporcionarse el DEM de fotografías aéreas digitales en estéreo a varias resoluciones dependiendo de la calidad y escala de la fotografía aérea. Cuando las nubes afectan la calidad de las imágenes, el DEM se extrae de mapas topográficos existentes o se adquiere por otras técnicas de detección a distancia tales como interferometría de radar. Para DEMs de alta resolución con una precisión de +/- 0.20 metros, se utiliza la tecnología Detección de Luz y Rayo Láser (LIDAR).

En este caso se trabajó sobre una imagen ASTER GLOBAL DEM descargada de la web de la página del US Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), que se observa en la figura siguiente:

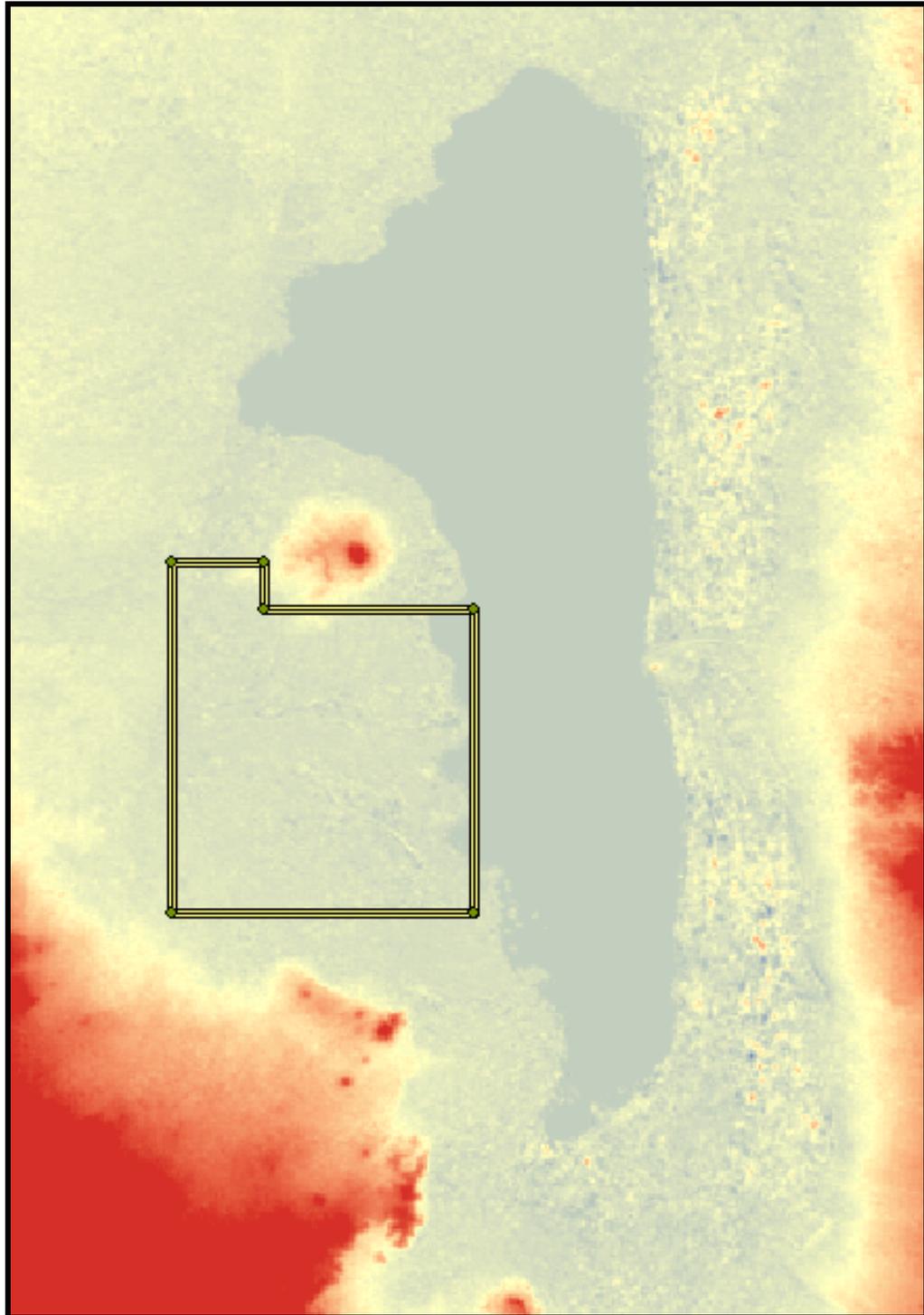


Figura 57: Imagen ASTER GDEM. (Fuente: <http://earthexplorer.usgs.gov>)

El GDEM ASTER cubre el 99 por ciento de la masa de la Tierra. Cada punto de elevación en las imágenes GDEM ASTER se encuentra a un intervalo de 30 m (98 pies). Es decir, la resolución espacial de las GDEM ASTER es de 30 m (tamaño de pixel). (Buis, 2011)

A un modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio, se le aplicó la función Slope de la herramienta Spatial Analyst la cual permite realizar un mapa de la variación de la pendiente del terreno. Con ello se obtuvo el mapa siguiente:

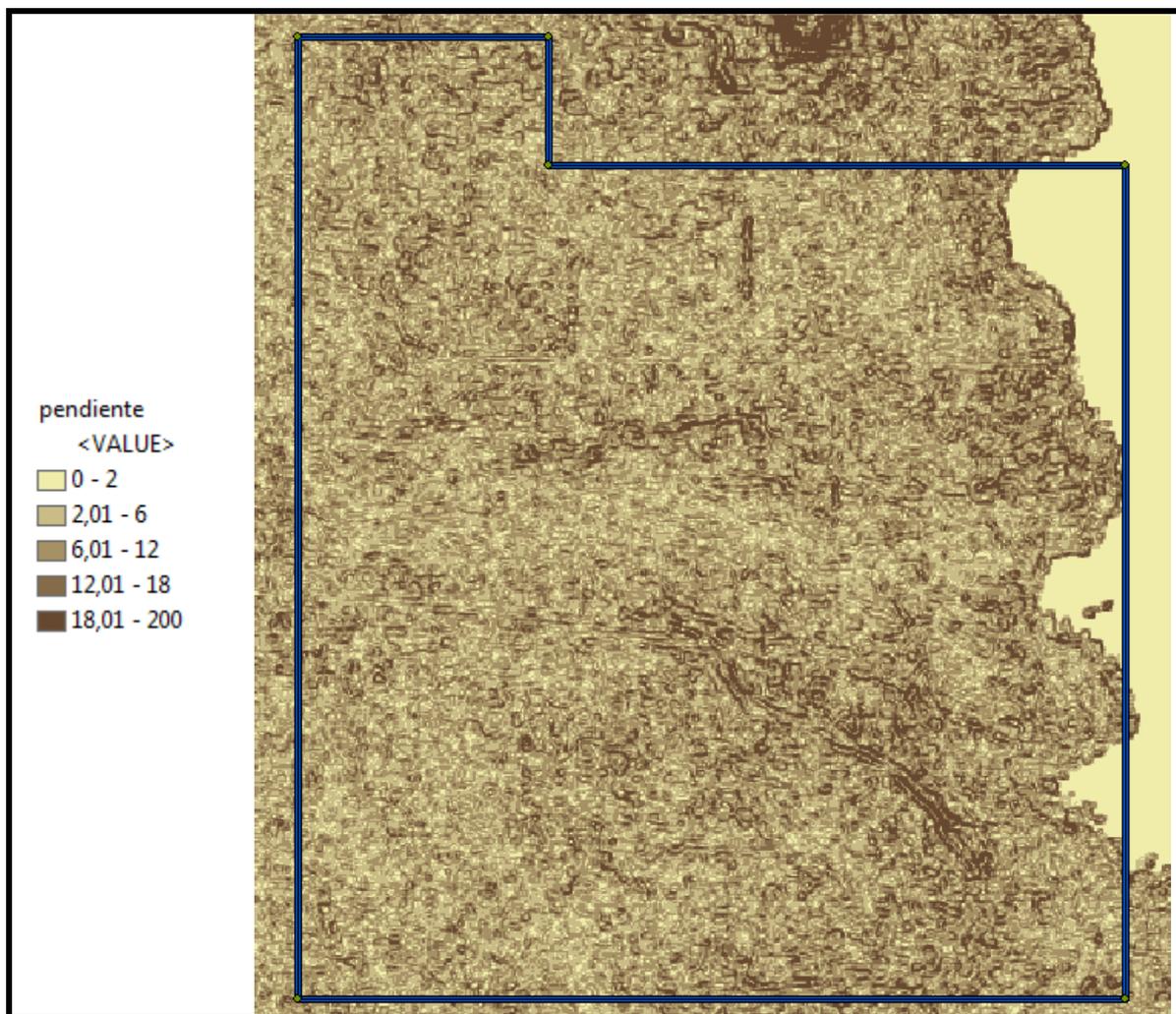


Figura 58: Representación del parámetro Topografía del terreno (T) (Fuente: Elaboración propia).

Luego se reclasificó este mapa para obtener el nuevo mapa de valoración de la pendiente del terreno de acuerdo a la tabla 17.

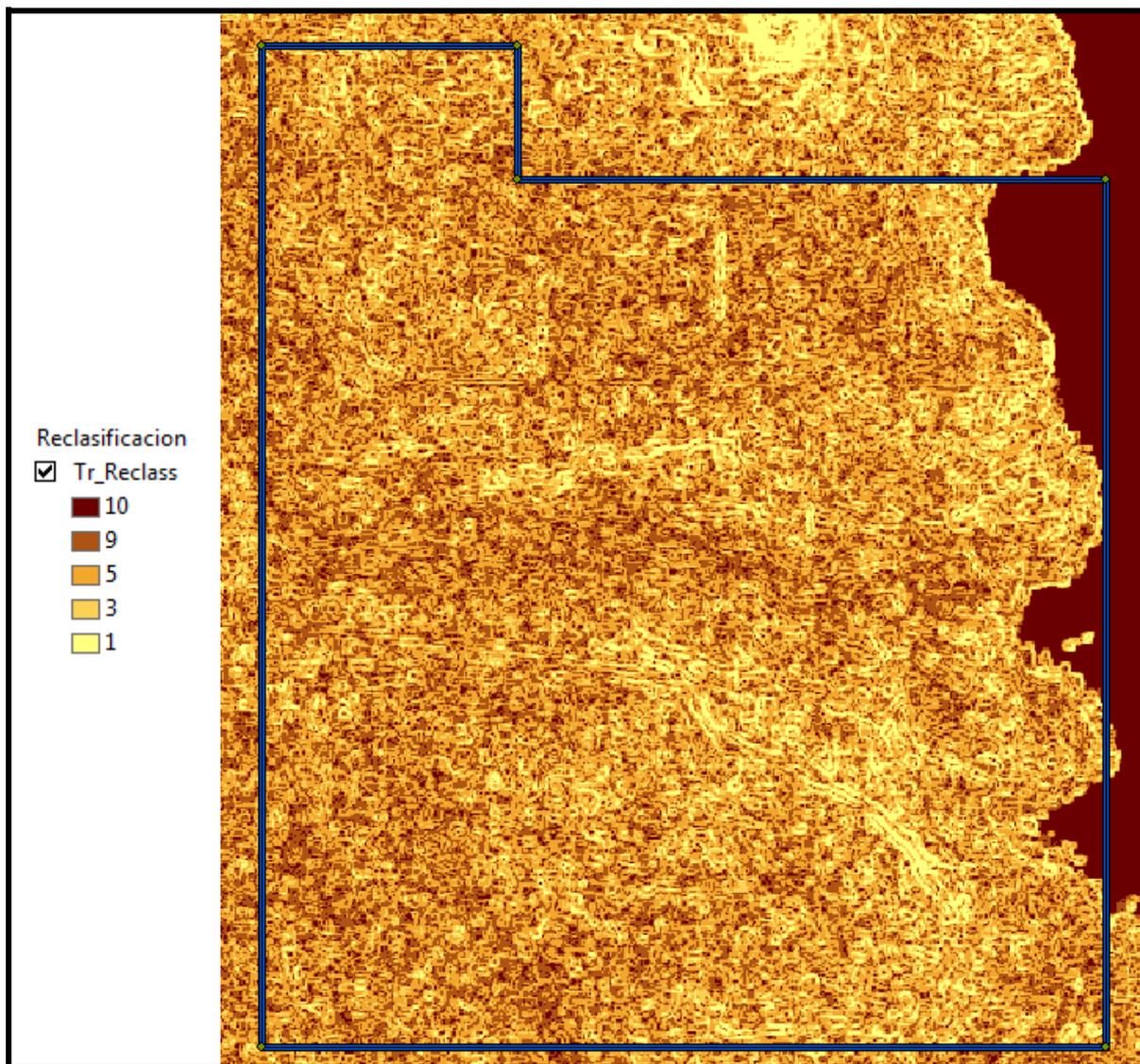


Figura 59: Mapa de valoración de la pendiente del terreno de acuerdo a los valores consignados en la tabla 17(Fuente: elaboración propia).

5.2.6. Mapa de la Litología de la zona no Saturada

Al igual que con la Litología del acuífero, se asignan rangos a los distintos tipos de material y se dan valores típicos.

Existe poca información sobre los estratos en los primeros metros de profundidad.

Teniendo en cuenta esto y debido a que el acuífero se encuentra a poca profundidad se consideró a este parámetro equiparable al parámetro A. Es decir no se efectuó una distinción entre litología del acuífero y litología de la zona no saturada, por lo que se realizó la misma zonificación para la construcción del mapa de la litología de la zona no saturada y luego se le asignó a ésta la valoración dada por la tabla 18.

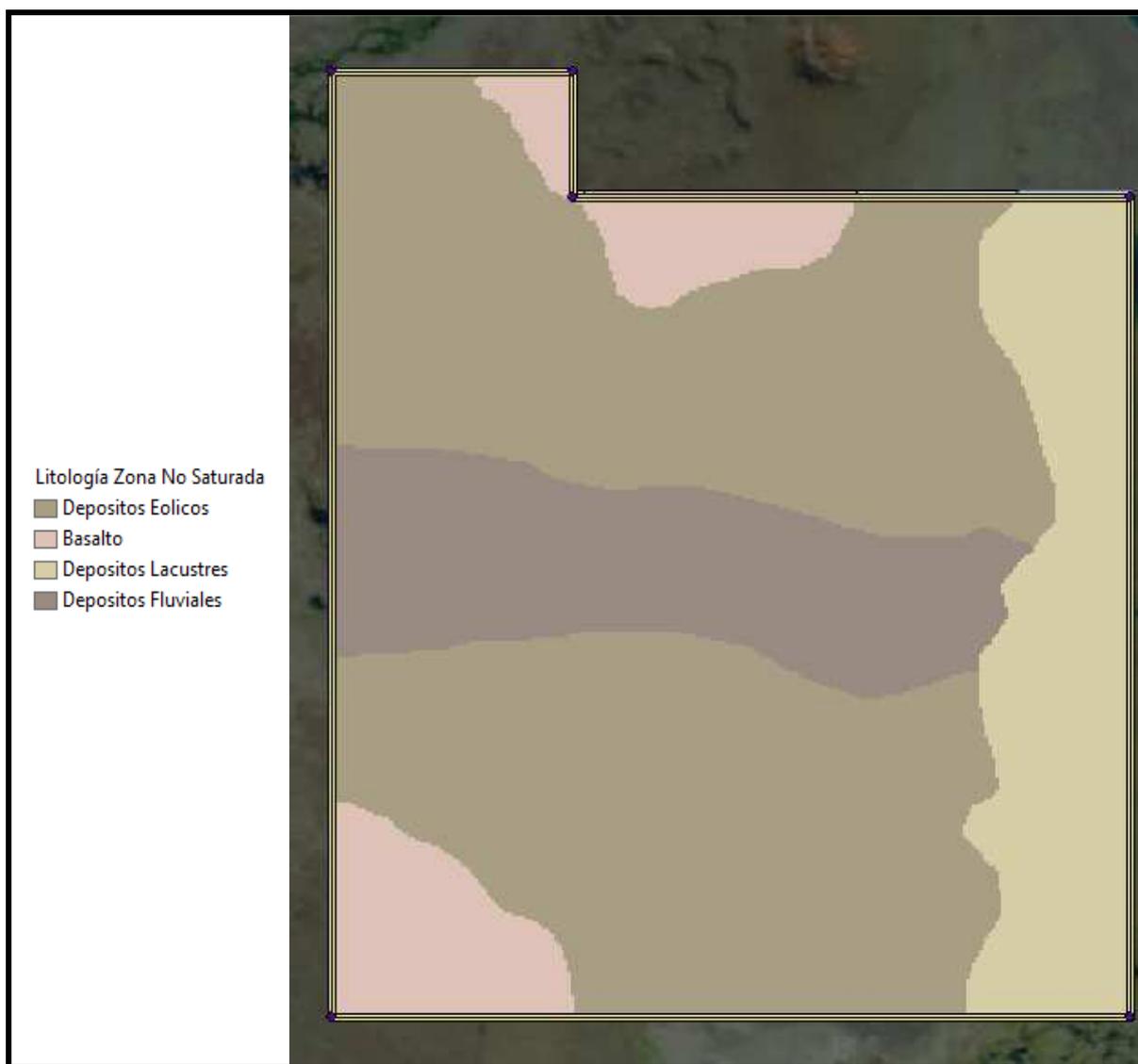


Figura 60: Representación del parámetro I: Litología de la Zona No Saturada (Fuente: Elaboración propia).



Figura 61: Mapa de la Litología de la Zona No Saturada reclasificado de acuerdo a los rangos de la tabla 18.

Los valores utilizados en la reclasificación fueron:

Tabla 37: Valoración utilizada en los tipos de suelos encontrados en el área de estudio.

Tipo de Suelo	Valores Típicos	Valoración
Depósitos Lacustres (limo / arcilla)	1-2	2
Depósitos Eólicos (Arenisca)	4-9	4
Depósitos Fluviales (Grava y Arena)	6-9	6
Basalto	2-10	9

5.2.7. Mapa de la Conductividad

Los valores de conductividad hidráulica empleados son los ya presentados en la tabla 29 utilizando la misma conceptualización de la estratigrafía mencionada anteriormente.

Tabla 38: Valores de Conductividad hidráulica (Fuente: Flores Nieto, 2013).

CONDUCTIVIDAD	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
Depósitos fluviales	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04
Depósitos eólicos	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05
Depósitos lacustres	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
Basalto	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05

El mapa resultante es el siguiente:

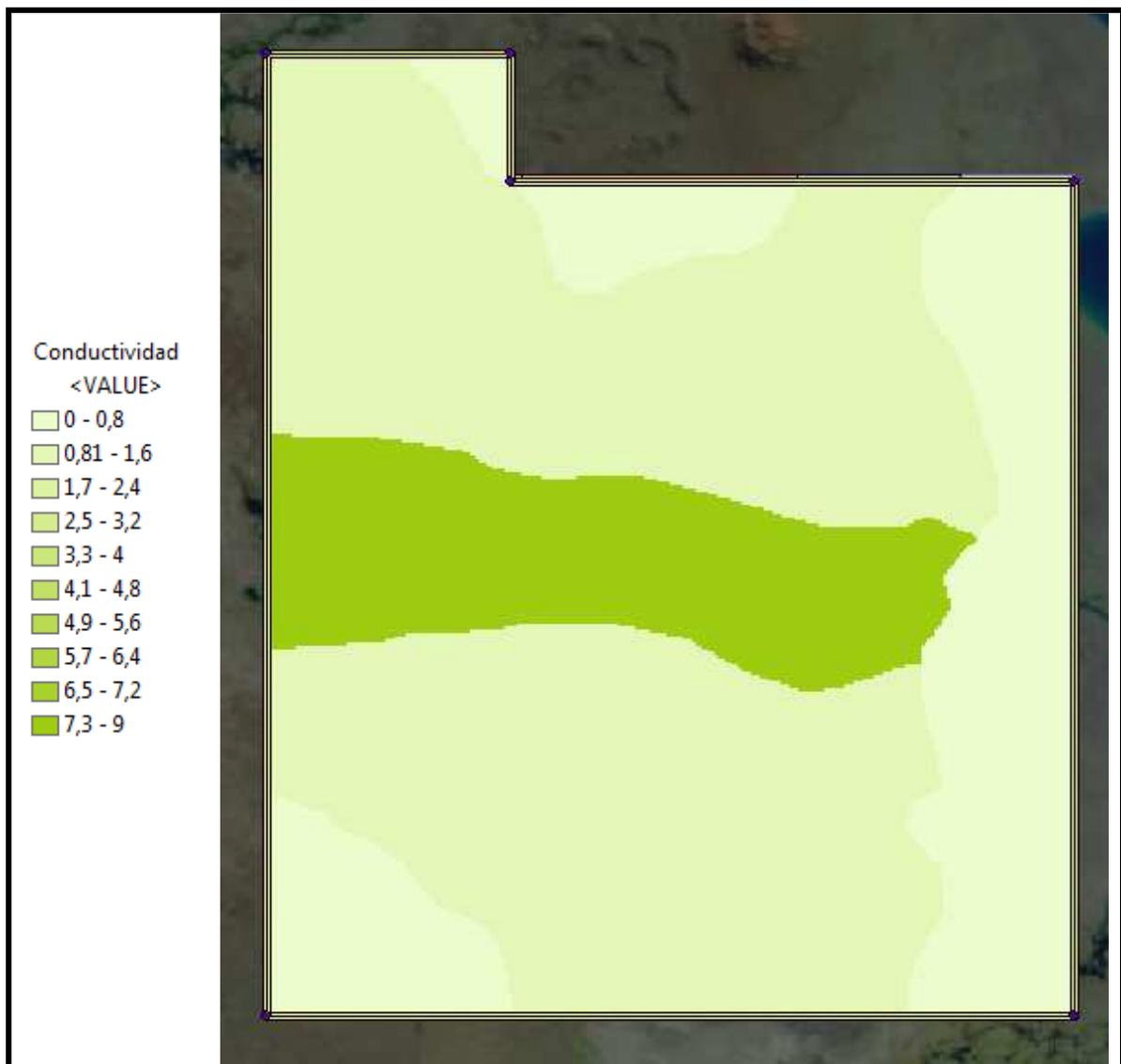


Figura 62: representación del parámetro C: Conductividad (Fuente: Elaboración propia).

Una vez confeccionado el mapa de variación de la conductividad hidráulica se lo reclasificó para obtener los rangos y su valoración indicados en la tabla 19.

Para lograr esto se utilizó el comando Reclassify de la herramienta Spatial Analyst con la cual se cambiaron los valores extremos de los rangos para colocar los correspondientes a los consignados en la tabla mencionada. Luego se introdujo la valoración dada a estos nuevos rangos indicada por el método y así se obtuvo el mapa reclasificado para la conductividad hidráulica, presentado en la figura siguiente:

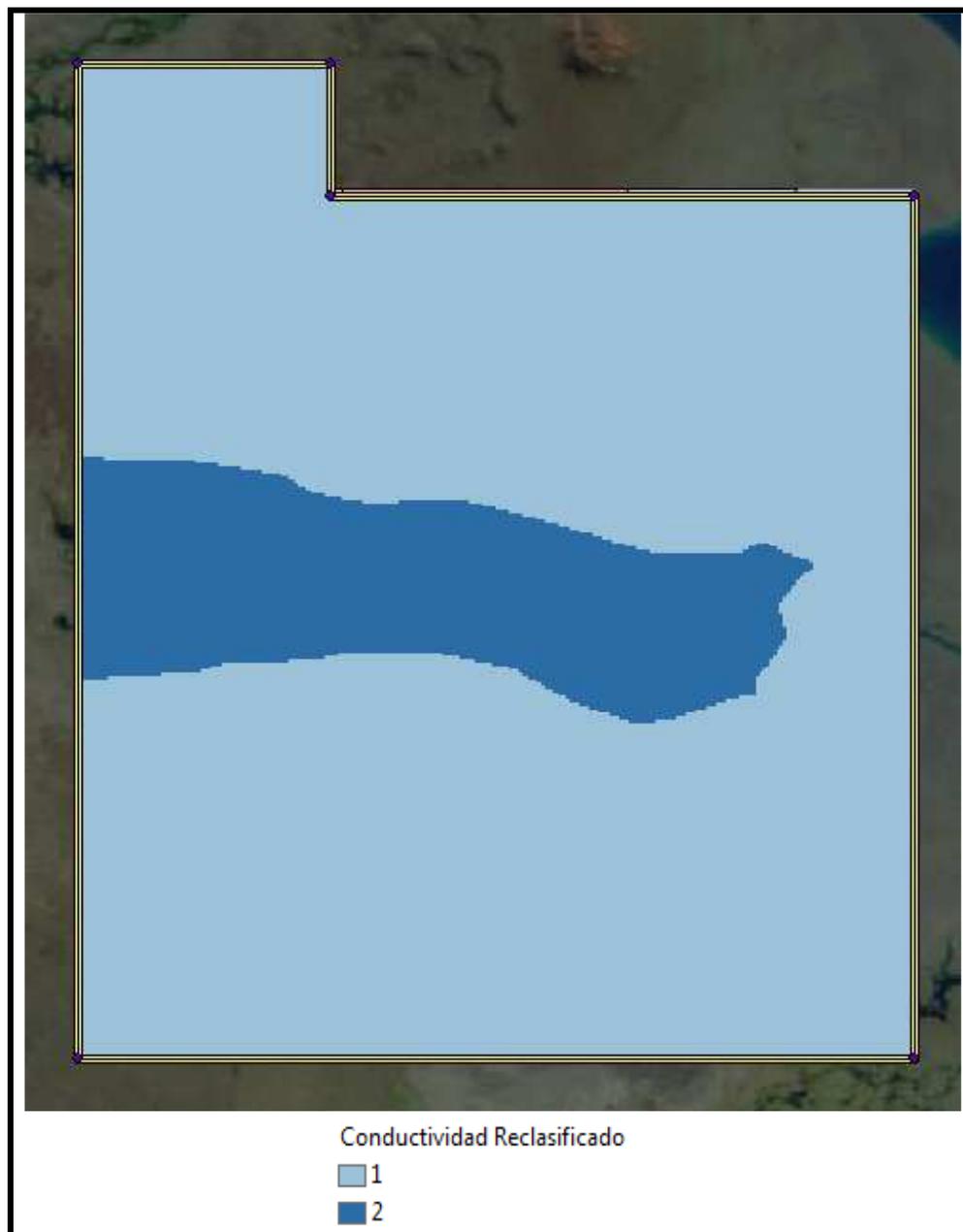


Figura 63: Mapa de Conductividad reclasificado según tabla 19 (Fuente: Elaboración propia).

De igual manera que con el parámetro D (profundidad de la capa freática) la distribución espacial en el mapa de reclasificación es prácticamente uniforme, presentando así escasa influencia dentro del modelo.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

6.1. RESULTADOS

Como ya se presentó la vulnerabilidad puede evaluarse a partir de la siguiente ecuación de la cual obtenemos el *Índice de Vulnerabilidad*:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = (Dw \cdot Dr) + (Rw \cdot Rr) + (Aw \cdot Ar) + (Sw \cdot Sr) + (Tw \cdot Tr) + (Iw \cdot Ir) + (Cw \cdot Cr). \quad (\text{Ecuación 1}).$$

Donde:

Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw y Cw corresponden a la ponderación de cada uno de parámetros o factores señalados anteriormente.

Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir y Cr corresponden a la reclasificación o valoración interna de cada parámetro de acuerdo a la variabilidad de la propiedad.

El mapa de vulnerabilidad del área de estudio se obtuvo de multiplicar cada uno de los mapas reclasificados obtenidos por el peso de cada parámetro dentro del modelo, teniendo un rango que fluctúa de 22 a 220 puntos que son los valores mínimo y máximo extremos que puede alcanzar el índice de acuerdo a los puntajes asignados por el Modelo.

Para obtener este mapa se realizó el álgebra de mapas. En primer lugar, se efectuó la suma ponderada de todos los parámetros o mapas obtenidos utilizando la herramienta Raster Calculator.

En este caso el rango de variación obtenido para el índice de Vulnerabilidad fue de 100 a 177. En la figura siguiente se muestra la variación espacial de este índice en el área de estudio.

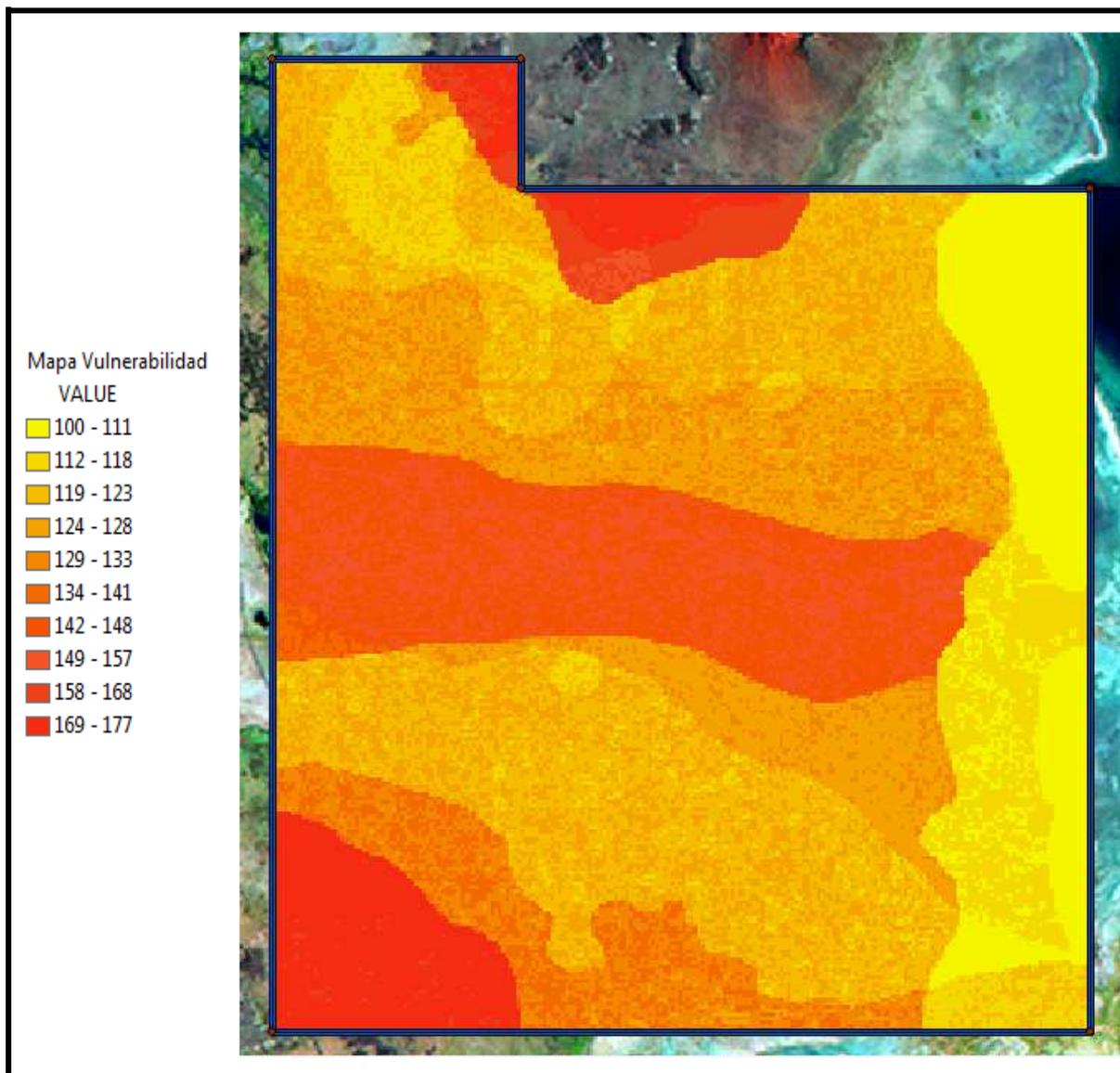


Figura 64: Distribución espacial del índice de vulnerabilidad.

Luego se reclasificó el resultado o Raster obtenido de acuerdo a los rangos que aparecen en la tabla 20. De acuerdo a esta tabla “1 corresponde a vulnerabilidad muy baja, 2 a baja, 3 a moderada, 4 a alta y 5 a muy alta”, por lo tanto el mapa de vulnerabilidad se transforma en el siguiente:

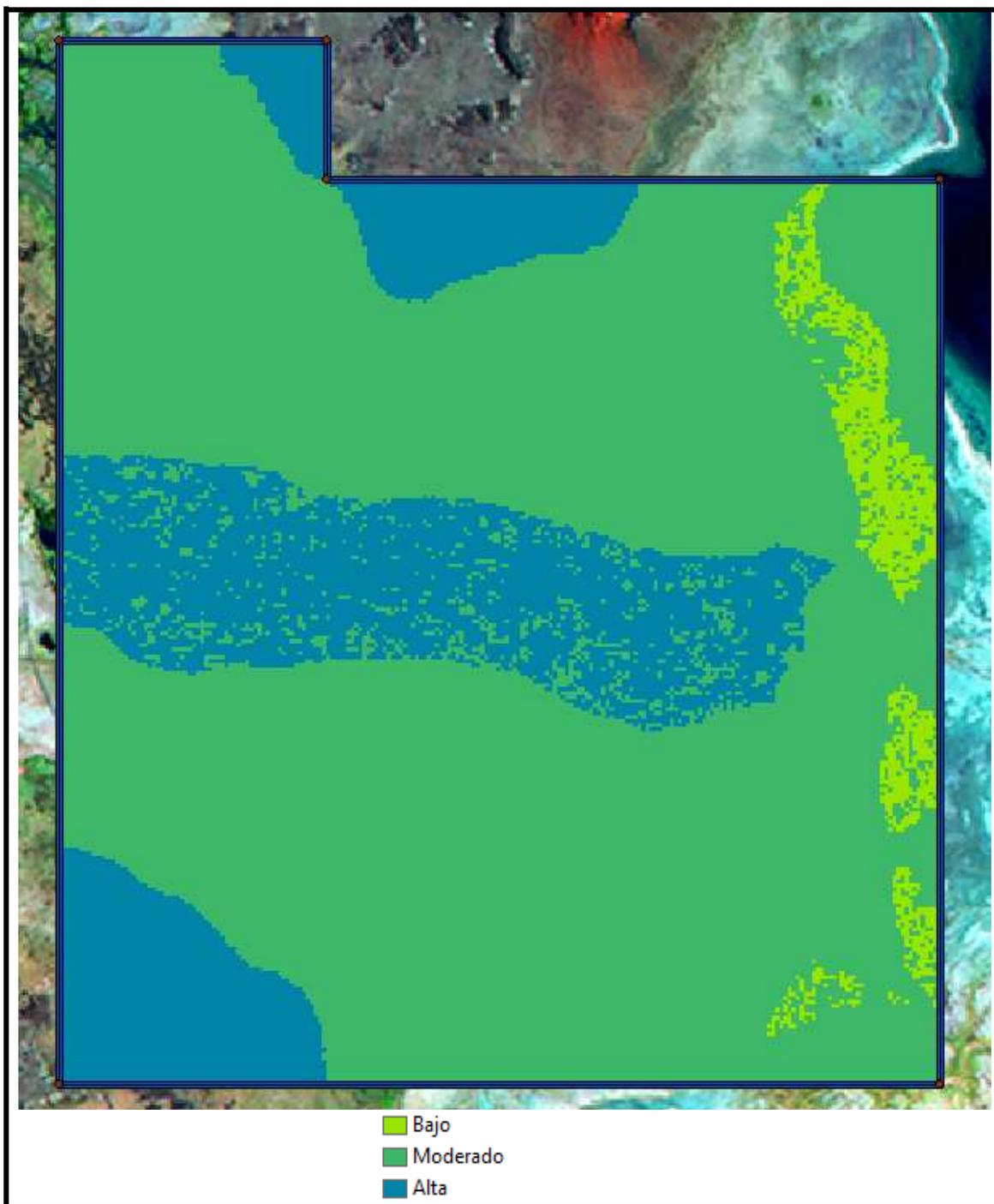


Figura 65: Mapa de Índice de Vulnerabilidad reclasificado de acuerdo a los rangos de la tabla 20.

6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

En el área de estudio la profundidad del nivel freático se encuentra entre valores de 0,00 m (metros) y los 2.9 m, con una profundidad media de 0.86 m. En general, toda la cuenca presenta niveles freáticos cercanos a la superficie, tomando el parámetro D valores de 9 y 10. La recarga estimada osciló entre los 151.03 mm/año (milímetros por año) y los 163.93 mm/año, esto indica una distribución uniforme de la misma dentro del área en estudio, encontrándose estos valores dentro del rango de valoración 6 de la reclasificación. En lo que respecta a la litología del acuífero y al impacto de la zona no saturada se generaron valores comprendidos entre 2 y 9, para los tipos de suelos los valores se encontraron dentro de un rango de entre 3 y 9, las pendientes oscilan entre 0 y 189 % lo que arrojó valores de reclasificación de entre 10 y 1. Por último en cuanto a la conductividad hidráulica los valores estuvieron incluidos en un rango cuyos extremos son 0.0864 m/día (metros por día) y 8.64 m/día cuya valoración corresponde a 1 y 2.

El índice DRASTIC en el área de concesión se encontró entre 100 y 177. La vulnerabilidad a la contaminación obtenida mediante el este índice se presentó en gran parte del área de la cuenca como Moderada, en sectores donde se presentan Basaltos y el sector cercano a los Bañados de Carilauquen la vulnerabilidad se manifestó como Alta y en pequeños sectores cercanos a la laguna como vulnerabilidad Baja.

Alta Vulnerabilidad: se caracteriza por tener condiciones geológicas de baja capacidad de atenuación al transporte de los contaminantes, debido al grado de fracturación y permeabilidad del material litológico presente en el área. Somera profundidad del agua, esta es constante en toda el área de estudio, reducido espesor del suelo, porcentaje de pendiente bajo, lo que permite mayor permanencia del agua en los suelos facilitando la infiltración y el transporte de contaminantes.

Moderada Vulnerabilidad: esta área se caracteriza por materiales moderadamente finos que dificultan el ingreso del contaminante al acuífero, suelos de textura media a fina y mediana compactación. Estas características permiten una moderada capacidad de atenuación al transporte de contaminantes con relación a la zona de alta vulnerabilidad.

Baja vulnerabilidad: Se caracteriza por presencia de materiales compactados de baja permeabilidad, suelos finos. Estas características califican al área como la de mayor capacidad de atenuación al transporte de contaminantes.

Analizando en mapa reclasificado de la vulnerabilidad se observa que la zona de vulnerabilidad baja se encuentra cercana a la laguna, esto se debe a la baja valoración dada a los parámetros litología de la zona no saturada y tipo de suelo.

El nivel piezométrico del acuífero libre acompaña a la superficie del terreno y en términos generales es menor a los 3 m de profundidad. Esto permite determinar que el nivel de agua de este acuífero tiene un gradiente mínimo. Este bajo gradiente y los sedimentos que tienden a hacerse más finos hacia la laguna, determinan la lentitud de la escorrentía subterránea en el sector y los caudales relativamente bajos aunque muy importantes para la vida de la laguna cuando faltan los aportes superficiales (Flores Nieto, 2013). Es decir, la disminución de la granulometría de los sedimentos al acercarse a la laguna determina la disminución del índice de Vulnerabilidad en esta zona, traduciéndose en un obstáculo para el ingreso del contaminante al acuífero.

No obstante, la superficie de la laguna fluctúa estacionalmente de acuerdo al agua que a ella llegue, generándose así una variación significativa en las hectáreas que ocupa. Con

un aumento de escasos centímetros en las cotas absolutas de su pelo de agua superficial, se denotan aumentos de superficie muy significativos.

Es por esto que en las épocas de importantes aportes de agua hacia la laguna el nivel freático tiende a elevarse, acercándose o coincidiendo con la superficie del terreno, perdiéndose así la capa protectora que le confiere la zona no saturada. De esta manera el índice de vulnerabilidad llegaría a valores muy elevados quedando esta zona clasificada como de vulnerabilidad elevada.

En cuanto a las perforaciones existentes dentro del área de concesión la figura siguiente muestra su ubicación respecto al mapa de vulnerabilidad.

Aunque el nivel freático presenta en su mayoría moderada susceptibilidad intrínseca a ser afectados por la contaminación, por lo que muchos de los pozos se encuentran dentro de ella, existen varios que se encuentran cercanos o dentro de zonas de vulnerabilidad alta, por lo que se recomendaría extremar cuidados en la operación de estas perforaciones.

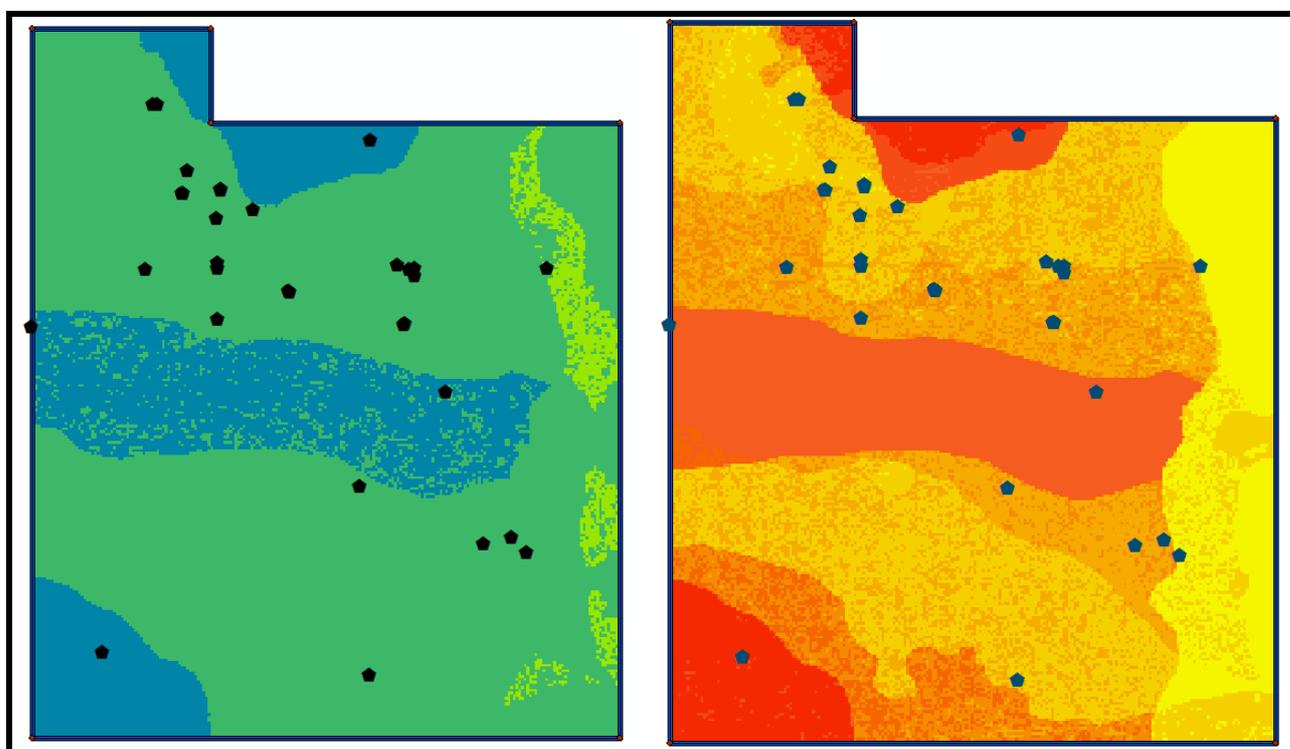


Figura 66: Ubicación de los pozos existentes dentro del área de concesión

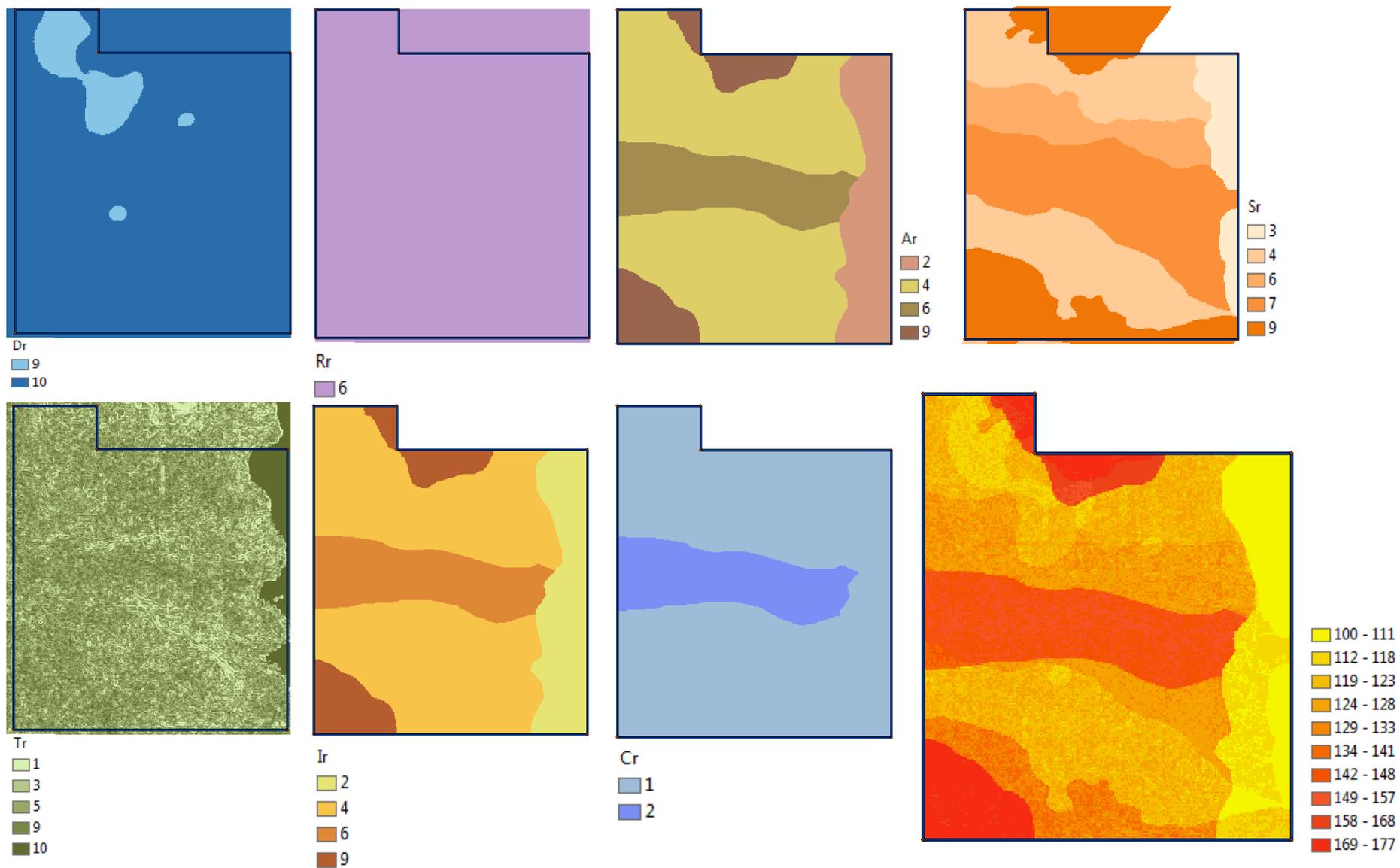


Figura 67: Conjunto de mapas obtenidos en la aplicación del método DRASTIC en la zona de estudio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

A través de la confección de un mapa de vulnerabilidad sobre el área del Bloque de concesión Llanquanelo por medio del método DRASTIC, se lograron visualizar y distinguir zonas con distintos grados de vulnerabilidad intrínseca de acuífero.

Ya se mencionó que la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación se define como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente por una carga contaminante, entendiéndose que la carga contaminante es una amenaza, que la vulnerabilidad intrínseca es independiente de la intensidad y aplicación de esta carga y que el bien a proteger es el agua subterránea. Cuando además de las características físicas e hidrológicas del medio, se toma en cuenta la incidencia de sustancias contaminantes, la vulnerabilidad se denomina específica.

El mayor problema en la aplicación de cualquiera de las metodologías expuestas en Capítulo 3, es la “incertidumbre” de la valoración de la contribución real de cada uno de los factores o parámetros. Adicionalmente la evaluación de la vulnerabilidad presenta siempre un componente de subjetividad que puede acentuarse en la medida que haya que asumir los valores de algunos los parámetros.

Se puede establecer que los resultados obtenidos de la modelación son cualitativamente aceptables, sin embargo se evidencia escasez de información y un grado de confiabilidad relativamente bajo en algunos datos, particularmente en lo que refiere a los parámetros hidrogeológicos.

No obstante esta limitación, los resultados a nivel general son aceptables y permiten extraer conclusiones de interés.

- A más de 30 años de la introducción del término vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, aún se discute la definición y el alcance del mismo. En este sentido, la mayoría de los autores considera a la vulnerabilidad una propiedad cualitativa, que indica el grado de protección natural de un acuífero respecto a la contaminación y en general, termina calificándola como baja, media, o alta, a veces con el agregado de muy alta y muy baja.
- Existen numerosas metodologías para cualificar la vulnerabilidad y permitir su mapeo a diferentes escalas, la gran mayoría desarrolladas para acuíferos libres. La elección de uno u otro método depende de varios factores entre los que se destacan: difusión y alcance de la metodología, información disponible, alcance de la evaluación y validación de resultados.
- No existe una única metodología recomendable para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, debido a que se pueden obtener diferentes resultados para un mismo acuífero, con un mismo nivel de información.
- Los sistemas como el GIS ofrecen herramientas que permiten almacenar gran cantidad de información y procesarla rápidamente, para obtener productos actualizados areal y temporalmente.
- La cartografía de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, su objetivo es conservar y proteger los recursos hídricos subterráneos, con el fin de restringir vertimientos

potencialmente contaminantes o determinados usos del suelo, que representen una amenaza para la calidad natural de las aguas subterráneas.

- La zona en estudio presenta localización superficial del acuífero libre y suelos con buena capacidad de drenaje por su composición granulométrica particularmente en las zonas de elevada vulnerabilidad. Su uso actual está abocado a la explotación petrolífera, por ello, podría presentar elevado riesgo de contaminación por hidrocarburos. Dicho riesgo toma relevancia al ser una zona muy cercana a una reserva natural.
- El modelo permitió diferenciar zonas de distinta vulnerabilidad y determinar la influencia del comportamiento particular de los distintos parámetros en la zona de estudio.
- Se evidencia la importancia del espesor y características del manto sedimentario en la protección del acuífero en las cercanías de la laguna.
- Dado que algunos de estos componentes son dinámicos (posición de la freática, recarga), la vulnerabilidad de un mismo sitio puede variar temporalmente.
- En las cercanías del Arroyo Carilauquen la granulometría del tipo de suelo y la cercanía de la capa freática a la superficie del terreno influyen en el elevado índice de vulnerabilidad.

En base a las conclusiones anteriormente presentadas se recomienda realizar la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación utilizando una metodología diferente para efectuar una comparación de resultados. La selección de la metodología a utilizar dependerá de la información disponible.

Se recomienda además realizar mapas de concentración de algún indicador de contaminación, para poder así combinarlo con los mapas de vulnerabilidad obtenidos en los métodos aplicados, y analizar si concuerdan las áreas de mayor vulnerabilidad con las de mayor concentración del indicador. Es decir, la representatividad de los estudios de vulnerabilidad, pueden chequearse en aquellos ámbitos donde existe deterioro por contaminación del agua subterránea. En estos casos, a la vulnerabilidad intrínseca hay que agregarle la carga y el tipo contaminante, para obtener un mapa de riesgo.

En cuanto a las actividades de explotación del área de concesión de Llancanelo operada por YPF, se considera que se debería estudiar de manera detallada las actividades que se desarrollan en áreas cercanas a los cursos de agua, para llegar a establecer un procedimiento que maximice el cuidado de la zona, por representar la actividad petrolera un riesgo importante para la ecología del lugar y los acuíferos.

Considerando los efectos que genera la explotación petrolera y reparando en el hecho de que se encuentre en las cercanías de una reserva natural, la cual es un área altamente sensible a la actividad antrópica, se establece que el caso de que un volcamiento accidental dentro del área de concesión acarrearía problemas que generaría sobre la reserva impactos que tardarían mucho tiempo en mitigarse, afectando seriamente a las aguas subterráneas y al ecosistema en general.

Es por lo anterior que se recomienda, en las cercanías de cada uno de los pozos como así también de los tanques de almacenamiento, disponer elementos de protección como

ser membranas subsuperficiales, sumideros o diques elevados de manera de retener el petróleo en caso de producirse un derrame.

En el caso de los nuevos pozos y emplazamientos previstos en el proyecto de explotación de YPF, resultaría muy conveniente que los mismos fueran perforados en emplazamientos ya existentes fuera de los límites de la reserva natural de manera de disminuir así el impacto.

Particularmente de acuerdo a los resultados del método DRASTIC en las zonas de alta y moderada vulnerabilidad se aconseja extremar cuidados en las tareas que se realicen dentro de estas zonas.

Finalmente, se recomienda realizar un plan de monitoreo en base a estos mapas el cual se complemente con un análisis químico de muestras de agua obtenidas en perforaciones para determinar una situación base de la cuenca de Llacanelo, que sirva de apoyo para realizar comparaciones con situaciones futuras.

La importancia de la descripción de los programas de monitoreo ayuda a mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de la aguas subterráneas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de degradación de la misma.

8. BIBLIOGRAFÍA

Abraham, E. M.; (2000). "Geomorfología de la Provincia de Mendoza". Ed. Abraham, E. M. & F. Rodríguez Martínez. Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida Árida I y II Caracterización Ambiental y Mapa básico 1.

Aller, L.; Benett T.; Lehr J.H.; y Petty R.J.; (1987). "DRASTIC- A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings". U.S. EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development.

Almorox, J.; (2010). "Evapotranspiración Potencial según Thornthwaite". <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones>

Álvarez, A.; (2011). "Zonificación de unidades hidrogeológicas ambientales por niveles de vulnerabilidad". INA, Componente Calidad Agua y Suelo, Programa de Riego y Drenaje de la Provincia de Mendoza. PROSAP –DGI –OEI.

Aragon Sulik, M. D.; Navarro Mendoza S.; Belmonte Jimenez, S.; Guevara Torres, M.; (2012). "Calibración del método DRASTIC en acuíferos utilizando nitratos como indicador". RIHA, La Habana, vol. 33, n. 2. Disponible en <http://scielo.sld.cu>

Auge, M.; (1995). "Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental". UBA: 1-65. Buenos Aires.

Auge, M.; (2001). "Vulnerabilidad de acuíferos semiconfinados". Ensayo preliminar. Red CyTED de Vulnerabilidad de Acuíferos. La Plata.

Auge, M.; (2004), "Vulnerabilidad de Acuíferos Conceptos y Métodos". Universidad de Buenos Aires, La Plata.

Bianchi, A.R.; Cravero, S. A.; (2010). "Precipitación Media Anual, Programa Nacional Ecorregiones, República Argentina, Atlas Climático Digital". INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Buis, A.; (2011). "NASA, Japan Release Most Complete Topographic Map of Earth", Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. (<http://www.nasa.gov/topics/earth/features/aster-20090629.html>)

Burgos, J. y Vidal A.; (1951.) "Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite". Meteoros.

Carbonell, A.; (1993). "Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty". National Research Council. National Academy Press: 1-204. Washington DC.

Civita, M.; Chiappone, A.; Falco, M. y Jarre, P.; (1990). "Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell'Acquedotto di Torino". 1st. Convegno nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi. Vol. 2: 461-462. Marano sul Parnaro.

CNEA, Comisión Nacional de Energía Atómica, (2007). "Evaluación Ambiental Malargüe, Informe". PRAMU, Proyecto de Restitución Ambiental de la Minería de Uranio.

Corte, A. y Grosso, A.; (1993). "Geohidrología". XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza, en "Geología y Recursos Naturales de Mendoza". V.A. Ramos (Editor), Relatorio, I (16). Buenos Aires.

C.R.A.S., Centro Regional de Agua Subterránea, (1996). "Mapa Hidrogeológico de la provincia de Mendoza, Argentina".

Custodio, E.; (1995). "Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación". II Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica # 11: 99-122. San Miguel de Tucumán.

De La Vega, M.; Lopez, E.; Osella, A.; Rovere, E. I.; Violante, R. A.; (2012). "Quaternary volcanic-sedimentary sequences and evolution of the Llanquanelo lake region evidenced from geoelectric methods" *Journal of South American Earth Sciences*. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981112001083>)

DGI, Departamento General de Irrigación, (2008). Plan Director de Ordenamiento de Recursos Hídricos de la Cuenca del río Malargüe. Mendoza. Argentina.

Doerfliger, N. y Zwahlen, F.; (1997). "EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment". International Symposium on Karst Waters and Environ Impacts. Antalya, Turkey, 1997.

EPA. Environmental Protection Agency, (1991). "A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination". Preliminary document: 1-21. Washington DC.

Flores Nieto, F. (2013). "Modelación Hidrogeológica y Transporte de Contaminantes". Informe de Práctica Supervisada para Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Córdoba.

Foster, S.; (1987). "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy". TNO Comm. on Hydrog. Research. Proceed. and Information # 38: 69-86. The Hague.

Foster, S.; e Hirata, R.; (1991). "Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas". Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.

Fulginiti, F.; (2013), "Modelación Hidrogeológica en cuencas endorreicas, aplicación a la cuenca de la Laguna de Mar Chiquita y Llanquanelo".

Gogu, R.C. y Dassargues, A.; (2000), "Current trend and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods". *Environmental Geology*, Vol. 39 (6), pp. 549-559.

Grassi, C.; (1976). "Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego". CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Kozłowski, E.; Manceda, R. y Ramos, V.; (1993). Estructura. Geología y Recursos Naturales de Mendoza. 12 Congreso Geológico Argentino y 2 Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos. Relatorio 1 (18): 235-256. Buenos Aires.

- Leone, A.; Ripa, M. N.; Uricchio, V.; Deák, J. y Vargay, Z.; (2009). "Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models". *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 2969-2978, Elsevier.
- Ley Nro 25.675; (2002). Ley General del Ambiente, sancionada el 6 de Noviembre de 2002, Promulgada parcialmente el 27 de Noviembre de 2002.
- Linsley, R.; Kohler, M. y Paulus, L.; (1958). "Hydrology for engineers". McGraw Hill, NuevaYork.
- Misión Ramsar de Asesoramiento (2002). "Informe de Misión Ramsar de asesoramiento". Sitio Ramsar Laguna de Llanquanelo. Malargüe. Mendoza.
- Moreno R. H.; Ibáñez A. S.; Gisbert Blanquer, J. M.; (2010). "Aridisoles". Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.
- Norte, F.; (1996). "Mapa Climatológico de Mendoza". Junta de Andalucía. Gobiernos y universidades de La región andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo, Provincia de Mendoza.
- Ragairaz, M.C.; (1993). "Clasificación taxonómica de suelos de Mendoza. Recursos y Problemas Ambientales de la Provincia de Mendoza", Cap. 2.
- Reyna, S.; Reyna, T.; Pesci, H.; Lábaque, M.; Murialdo, R.; Reyna E.; Fulginiti, F. y otros, (2009). "Estudios Hidrogeológicos y Ambientales, Laguna Llanquanelo. Mendoza". VI Congreso Argentino de Hidrogeología. IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Salhi, A.; Stitou El Messari J.; Benabdelouahab S.; El Gettafi M.; Díaz Y.; Himi M. y Casas A.; (2008). "Cartografía de la Vulnerabilidad del acuífero de Ghis- NeKor (Al Hoceima, Marruecos) por el método DRASTIC". IX Simposio De Hidrogeología: Asociación Española De Hidrogeólogos (2008). Elche, Alicante.
- Schoeneberger, P.J.; (1998). "Field Book for Describing and Sampling Soils". National Soil Survey Center Natural Resources Conservation Service del Departamento de Agricultura de EE.UU.
- Schosinsky, G.; (2006). "Cálculo de La Recarga Potencial de Acuíferos Mediante Un Balance Hídrico De Suelos". *Rev. Geol. Amér. Central*, 34-35: 13-30.
- Schosinsky, G. y Losilla, M.; (2000). "Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual".- *Revista Geológica América Central*, 23: 43-55.
- SEGEMAR, Servicio Geológico Minero Argentino, (2005). "Geología Argentina", Anales 29, Buenos Aires.
- Spence, R. J. S.; (1990) *Seismic Risk Modelling - A review of Methods*, Papers Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge. Inglaterra
- Thorntwaite, C. W.; (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review* 38 (1): 55-94.

Tripet, J. P.; Doerfliger, N. y Zwahlen, F.; (1997). "Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland". *Hydrogéologie* 3: 15-57.

UNC (2013 a), Servicio de Estudios Hidrogeológicos para Proyecto Llanquanelo – Unidad de Negocios Mendoza. *Informe final*.

UNC (2013 b), Servicio de Estudios Hidrogeológicos para Proyecto Llanquanelo – Unidad de Negocios Mendoza. *Informe SIG*.

Valladares, A.; (2003). "La cuenca de la Laguna de Llanquanelo. Descripción de Cuencas Hídricas Argentinas". Subsecretaría de Recursos Hídricos.

Villegas Yepes, P.; (2011), "Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3". (www.aguaysig.com).

Vrba, J. y Zaporozec, A.; (1994). "Guidebook on mapping groundwater vulnerability". IAH. Vol. 16: 1-131. Verlag Heinz Heise. Hannover.

Wetten, C. y Álvarez A.; (2010). "Estudio de prospección del acuífero del área de Llanquanelo, Malargüe, Mendoza, como consecuencia de la presencia de petróleo". Fundación de la Universidad Nacional de San Juan – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas. y Naturales. Departamento de Geología. Cátedra Hidrogeología - Convenio para Asistencia Tecnológica en Hidrogeología al Gobierno de la Provincia de Mendoza.

YPF (2008).Llanquanelo. Informe Preliminar y Estacional Invierno.

YPF (2009). Manifestación General de Impacto Ambiental: Información Complementaria.

YPF (2010) "Proyecto de perforación en un área sensible al medio ambiente, Llanquanelo". Jornadas de Perforación, Terminación, Reparación, y Servicios de Pozos. Mendoza.

Otras Fuentes

<http://resources.arcgis.com/>

www.aulati.net

<http://earthexplorer.usgs.gov>