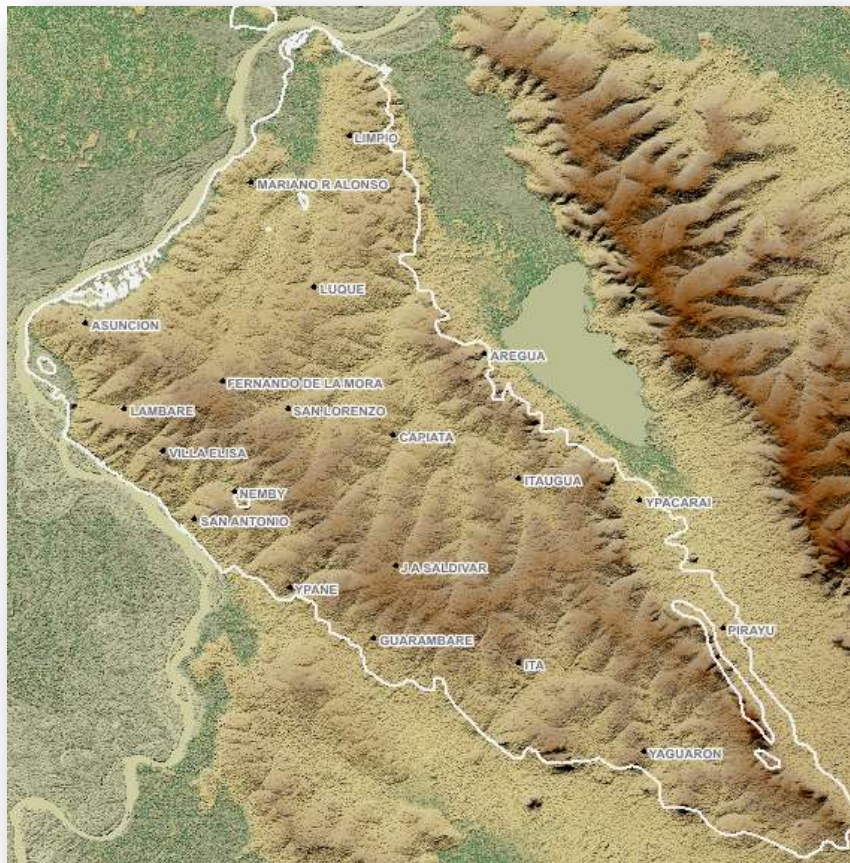


ESTUDIO DE RECURSOS HÍDRICOS Y VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DEL ACUÍFERO PATIÑO

PR-T1207



PLAN DE ACCIÓN ESTRATÉGICA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO PATIÑO

NOVIEMBRE 2018

Gestionado por



TEKOHĀ HĀ
AKARAPUĀ KATUIRĀ
Ministerio del
AMBIENTE Y DESARROLLO
SOSTENIBLE



BID
Banco Interamericano
de Desarrollo

Financiación a través de la



Cooperación
Española

Ejecución



INDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Objetivos	6
2	ANTECEDENTES	7
3	REVISIONES TÉCNICAS GENERALES	11
4	EL ACUÍFERO PATIÑO	14
4.1	Características generales.....	14
4.2	Diagnóstico.....	15
4.3	Calidad del agua	16
4.3.1	Nitratos.....	16
4.3.2	Salinidad	18
4.4	Balance hídrico	20
4.4.1	Recarga.....	20
4.4.2	Extracciones	20
4.5	Plan de monitoreo.....	21
4.6	Modelo y escenarios	24
4.6.1	Modelo de flujo	24
4.6.2	Modelo de transporte	26
4.6.3	Escenarios.....	27
4.7	Mapa de vulnerabilidad	28
4.7.1	Vulnerabilidad intrínseca	29
4.7.2	Vulnerabilidad con efectos del cambio climático	29
4.7.3	Vulnerabilidad específica	30
5	DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO	33
5.1	Problemática detectada	33
5.1.1	Problemas relacionados con la cantidad el agua	34
5.1.2	Problemas relacionados con la calidad	35
6	ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN BASE A LOS MAPAS DE VULNERABILIDAD Y LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE RECARGA	38
6.1	Zonas de recarga	38
6.2	Presiones sobre el acuífero	39
6.2.1	Presiones que afectan al estado cuantitativo	40
6.2.2	Presiones que afectan al estado cualitativo.....	41
6.3	Vulnerabilidad intrínseca del acuífero y vulnerabilidad específica a los nitratos.....	44
6.4	Zonas de protección	44

6.4.1	Zonas de limitación a la extracción	47
6.4.2	Zonas de especial protección relacionada a la contaminación.....	51
6.4.3	Zonas de especial protección a los nitratos	54
7	LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN.....	59
7.1	Líneas estratégicas	59
7.1.1	Línea estratégica 1: Gestión integrada de los recursos hídricos.....	59
7.1.2	Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del agua y reducción del riesgo	61
7.1.3	Línea estratégica 3: Fortalecimiento de institucionalidad para la implementación del Plan	62
7.1.4	Línea estratégica 4: Cultura del agua	63
7.1.5	Línea estratégica 5: Mejora del financiamiento de la gestión del agua.....	64
8	VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PLAN	65
9	SEGUIMIENTO DEL PLAN	69
9.1	Matriz de indicadores.....	69
10	CONCLUSIONES GENERALES	73
11	RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS	74
12	BIBLIOGRAFÍA.....	75

INDICE de figuras

Figura nº01. Ciclo de planificación adaptado a la gestión del acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia	11
Figura nº02. Principales tareas a abordar durante el ciclo de planificación. Fuente: elaboración propia	12
Figura nº03. Períodos establecidos para la revisión y actualización del plan siguiendo los pasos establecido en el ciclo de planificación. Fuente: elaboración propia	13
Figura nº04. Acuífero Patiño	14
Figura nº05. Concentraciones de nitrato (mg/l), Fuente: campaña de campo agosto 2018.....	17
Figura nº06. Distribución de familias de agua.Fuente: análisis campaña agosto 2018.....	18
Figura nº07. Comparación diagramas de Stiff campaña 2010 y 2018	19
Figura nº08. Balance hídrico del Acuífero Patiño	20
Figura nº09. Ubicación de los puntos propuestos en la red de calidad de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia.	21
Figura nº10. Balance multianual de la cuenca del arroyo Yukyry resultado en mm. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura nº11. Representación de los resultados del modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura nº12. Distribución espacial de la recarga para las diferentes cuencas que drenan el acuífero Patiño, expresada como % de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.	25

Figura nº13. Zonas del modelo. En marrón la zona 1. En rosa la zona dos. La línea blanca señala la cota 0. Fuente: elaboración propia con el software Modflow	26
Figura nº14. Esquema de método DRASTIC. Fuente: (Aller, Bennet, Lehr, & Petty, 1985)	29
Figura nº15. Vulnerabilidad intrínseca: índices DRASTIC.....	29
Figura nº16. Índices de vulnerabilidad DRASTIC. Escenarios simulados para 3 periodos: Periodo 2011 – 2040 (1), Periodo 2041 - 2070 (2) y Periodo 2071 – 2099 (3)	30
Figura nº17. Vulnerabilidad específica a los nitratos según modelo DRAS	32
Figura nº18. Reunión preparatoria del Plan de Gestión (10 agosto 2018)	33
Figura nº19. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado con la cantidad de agua en el acuífero Patiño.	34
Figura nº20. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado con el aumento de nitratos y presencia de patógenos.....	36
Figura nº21. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado la salinización del agua.....	37
Figura nº22. Distribución espacial de la recarga para las diferentes cuencas que drenan el acuífero Patiño, expresada como % de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura nº23. Distribución de las principales captaciones de agua que se producen en el acuífero. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura nº24. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Obtenidas de la aplicación del modelo numérico de simulación (Recarga +5%, Bombeos +15%)	41
Figura nº25. Presión sobre el acuífero en base a los usos del suelo. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura nº26. Presión sobre el acuífero mostrando las principales actividades contaminantes, como son las estaciones de servicio y los diferentes tipos de actividad industrial. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura nº27. Relación entre la vulnerabilidad y las presiones relacionadas con las actividades industriales contaminantes. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura nº28. Relación entre la vulnerabilidad intrínseca y . Fuente: Elaboración propia.	46
Figura nº29. Zonas vulnerables a descensos piezométricos. Fuente: propia a partir de los escenarios del modelo de flujo	47
Figura nº30. Mapa de presiones sobre la cantidad del acuífero. Fuente: elaboración propia... ..	48
Figura nº31. Mapa de riesgo por extracción. Fuente: elaboración propia	49
Figura nº32. Zonas de limitación a la extracción. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura nº33. Detalle de puntos de control para las zonas de limitación a la extracción	50
Figura nº34. Mapas de calor de actividades potencialmente contaminantes (izquierda) y de estaciones de servicio (derecha). Fuente: elaboración propia	51
Figura nº35. Mapa de peligrosidad por actividades potencialmente contaminantes. Fuente: elaboración propia	52
Figura nº36. Mapa de riesgos por contaminación. Fuente: elaboración propia	53
Figura nº37. Zonas de especial protección a la contaminación. Fuente: elaboración propia	53
Figura nº38. Detalle de puntos de control para las zonas de protección a la contaminación....	54
Figura nº39. Mapa de peligros por actividades generadoras de nitratos (izquierda) y mapa de vulnerabilidad específica a los nitratos según modelo DRAS (derecha). Fuente: elaboración propia	55
Figura nº40. Mapa de riesgos por contaminación al nitrato	56
Figura nº41. Zonas de especial protección a los nitratos	57

Figura nº42. Detalle de puntos de control para las zonas de protección a los nitratos	58
Figura nº43. Distribución del costo anual por línea de acción.....	68

INDICE de Tablas

Tabla nº1. Tabla resumen de las diferentes redes propuestas.....	23
Tabla nº2. Matriz de cálculo de riesgo	48
Tabla nº3. Rangos de peligro asignado	55
Tabla nº4. Líneas estratégicas propuestas.....	59
Tabla nº5. Resumen línea estratégica 1	61
Tabla nº6. Resumen línea estratégica 2	62
Tabla nº7. Resumen línea estratégica 3	63
Tabla nº8. Resumen línea estratégica 4	64
Tabla nº9. Valoración económica línea estratégica 1	66
Tabla nº10. Valoración económica línea estratégica 2	66
Tabla nº11. Valoración económica línea estratégica 3	67
Tabla nº12. Valoración económica línea estratégica 4	67
Tabla nº13. Valoración económica línea estratégica 5	68
Tabla nº14. Valoración total de las 5 líneas de acción consideradas.....	68

1 INTRODUCCIÓN

El Acuífero Patiño es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo doméstico, agrícola e industrial de Asunción y su área metropolitana, así como todo el Departamento Central y parte del Departamento de Paraguari. Abarca gran parte de zona urbana, y por lo tanto, está condicionado de forma importante por las elevadas presiones antrópicas que sufre. Los vertidos incontrolados de tipo urbano e industrial pueden generar alteraciones en este recurso estratégico que es utilizado de forma mayoritaria para uso doméstico. Además, los bombeos continuados a lo largo del tiempo han condicionado los niveles y los flujos existentes y la relación con las masas de agua adyacentes en los límites del acuífero, pudiendo agravar el problema de la calidad del agua del acuífero.

Esta situación ha llevado a las autoridades del Paraguay a estudiar el acuífero en repetidas ocasiones, generando una valiosa información antecedente que sirve de base para poder comprender el estado actual del acuífero y su evolución. En este mismo sentido desde la Secretaría del Ambiente (SEAM), hoy Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), se ha promovido el estudio **PR-T1207 “Estudio de Recursos Hídricos y Vulnerabilidad Climática del Acuífero Patiño”**. Financiado por el AECID a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) que tiene como objetivo último generar un plan de gestión integrada del acuífero que garantice la sostenibilidad futura del acuífero.

1.1 Objetivos

El objetivo general del Plan de Gestión Integrada del Acuífero Patiño consiste en proponer diferentes estrategias adaptativas de gestión y de infraestructura con el objetivo de reducir la vulnerabilidad del acuífero ante los posibles efectos del cambio climático, disminución de la disponibilidad del recurso, disminución de la calidad del agua subterránea y los conflictos del agua. Además, el Plan contemplará la sostenibilidad financiera del acuífero, incluyendo un análisis costo-beneficio para cada una de las propuestas.

El enfoque seguido será el de Marco Lógico, que consiste en un diagnóstico estratégico, con el cual se detecta la problemática principal (árbol de problemas) y se proponen diferentes líneas estratégicas de acción inmediata y a un futuro cercano que aúnan los planes y programas necesarios para responder los problemas detectados.

2 ANTECEDENTES

A lo largo de los últimos años, se han llevado a cabo una gran diversidad de estudios en referencia al acuífero Patiño.

En el Mapa Geológico de Naciones Unidas (Naciones Unidas, 1986) se traza el primer perfil tipo del acuífero Patiño y se estiman por primera vez sus parámetros hidráulicos. Se lo clasifica como poroso y de bajo potencial de explotación, con capacidad específica inferior a 1.0 m³/h/m y una recarga de 1 a 2% de la precipitación.

En el documento se describe el acuífero como constituido por areniscas friables, finas a media, generalmente con intercalaciones de arcilla y conglomerados, apuntando que se trata de un acuífero de extensión restringida con permeabilidad variable en el que predominan las condiciones hidráulicas libres aunque puede presentar condiciones de artesianismo con surgencias de forma puntual. Así mismo, el documento apunta caudales de pozos de 13 m³/s y caudales específicos de 0.8 m³/h/m en promedio, señalando una buena calidad química del agua.

Durante los años 80 y 90 SENASA perforó cerca de un millar de pozos entre 50 y 200m de profundidad en la zona del Patiño. En una parte de ellos, se obtuvieron perfiles estratigráficos, y se realizaron analíticas completas y ensayos de bombeo. Con estos datos se detectó una influencia del drenaje por el río Paraguay y por los arroyos principales. La dirección del flujo parecía corresponder, a grandes rasgos, a la dirección del flujo superficial, encontrándose zonas deprimidas donde se intuía una extracción importante del recurso.

Además, se estimaron, los siguientes parámetros claves, complementando y modificando los ya existentes previamente:

- ✓ El caudal específico de los pozos frecuentemente está en el intervalo de 0.5 a 2.0 m³/h/m, un poco más favorable que el promedio de 0.8 m³/h/m estimado por Naciones Unidas.
- ✓ Los caudales de los pozos reportados oscilan entre 2 y 130 m³/hora, con la mayoría entre 25 y 40 m³/h.
- ✓ Condiciones freáticas predominan en el acuífero a escala regional, pero localmente se observan también condiciones semiconfinadas y hasta surgentes.

Hay que considerar que los niveles piezométricos disponibles corresponden a diversos años y épocas del año diferentes y en la mayoría de los casos corresponde a un nivel dinámico.

En 2001 se realizaron una serie de estudios para el Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA (FEHS), (Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas TNO, 2001). El objetivo del proyecto fue el conocimiento de los acuíferos de la Formación Patiño, como medio para la orientación e implementación de una política racional de aprovechamiento de las aguas subterráneas en el área. Para realizarlo se llevaron a cabo diversas acciones como el desarrollo de un Banco de Datos Hidrogeológicos, un Plan Piloto en una cuenca que se encuentra dentro de dicha formación geológica, la confección de mapas para detectar variaciones espaciales a partir de las analíticas de 125 muestras, la construcción de 10 piezómetros en la zona piloto (que posteriormente fueron destruidos) y un Plan de capacitación

De estos estudios se pudo concluir que:

- ✓ Las aguas subterráneas del Acuífero Patiño son en general de baja mineralización.
- ✓ Sin embargo, en una faja de 2 a 8 km de ancho a lo largo del río Paraguay se comprobó la presencia de agua salada a partir de cierta profundidad variable. La intrusión de

aguas saladas podría proceder del Chaco pasando por debajo del río Paraguay, aunque esto requiere condiciones geohidráulicas que lo favorezcan.

- ✓ Se detectan valores elevados de coliformes en gran parte de los pozos.
- ✓ Se detectan valores elevados de hierro y turbidez
- ✓ No se observan tendencias de variación significativa dentro de la zona

En el año 2002 se publicó un estudio del uso del agua subterránea en el Gran Asunción (Foster, 2002). Se trata de un diagnóstico sobre las condiciones, uso y estado del agua subterránea en Gran Asunción e identificación de los asuntos que pudieran influir en las políticas generales del sector hídrico y requirieran la intervención de la agencia reguladora ERSSAN (junto con otras instituciones nacionales y/o el que se propone sea el nuevo concesionario de servicios urbanos de agua). Se basó principalmente en la información proporcionada por documentos no publicados de ERSSAN, la Corporación Nacional de Obras Sanitarias (CORPOSANA), el SENASA y el Servicio Geológico de los Países Bajos (TNO-NITG). Con este estudio se concluyó que el acuífero es recargado periódicamente por precipitación en exceso de 300 a 400 mm/a.

Así mismo quedó indicado que la vulnerabilidad del Acuífero Patiño a la contaminación del agua subterránea aumenta donde el manto freático es somero y perforaciones muy profundas o bombeo excesivo producen salinización de las aguas.

En el año 2006-2007 se ejecutó el estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción” (Acuífero Patiño) con un convenio entre SEAM-MSPyBS-MEC. Este proyecto se desarrolló con el objetivo elaborar un Plan de Gestión del Agua Subterránea para el Aprovechamiento Sostenible del Acuífero Patiño basado en un modelo matemático hidrodinámico y de calidad

El proyecto constó de 3 etapas:

- ✓ Toma de datos: se recopiló toda la información existente del área de estudio: consumo de agua, habitantes en el área del acuífero, industrias, perforaciones de pozos existentes, focos potenciales de contaminación, etc... además se realizaron estudios geofísicos, perforación de piezómetros, monitoreo de aguas superficiales y subterráneas, etc.
- ✓ Modelo matemático: Toda la información adquirida en la primera fase fue interpretada, analizada y sistematizada e introducida en una base de datos que se utilizó para desarrollar un Modelo Matemático Tridimensional que permitió simular el flujo subterráneo y el transporte de contaminantes, para poder presentar distintos escenarios de uso del recurso hídrico
- ✓ Plan de Gestión: en el que se definieron la disponibilidad y demanda de agua y la protección de áreas vulnerables para así poder evitar la salinización, y la eventual contaminación del recurso

Como resultado del modelo matemático, se señaló que, si se cumplen las premisas consideradas, habrá una disminución del nivel de agua de 40 m para el año 2035. Esto se debería por el excesivo bombeo de las aguas y el aumento desordenado de los pozos.

Por otra parte, se determinó la geometría y las formaciones hidrogeológicas gracias a los SEVs, aunque no se llegó a determinar la base del acuífero en su centro.

En agosto 2012, se realizó un estudio de la calidad del agua de la cuenca hídrica del arroyo San Lorenzo en el marco del Proyecto PAS-PY 2004.2189.1, elaborado con el apoyo de la cooperación alemana (Georg Houben et al, 2012).

Este proyecto tenía como objetivo el manejo sostenible y la protección del agua subterránea en áreas piloto prioritarias, mediante el fortalecimiento de Consejos de Agua, compuestos por

usuarios públicos y privados. Para ello, por una parte, se tomaron muestras en 65 pozos de agua en la Cuenca del Arroyo San Lorenzo en los que se estudiaron la dureza, la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y se hizo un análisis bacteriológico y otro químico. Por otro lado se le dio un enfoque integral con componente social para entender el rol de los actores en la gestión de los Recursos Hídricos.

Se concluyó que hay un porcentaje considerable de muestras en las que se detecta la presencia de *Escherichia Coli* y nitratos, lo que deja en evidencia unas prácticas de saneamiento inadecuado y sin previsión de mejora en un futuro cercano.

Ante el caos del funcionamiento urbano, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC) encararon en forma conjunta una propuesta de modernización del transporte público de Asunción. En ese contexto, se desarrollaron los estudios pertinentes a los aspectos socio demográfico, físico ambiental y construido y como parte de ello, en el período 2012-2014 se elaboró un Plan Estratégico en la ZOMA (MOPC, 2014), que incluyó no solo el diagnóstico sino también propuestas para cada uno de los componentes a su cargo. Sus objetivos generales fueron definir el modelo futuro de desarrollo deseable, formular estrategias para avanzar hacia dicho modelo y establecer un sistema continuo de toma de decisiones. Este estudio aporta valiosa información sobre usos del suelo y sobre las presiones que pueden detectarse sobre Asunción, abarcando gran parte del área de influencia del Acuífero Patiño.

En 2016 se inició un programa de mediciones de niveles, extracción de muestras de agua para análisis físico-químicos y medición in situ de parámetros de campo como conductividad eléctrica, pH, Total de Sólidos Disueltos, de los 46 pozos de monitoreo construidos en el marco del Programa de modernización del sector Agua y Saneamiento – PM-SAS.

Adicionalmente, se definió una “red secundaria” de 31 pozos ubicados en las zonas más vulnerables y donde se había detectado una salinización del recurso subterráneo (zona de Limpio y Areguá). Estas nuevas mediciones concluyen que la tendencia predicha en el estudio de 2007 respecto a los niveles de agua no se ha cumplido ya que se observa una subida de niveles y no de bajada como se esperaba. Se alude a las fuertes lluvias de 2014 y 2015 como principal factor en el incumplimiento de esta previsión, así como a la falta de datos reales en 2007 (ya que en gran parte fueron teóricos) y a la nivelación de los piezómetros.

El estudio también señala que la salinidad del agua presenta valores más elevados en la zona que bordea el acuífero (Limpio-Piquete Cué) que no se manifiesta como una zona totalmente invadida por agua salada, sino que se presentan como manchas donde el agua es de buena calidad, recomendando que se realice un trabajo específico para definir las profundidades a las que se está extrayendo el agua y clasificar los estratos en función a la salinidad

Por otra parte, desde el año 2012 existe el grupo de Investigación del Acuífero Patiño, llevado a cabo por la Facultad Politécnica – Universidad Nacional de Asunción, Financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). Los estudios realizados van dirigidos a las aguas subterráneas del acuífero Patiño, abarcando los departamentos Central y Paraguarí y agrupa toda una serie de investigaciones relacionadas con el Acuífero Patiño, que surgieron a raíz de dos trabajos principalmente:

- ✓ Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción (2012). Proyecto ya realizado en cuyo marco se realizaron 4 estudios:
 - Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Acuífero Patiño, cuyo objetivo fue elaborar los mapas de riesgo de contaminación del acuífero Patiño en su extensión total (1.176 km²).

- Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Acuífero Patiño. Área del Gran Asunción: similar al anterior pero estudiando exclusivamente el acuífero Patiño en el Área del Gran Asunción o Área Metropolitana de Asunción (567 km² aproximadamente).
 - Comparación de Mapas de Riesgo de Contaminación del Acuífero Patiño que pretendía verificar si existe alguna diferencia entre los diferentes mapas de riesgo de contaminación.
 - Identificación de las Fuentes Puntuales de contaminación sobre el acuífero Patiño aplicando el método POSH: con objeto de identificar geográficamente, cuantificar y calificar las fuentes de contaminación en el área del acuífero Patiño y de esta manera evaluar el peligro que generan las fuentes puntuales identificadas sobre él.
- ✓ Monitoreo y Simulación de Transporte de Contaminantes en Zonas Urbanas del Acuífero Patiño: proyecto actual.

En estos trabajos se modelan varios escenarios, suponiendo siempre un aumento lineal de las extracciones de agua subterránea y manteniendo la recarga constante. Bajo esas premisas los niveles estáticos tienden a disminuir.

En 2017-2018 se lleva a cabo la redacción del Plan de gestión del acuífero Patiño, compuesto por diversos componentes: diagnóstico, Plan de Monitoreo, modelo de flujo integrado, análisis de vulnerabilidad y el Plan propiamente dicho

Por último, entre el año 2017-2018 desde la Secretaría del Ambiente (SEAM), hoy Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), se ha promovido el estudio **PR-T1207 “Estudio de Recursos Hídricos y Vulnerabilidad Climática del Acuífero Patiño”**, compuesto por diversos componentes: Diagnóstico del Acuífero Patiño, Diseño e implementación del Plan de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua, Modelo Integrado de Agua Superficial y Subterránea, Evaluación de la Vulnerabilidad Ambiental, Plan de Gestión Integrado del Acuífero y propuesta de un esquema institucional.

3 REVISIONES TÉCNICAS GENERALES

El plan de actuación estratégico es la culminación de lo que se suele llamar **ciclo de planificación**, este proceso integra los pasos que se han ido realizando durante el trabajo y consta de las cinco fases que se muestran en la figura nº01. El ciclo de planificación arranca con el proceso de toma y análisis de datos. Los datos más importantes a los que hace referencia este proceso son los que muestran la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero y las concentraciones de los elementos principales existentes en el agua. La captación de estos datos deber regirse por lo que se ha determinado en el plan de monitoreo, tanto a lo que respecta a la localización de los puntos a muestrear, la tipología del análisis y su frecuencia.

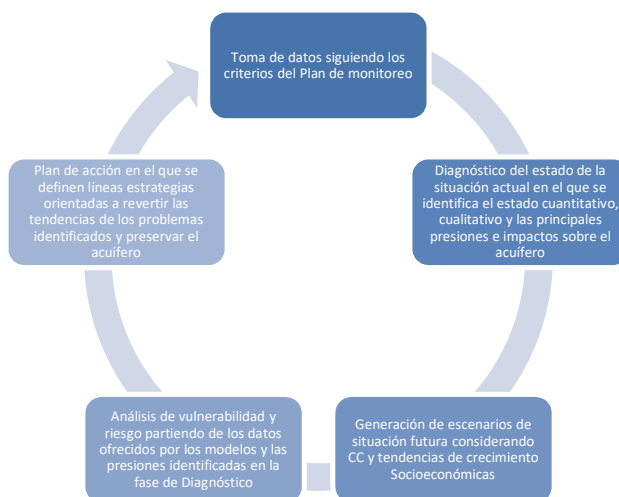


Figura nº01. Ciclo de planificación adaptado a la gestión del acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia

Siguiendo esta misma figura, el siguiente paso a abordar es el diagnóstico del estado del acuífero, donde se analiza el estado cuantitativo, el estado cualitativo y se compilan las principales presiones que impactan de forma negativa en el acuífero. El diagnóstico de estado se realiza en base a los datos recopilados durante la anterior fase, examinando las tendencias observadas y la evolución de las principales variables que muestran el estado del acuífero, entre ellas cabe destacar la evolución piezométrica, de nitratos y de cloruros.

En base al nuevo diagnóstico se deben actualizar los modelos y los escenarios simulados, en primera instancia una actualización de los modelos no requiere rehacer el modelo conceptual, la simple actualización de las presiones, mediante la incorporación de nuevos escenarios de extracción permitirá conocer el futuro comportamiento del acuífero. Si de la aplicación de los programas que tengan como objeto la mejora del conocimiento del acuífero se deriva un cambio sustancial del modelo conceptual que rige el comportamiento global del sistema, será necesario actualizar los modelos, en base a esta nueva realidad física detectada.

De la misma forma, la actualización de las presiones en la fase de diagnóstico, permitirá renovar los análisis de riesgo realizados y por tanto mantener las zonas de protección establecidas o determinar unas nuevas.

Por último el ciclo de planificación culminará estableciendo nuevas líneas estratégicas que se deberán llevar a cabo durante el siguiente ciclo de planificación establecido. Por tanto este ciclo que aquí se explica, deberá ser renovado periódicamente, garantizando de esta forma la

actualización y puesta al día de las herramientas de ayuda a la decisión durante el ejercicio de planificación. Todo este ciclo se resume en la figura nº02 donde se muestran los principales acciones a realizar.

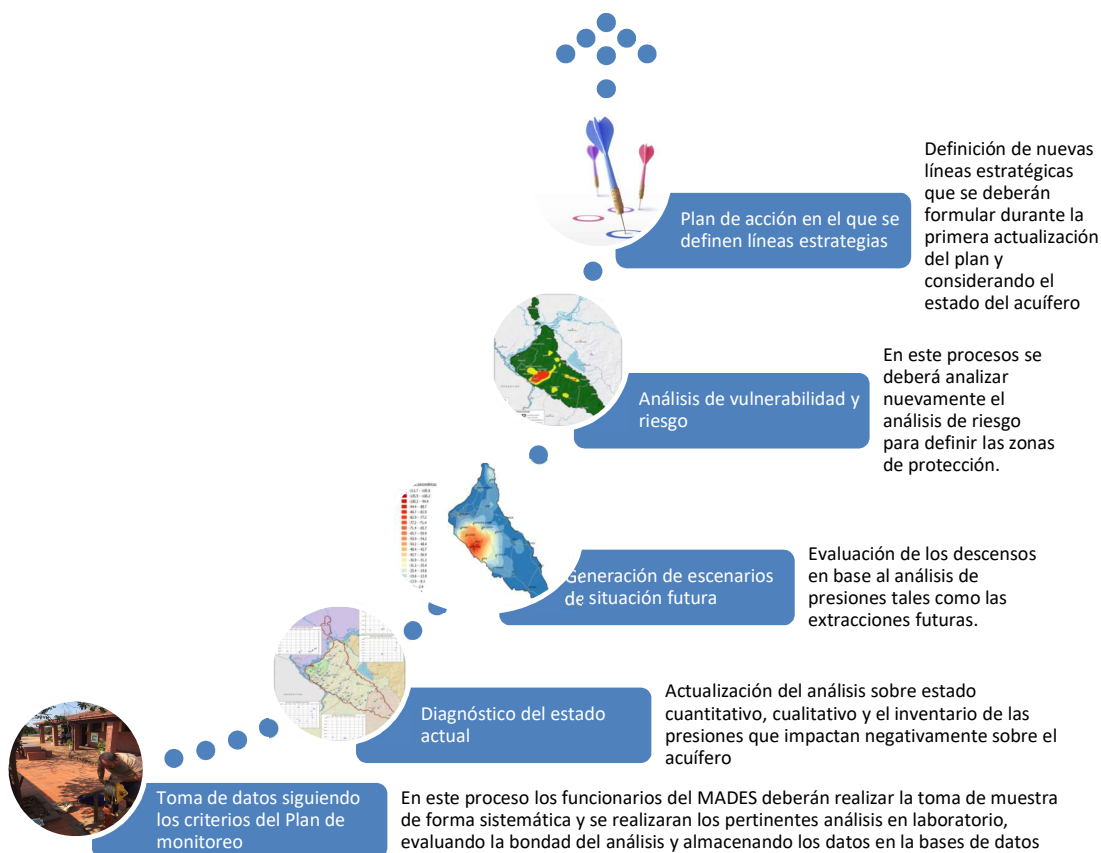


Figura nº02. Principales tareas a abordar durante el ciclo de planificación. Fuente: elaboración propia

La revisión y actualización del plan se debe abordar con una periodicidad preestablecida, se considera adecuado realizar una revisión del plan cada 5 años y una actualización cada 10 años. Durante la revisión del plan se evaluará el nivel de ejecución de los programas previstos en base a la matriz de seguimiento y se propondrán las acciones pertinentes para alcanzar los objetivos establecidos marcados para la línea estratégica. Durante la actualización del plan se definirán nuevamente las líneas estratégicas y se abrirá un nuevo periodo de planificación donde en base a las lecciones aprendidas del anterior se renovaran los objetivos a cumplir.

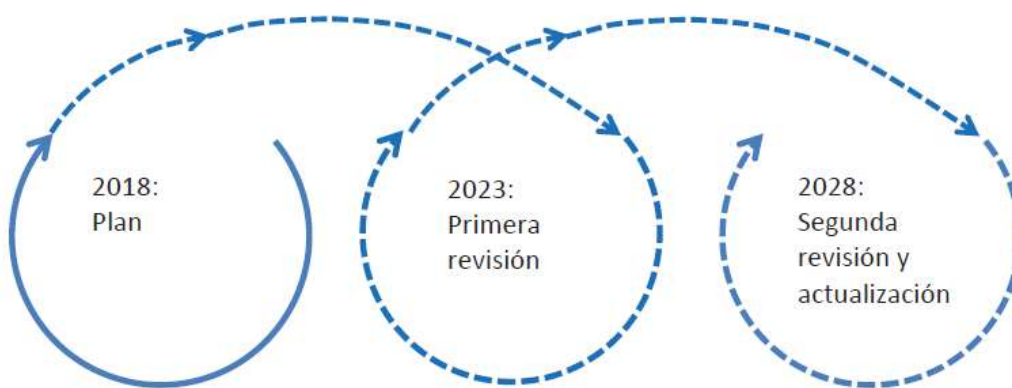


Figura nº03. Períodos establecidos para la revisión y actualización del plan siguiendo los pasos establecido en el ciclo de planificación. Fuente: elaboración propia

4 EL ACUÍFERO PATIÑO

4.1 Características generales

El acuífero Patiño está ubicado en territorio de Paraguay; se trata de un acuífero libre localizado en el flanco oriental del Alto de Asunción que aflora en forma triangular, formando vértices en la Ciudad de Asunción, el río Paraguay y la ciudad de Paraguari, así como una pequeña región en el Chaco, específicamente en el municipio de Benjamín Aceval. Sus límites son al norte y oeste, el río Paraguay; al este, la cuenca del río Salado y el lago Ypacarai; al sur, el municipio de Paraguari y los humedales que drenan al sistema Ypoa.

Su área abarca aproximadamente 1.176 km² de extensión e incluye en su territorio la ciudad de Asunción y la zona conurbana, así como los distritos de Limpio, Mariano Roque Alonso, Asunción, Lambaré, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Luque, Areguá, Capiatá, J. Augusto Saldivar, Itauguá, Itá, Ypané, Guarambaré, Villa Elisa, Ñemby, San Antonio, Yguarón y parte de Paraguari y Ypacarai. La pequeña región de Benjamín Aceval y Villa Hayes suman 54 km² adicionales. Se halla urbanizado en un porcentaje que oscila entre el 30 y 50 % del área total y las zonas no urbanizadas son praderas, campos de pastoreo y agricultura.

Por su posición estratégica, es uno de los acuíferos más importantes del Paraguay después del Guaraní. Sirve a una población de 1.000.000 de personas aproximadamente, lo que representa un 38% de la población nacional.



Figura nº04. Acuífero Patiño

El acuífero Patiño muestra una permeabilidad moderada a baja, que configura un acuífero pobre, algo permeable. Esta tipología de acuífero encaja con unas formaciones rocosas compuestas por Areniscas y conglomerados del terciario correspondientes a la formación Patiño.

4.2 Diagnóstico

En base a la recopilación y análisis de la información realizada en el informe de diagnóstico (INCLAM-HQA, 2017), se pudo extraer un conjunto de conclusiones que identifican la situación actual del acuífero, siendo las principales las siguientes:

- La gestión y buen gobierno del acuífero presenta un conjunto de dificultades debido a la ausencia de una cultura relacionada con la gestión del agua y la existencia de multitud de entidades públicas y privadas que inciden en la gestión del agua dificultando una actuación coordinada que persiga objetivos comunes.
- Los diferentes escenarios de cambio climático (según Quinto Informe IPCC AR5), muestran una evolución entre la temperatura y la Precipitación, en la que se muestra que ambas variables tienden a aumentar a lo largo del tiempo. Esto puede conducir a que se produzca un equilibrio de la recarga considerando la línea base.
- Las piezometrias elaboradas muestran un comportamiento del flujo que sigue a grandes rasgos a la superficie topográfica y los flujos superficiales, la principal recarga se produce en las zonas altas de las cuencas que se encuentran en la superficie del acuífero. Los gradientes hidráulicos muestran una conexión con los principales cursos, y en la mayoría drenan el acuífero convirtiéndose en una zona de descarga natural.
- Los problemas detectados en cuanto a la calidad se refieren a las altas concentraciones de nitratos y la presencia de contaminación microbiológica en las zonas más antropizadas.
- Los niveles se han mantenido prácticamente constantes con una ligera tendencia a ascender. En base a este mismo análisis se comprueba una relación entre la precipitación y la evolución de los niveles.
- El diagnóstico realizado a la red de control piezométrica muestra que solamente 30 de los 46 piezómetros que la componen están en funcionamiento, considerándose un factor clave la recuperación de dichos puntos de control para realizar el seguimiento y evolución de la cantidad y calidad del agua subterránea.

4.3 Calidad del agua

Durante el desarrollo del estudio se han recopilado y analizado todos los datos existentes de calidad de agua. Adicionalmente, se han realizado 2 campañas de campo con toma de muestra en aquellos puntos que fueron determinados en el Plan de Monitoreo (INCLAM-HQA 2018). Estas campañas de campo han servido para ratificar lo detectado en estudios antecedentes y tener un mayor conocimiento de la problemática existente y su evolución dentro del ámbito de estudio.

Cuando nos referimos a calidad del agua subterránea, surgen 2 problemas recurrentes: salinidad y aumento de nitratos como indicador de contaminación de origen antrópico. Éste último siendo un problema en auge en los últimos años.

4.3.1 Nitratos

Uno de los principales problemas de calidad detectado en el diagnóstico fueron las concentraciones altas de nitratos, que denotaban una posible contaminación de las aguas subterráneas debido a actividades antrópicas. Durante la segunda campaña realizada en agosto 2018, los valores medidos de nitratos superan el límite máximo permitido para agua potable en Paraguay (45 mg/l) en un 25% de las muestras recogidas. En el siguiente mapa se muestran las concentraciones de nitratos (mg/l), en rojo los valores que incumplen, en naranja los que superan los 10 mg/l y en verde los que son inferiores a 10 mg/l.

Como se puede observar, los valores que incumplen se centran en la zona de Lambaré, Villa Elisa y San Lorenzo, y en las zonas de Itá y de Paraguari. Todas ellas son regiones que están experimentando un aumento de la población y un aumento de las nuevas zonas urbanizadas donde se pone de manifiesto un posible mal control de las aguas usadas.

Teniendo en cuenta que estos valores son ligeramente más altos que las analíticas disponibles de estudios anteriores, se debe poner especial énfasis en este parámetro para poder acotar el problema y proponer soluciones a medio y largo plazo.

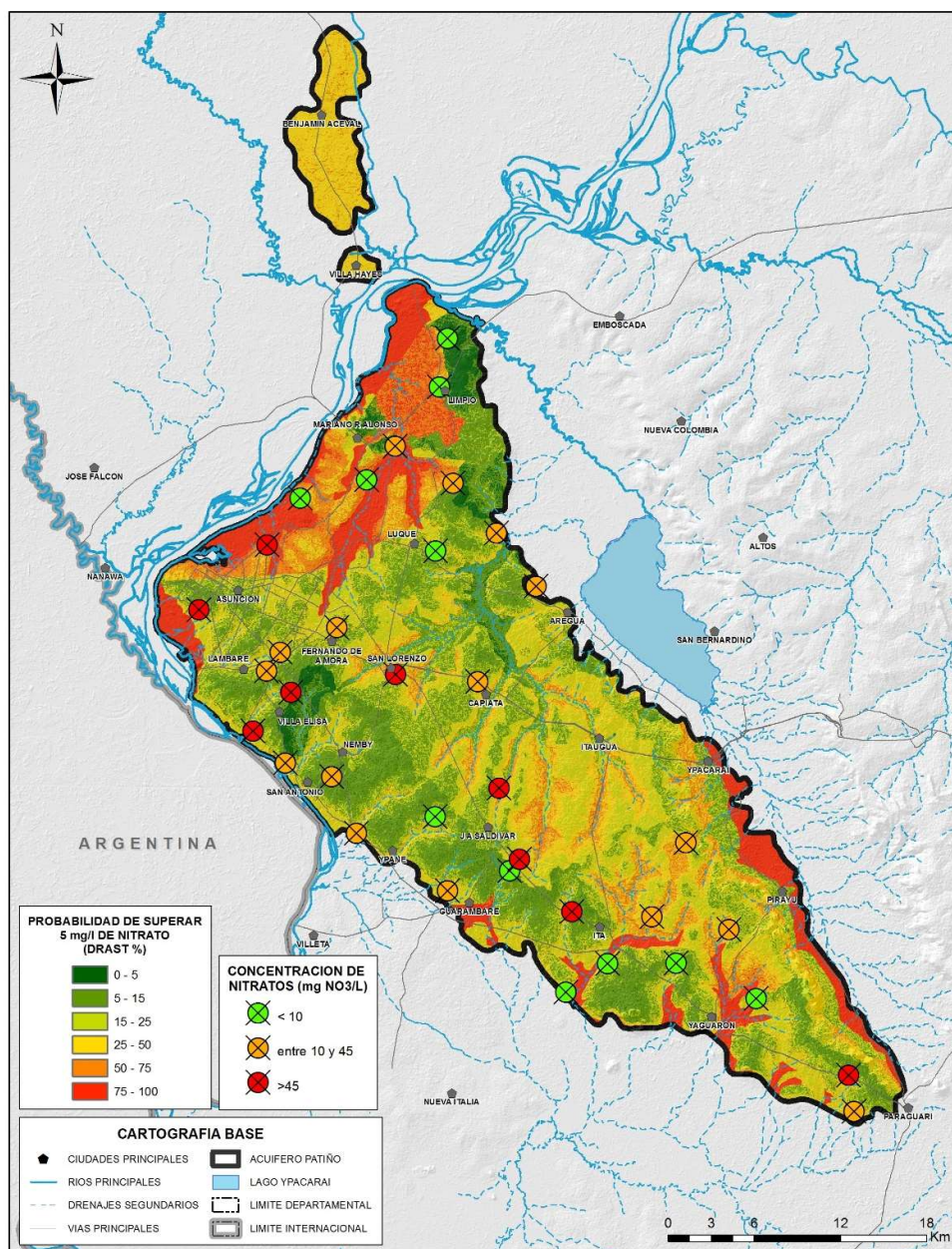


Figura nº05. Concentraciones de nitrato (mg/l), Fuente: campaña de campo agosto 2018

En la Figura nº05 se muestran en rojo los valores que incumplen (mayores a 45 mg/l), en naranja los que superan los 10 mg/l sin superar el límite y en verde los que son inferiores a 10 mg/l. Como base de la figura se ha incluido el modelo DRAST generado, que muestra el porcentaje de probabilidad de superar los 5 mg/l de nitrato.

4.3.2 Salinidad

Otro de los problemas de calidad que aparece de manera recurrente en los diversos estudios realizados es el aumento de la salinidad de las aguas subterráneas. Si bien no se detectan concentraciones de cloruro más elevadas que lo encontrado en estudios anteriores, si que se ha podido observar un ligero cambio de tendencia en algunos puntos de control.

La distribución de familias de aguas es prácticamente idéntica a la que se calculó con los datos de la campaña 2010 realizada por SEAM, con lo cual podemos descartar un desplazamiento de la cuña salina. Sin embargo, cabe mencionar una pequeña anomalía detectada en el piezómetro nº1, que aunque tenga una concentración baja de cloruros en relación a los sulfatos y nitratos, el sodio predomina frente el calcio. Es complicado llegar a una conclusión clara ya que este piezómetro no fue analizado en las anteriores campañas.

La figura nº06 muestra las familias de agua detectadas en la campaña de campo de agosto 2018.

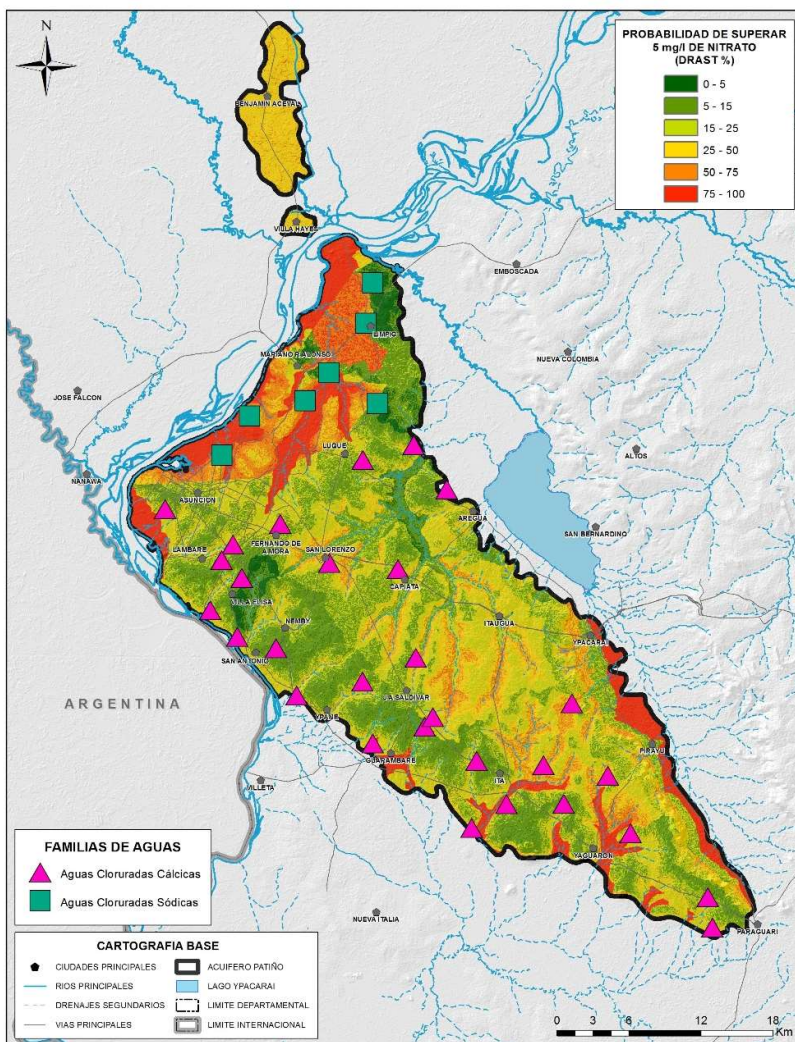


Figura nº06. Distribución de familias de agua.Fuente: análisis campaña agosto 2018

Se han comparado los diferentes diagramas de Stiff de los puntos que fueron analizados en la campaña del 2010 y la actual campaña de agosto 2018. La distribución de cationes y aniones es la misma para ambas fechas, a excepción del piezómetro 35 y el piezómetro 43 que muestran un cambio en su tendencia, tal y como se muestra en la siguiente figura.

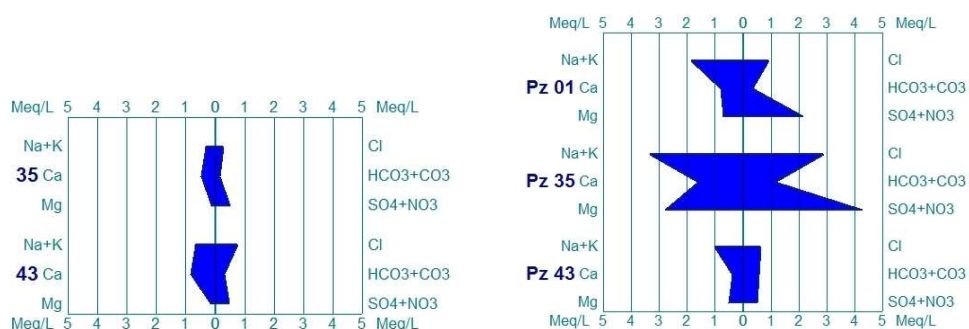


Figura nº07. Comparación diagramas de Stiff campaña 2010 y 2018

El piezómetro 35 destaca por su aumento general en contenido de sales, e igual que el piezómetro 43 se observa un cambio de tendencia pasando de ser cálcica a ser sódica. Aunque no se puede afirmar que se trate de aguas cloruradas cálcicas (el cloruro no predomina en ninguno de los dos casos), se podría asociar este cambio con una mezcla de aguas entre cloruradas cálcicas y cloruradas sódicas, con la particularidad que ambos presentan un aumento de la proporción de nitratos, lo que pone de manifiesto un posible efecto de la contaminación de la zona.

4.4 Balance hídrico

El balance hídrico indica una recarga anual promedio del orden de 259 hm³, una explotación por bombeos del orden de 90.8 hm³, un drenaje a través de la red hídrica de 136 hm³ y una salida hacia los aluviales del río Paraguay de 13.7 hm³, lo que supone un aumento del almacenamiento en el acuífero cuantificado en 18.4 hm³ anuales.

4.4.1 Recarga

Se ha calculado la recarga para el conjunto del acuífero mediante la aplicación de un modelo de transformación precipitación-escorrentía que proporciona una función de recarga continua en el tiempo y distribuida espacialmente. Esta recarga se ha ajustado y calibrado gracias a la utilización de la separación del hidrograma en la cuenca del arroyo Yukyry, y la calibración del modelo de simulación de flujo del acuífero.

4.4.2 Extracciones

Las extracciones se han calculado de dos formas diferentes, estimando las demandas en base a una dotación poblacional considerando la población servida mediante el acuífero y un segundo método considerando los caudales nominales registrados a través del inventario realizado, obteniendo como resultado valores entre 84 y 111 hm³ de extracción anual.

Los drenajes en ríos y arroyos se estimaron en 135.89 hm³ y las salidas difusas al río Paraguay en unos 13.96 hm³.

Expresado en hm³ los valores característicos del balance en el acuífero Patiño se pueden resumir en el esquema de la Figura nº08.

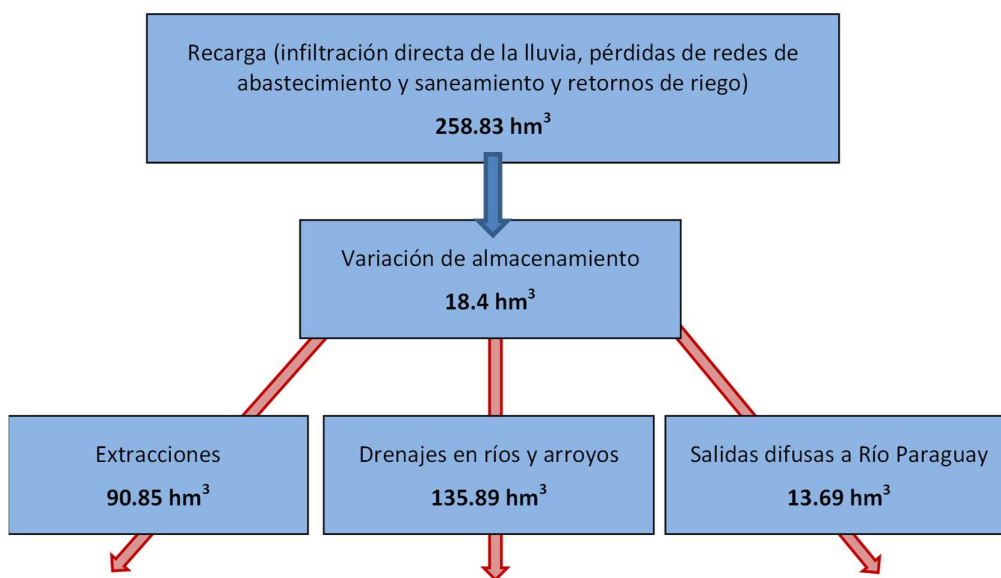


Figura nº08. Balance hídrico del Acuífero Patiño

4.5 Plan de monitoreo

El Plan de monitoreo es una de las herramientas necesaria para la planificación y gestión del acuífero Patiño con el objetivo obtener series de datos representativos, precisos y confiables

La metodología utilizada para desarrollarlo se incluye detalladamente en el documento Plan de Monitoreo (INCLAM-HQA, 2018), y se orientó a fines de planificación, manejo y toma de decisiones sobre la protección de las aguas subterráneas.

Para optimizar recursos, se han definieron 6 redes de monitoreo:

- Red de cantidad
- Red de vigilancia de la calidad
- Red operativa de calidad
- Red de nitratos
- Red de salinidad
- Red de pesticidas y plaguicidas

Las cuales fueron visitadas durante la primera campaña de campo y que se ajustaron y verificaron durante la segunda campaña de campo. Después de obtener una serie de resultados considerados satisfactorios, el Plan de monitoreo queda conformado por los puntos que se muestran en la siguiente figura.

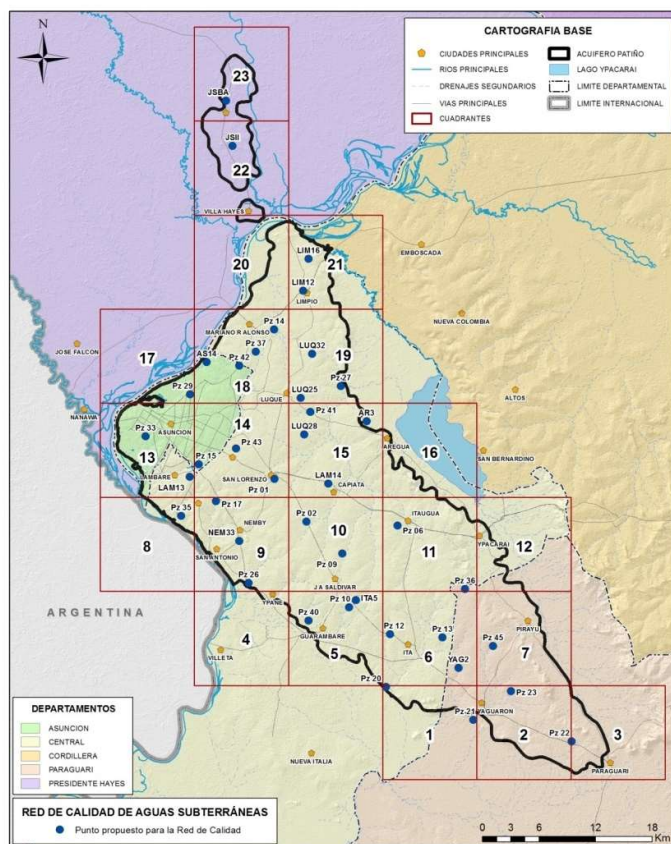


Figura nº09. Ubicación de los puntos propuestos en la red de calidad de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño. Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se indican las frecuencias propuestas según la red a la que pertenece cada punto. Las letras indican la frecuencia propuesta (A= anual, T=trimestral). Aquellas casillas vacías indican que ese punto no está contemplado en esa red.

	Red de cantidad	Red de vigilancia	Red operativa	Red de nitratos	Red de salinidad	Red de pesticidas y plaguicidas
Pz 01	T	A	T	T		
Pz 02	T	A	T			
Pz 03	T*					
Pz 04	T*					
Pz 05	T*					
Pz 06	T	A	T			
Pz 07	T					
Pz 08	T*					
Pz 09	T	A	T			
Pz 10	T					
Pz 11	T*					
Pz 12	T	A	T			
Pz 13	T					
Pz 14	T	A	T		T	
Pz 15	T	A	T	T	T	
Pz 16	T					
Pz 17	T	A	T	T		
Pz 18	T*					
Pz 19	T					
Pz 20	T	A	T			
Pz 21	T	A	T			
Pz 22	T	A	T			A
Pz 23	T	A	T			A
Pz 24	T					
Pz 26	T	A	T			
Pz 27	T	A	T			
Pz 28	T*					
Pz 29	T	A	T		T	
Pz 30	T*					
Pz 31	T*					
Pz 33	T	A	T	T	T	
Pz 34	T*					
Pz 35	T	A	T			
Pz 36	T	A	T			
Pz 37	T	A	T		T	
Pz 38	T*					
Pz 39	T					
Pz 40	T	A	T			

	Red de cantidad	Red de vigilancia	Red operativa	Red de nitratos	Red de salinidad	Red de pesticidas y plaguicidas
Pz 41	T*	A	T			
Pz 42	T	A	T		T	
Pz 43	T	A	T	T	T	
Pz 44	T					
Pz 45	T	A	T			
Pz 46	T	A	T			
ITA5		A	T			
LUQ25		A	T	T		
LAM13		A	T	T	T	
LAM14		A	T	T		
AR3		A	T			
LUQ28		A	T			
AS14		A	T		T	
LUQ32		A	T		T	
LIM12		A	T		T	
LIM16		A	T		T	
JSBA		A	T			
JSII		A	T			
NEM34		A	T	T		
YAG2		A	T			A
TOTAL	46	39	39	9	12	3

T = trimestral

T* = trimestral una vez el piezómetro haya sido recuperado

A = anual

Tabla nº1. Tabla resumen de las diferentes redes propuestas

Por otra parte, la segunda campaña de campo ha servido para optimizar y perfeccionar las rutas de campo y los procedimientos definidos. También se realizó una revisión detallada de las metodologías de análisis utilizadas con el objetivo de usar aquellas que sean más adecuadas en cada caso. De hecho, en esta segunda campaña el error de balance iónico es de un promedio de 5,7%, lo que indica que la metodología es buena y los resultados son muy aceptables.

4.6 Modelo y escenarios

4.6.1 Modelo de flujo

4.6.1.1 Modelo de aguas superficiales

La estimación de la recarga se ha realizado utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para el conjunto de cuencas que drenan el acuífero Patiño. Los datos necesarios para el modelo son datos climáticos (temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa) y usos del suelo, tipo de suelo y pendiente, datos que han sido recogidos durante la fase de Diagnóstico.

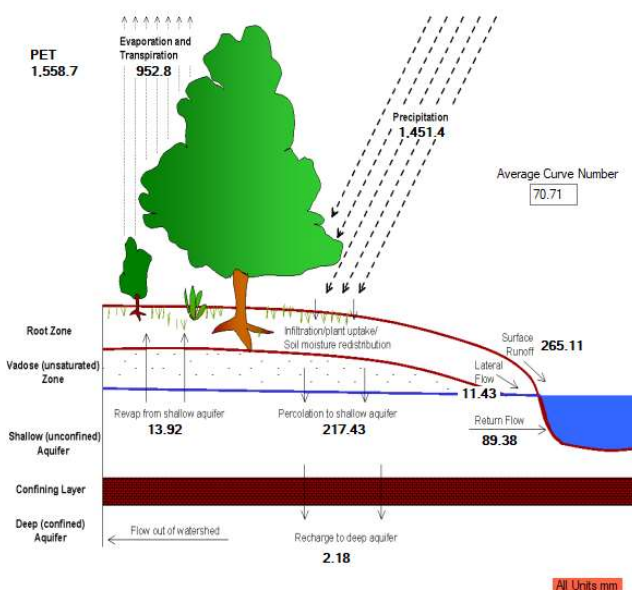
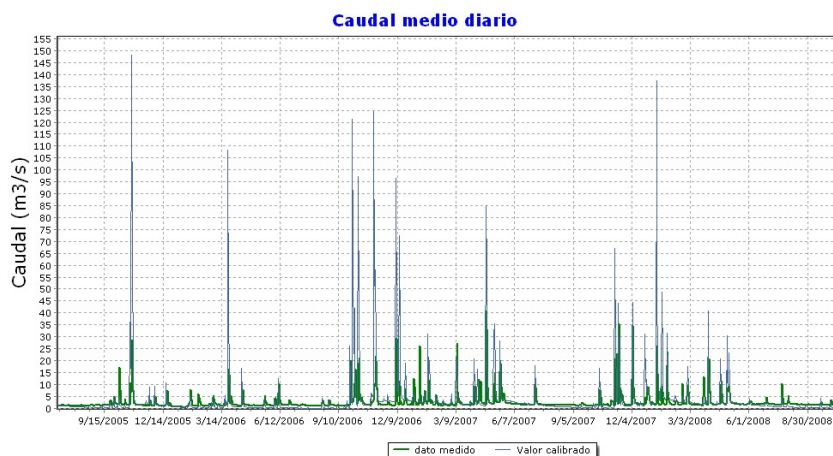
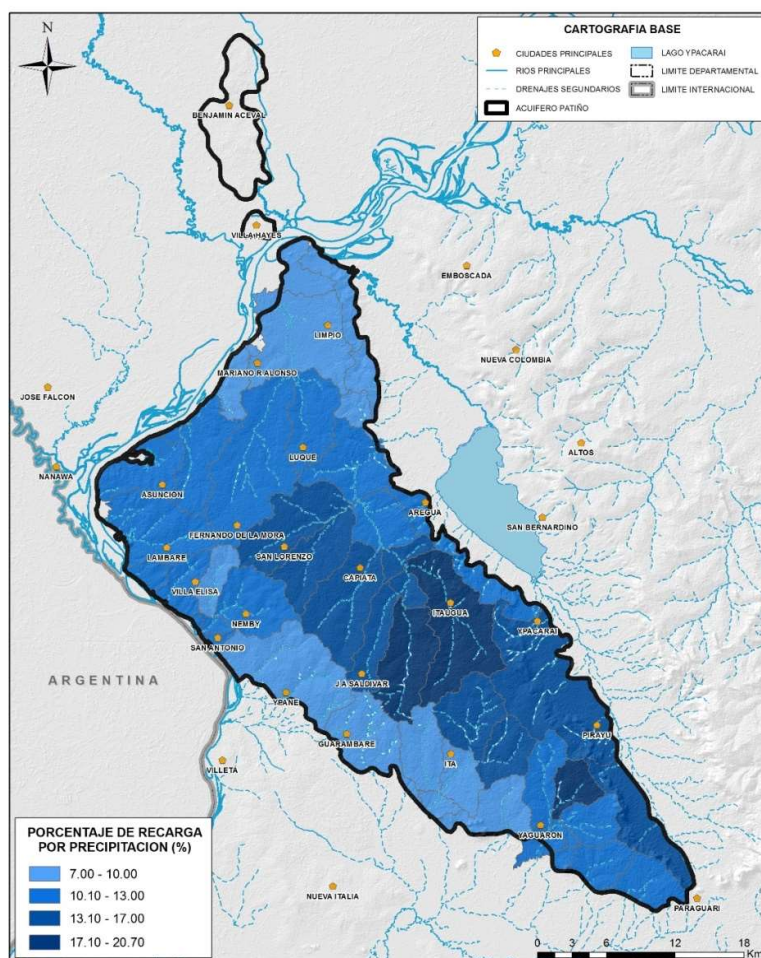


Figura n°10. Balance multianual de la cuenca del arroyo Yukyry resultado en mm. Fuente: Elaboración propia.

La calibración del modelo únicamente se ha podido realizar en la cuenca del arroyo Yukyry, la única que tiene un registro de caudal en continuo.



Los resultados del cálculo de la recarga a nivel de subcuenca y expresado en % de la precipitación total, se muestran en la siguiente figura, donde se observa que la cuenca del Yukyry constituye una zona importante de recarga del acuífero.



4.6.1.2 Modelo de aguas subterráneas

A efectos de construcción geométrica del modelo se definen dos horizontes por debajo de la topografía, uno 200 m por debajo de la cota 0 (espesor medio de 300 m) correspondientes al nivel de explotación del acuífero y otro a 500 metros por debajo de la cota 0. Se consideran dos tipos diferentes de condiciones de contorno: la conexión con el río Paraguay que configura

el límite norte del acuífero y la red hídrica de drenaje conformada por el conjunto de arroyos y ríos de las cuencas internas del dominio modelado.

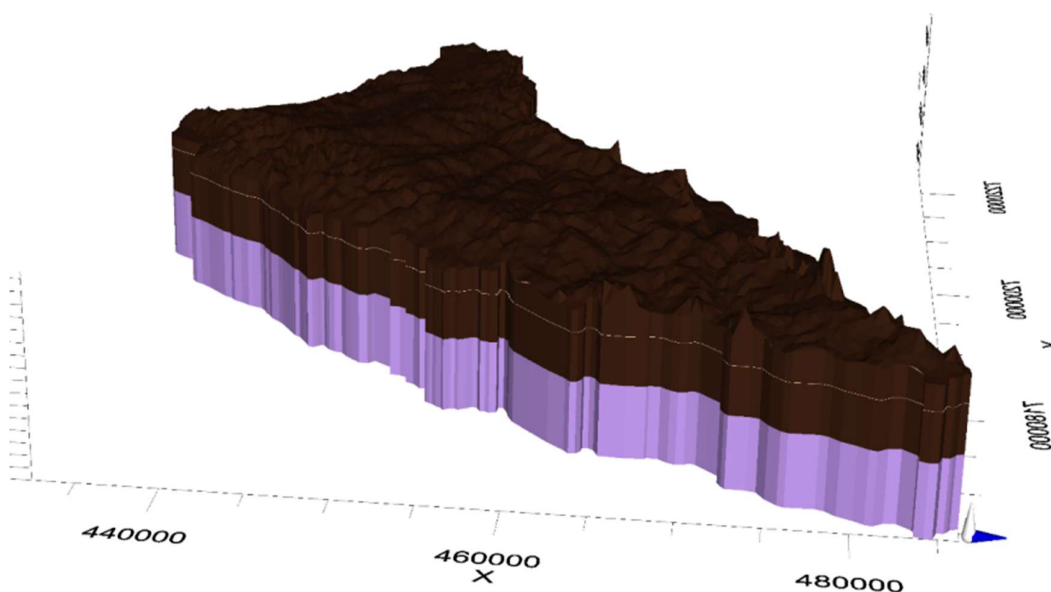


Figura nº13. Zonas del modelo. En marrón la zona 1. En rosa la zona dos. La línea blanca señala la cota 0.
Fuente: elaboración propia con el software Modflow

El análisis de los resultados obtenidos muestran un acuífero Patiño como un sistema de aguas subterráneas de parámetros homogéneos con una evolución de los niveles piezométricos muy controlada por la recarga directa de la lluvia y el drenaje diferido del acuífero a través la red hídrica. A efectos prácticos el acuífero se considera desconectado hidráulicamente de las formaciones geológicas circundantes, con la excepción de los materiales aluviales del río Paraguay. Todos los resultados se detallan en el informe correspondiente al modelo integrado de aguas subterráneas y superficiales (INCLAM-HQA, 2018).

A la vista de los resultados de la calibración y la verificación y a la concordancia del modelo conceptual planteado en el diagnóstico con la realidad observada, el modelo numérico de flujo transitorio presentado se puede considerar una herramienta adecuada para la predicción de escenarios a futuro.

4.6.2 Modelo de transporte

A partir del modelo de flujo se ha construido un modelo de transporte que tiene como objetivo ser una herramienta de ayuda a la interpretación del modelo conceptual, ya que, en este caso, no es posible adoptarla como herramienta predictiva dada la ausencia de una serie de datos históricos que permita realizar una calibración del modelo y una adecuada interpretación de los resultados.

Sin embargo, el modelo ha servido para testear dos hipótesis en referencia a la procedencia de los cloruros:

- La primera considera una procedencia de la zona del Chaco, comportándose de forma análoga a un contacto de dos masas de agua diferenciadas

- La segunda contempla la existencia de aguas salobres congénitas producto del relleno del graben.

Con referencia a la primera hipótesis se han realizado diversas simulaciones considerando flujo con densidades variables, concentraciones constantes en el contorno y diferentes profundidades. En ningún caso se dieron las condiciones de flujo adecuadas para permitir una entrada de cloruros hacia Patiño ya que por cota resulta no factible. Esto indicaría que no se comporta como un sistema mar/tierra y que el hecho de explotar una cantidad más o menos importante de agua no afectaría a la concentración de cloruros.

En cuanto a la segunda hipótesis, la calibración no resultó del todo satisfactoria ya que la falta de una serie completa de datos no permite una adecuada calibración del modelo. Sin embargo, esta hipótesis es la que cobra más peso pues es la única que resulta reproducible por el modelo. Por lo tanto, el origen más factible es que la concentración de cloruros detectada provenga de aguas congénitas del acuífero (no del Chaco) con salinidad producida por las condiciones de sedimentación durante el relleno del graben en este sector, aunque sería necesario tener un mayor conocimiento sobre la morfología de la base del acuífero.

4.6.3 Escenarios

El desarrollo de escenarios tiene como objetivo poder responder al gestor y al planificador en que situación podrá estar el acuífero en el caso de que se den unas condiciones concretas de los principales parámetros que lo gobiernan, y a partir de los resultados obtenidos, avanzar un conjunto de decisiones que cambien la tendencia observada y eviten la situación anticipada por el modelo.

En el caso del acuífero Patiño se han desarrollado diversos escenarios futuros que responden a diferentes situaciones y buscan objetivos diferentes.

4.6.3.1 Escenarios para seguimiento y control

Para analizar los escenarios para seguimiento y control se aplica al modelo una batería de hipótesis en que de forma combinada muestran diferentes hipótesis de evolución de los dos principales parámetros que rigen la evolución del acuífero, como son la recarga y las extracciones donde de forma combinada se realiza una disminución del 5 % y un aumento de las extracciones del 5% y el 15%, y para la recarga un aumento del 5 % y una reducción del 5 y el 15 %.

Estos escenarios muestran un acuífero en equilibrio donde un aumento de las extracciones o una reducción de la recarga próximas al 15% pondría al acuífero en una situación de desequilibrio provocando descensos puntuales máximos superiores a los 10 metros, llegando en el caso extremo (15% reducción de la recarga y 15% aumento de las extracciones) a un descenso máximo de 20 metros.

4.6.3.2 Escenarios Prospectivos

Por otra parte, se analizan una serie de escenarios que se han desarrollado para la planificación y gestión del acuífero. En este caso se plantearon 2 tipologías de escenarios prospectivos:

- **Cambio climático:** donde se recogen las simulaciones realizadas con el modelo climático regional RCA4 (basado en el modelo de predicción climática HIRLAM (Strandberg et al., 2014)), tomando como base de referencia el escenario RCP 4.5 (moderado), para el período 1960-2100 incluido en el quinto informe IPCC.

En conclusión, se observó que la evolución climática prevista por los modelos de cambio climático reflejada en la evolución de la recarga, se muestra de la misma forma en la evolución de los niveles: estos descienden en los intervalos de anomalías negativas, pero el acuífero recupera sus niveles actuales en los periodos de anomalías positivas. Por lo tanto, a nivel general no es de esperar una fuerte incidencia en el nivel cuantitativo del acuífero debido al cambio climático

- **Escenarios de gestión:** donde se analizó
 - la expansión urbanística tendencial: evolución de la expansión urbanística y social siguiendo los mismos patrones que en la actualidad.
 - la expansión sostenible: evolución sostenible de las ciudades, siguiendo un límite de “sostenibilidad” que define un número máximo de habitantes, tal y como se define en la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo (IADB, 2014) y el Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (MOPC, geAM - GESTIÓN AMBIENTAL, & MOPC, 2014).

En estos escenarios se obtuvieron descensos de los niveles mucho más elevados de lo esperado. Si bien es una simulación donde se fuerza el sistema, la conclusión extraída es que los resultados nos indican un descenso incompatible con la explotación en las condiciones analizadas, tanto en lo tendencial como en lo sostenible.

Por lo tanto, la presión que soporta el acuífero viene determinada en gran medida de la gestión que se realice de la utilización del recurso.

4.7 Mapa de vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad es un factor clave en la gestión actual del recurso hídrico y su evaluación debe constituir una de las herramientas básicas para la planificación, protección del acuífero, prevención de la contaminación y control y seguimiento de la calidad del agua subterránea.

Los mapas de vulnerabilidad fueron desarrollados por el método DRASTIC, consistente en el cruce de capas de profundidad del agua subterránea, recarga, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona saturada y conductividad hidráulica.

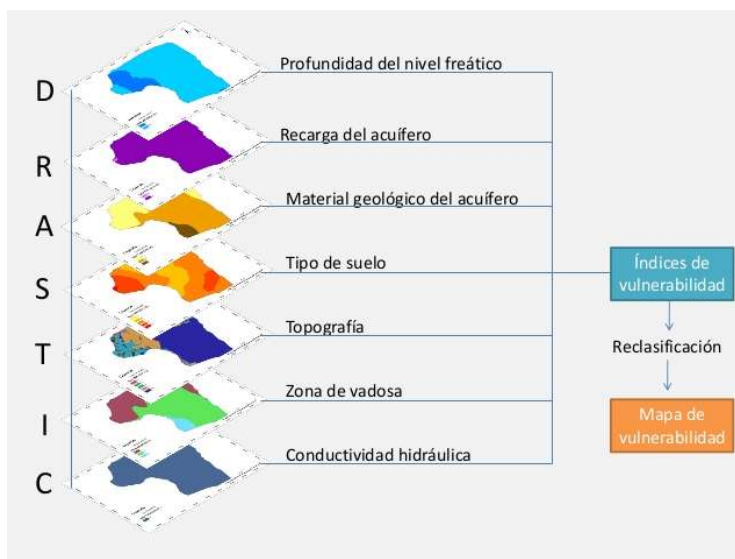


Figura nº14. Esquema de método DRASTIC. Fuente: (Aller, Bennet, Lehr, & Petty, 1985)

4.7.1 Vulnerabilidad intrínseca

La vulnerabilidad intrínseca es la sensibilidad propia del acuífero a una cierta acción o forma de acción, atendiendo únicamente a sus características naturales, sin incluir intensidad, oportunidad y aplicación de esta acción.

En el caso del acuífero Patiño se obtuvieron los resultados plasmados en la siguiente figura:

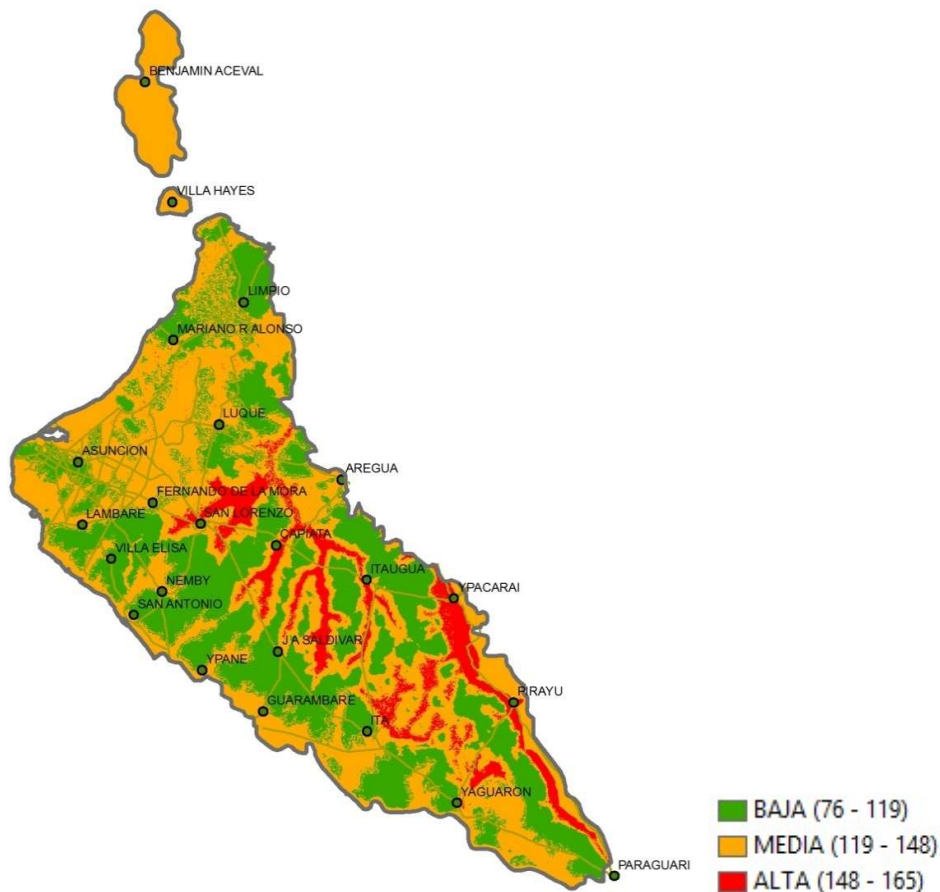


Figura nº15. Vulnerabilidad intrínseca: índices DRASTIC

El resultado obtenido muestra que los parámetros más determinantes son la recarga y la profundidad piezométrica. Tal y como se aprecia en la figura, las zonas de mayor vulnerabilidad corresponden a los cauces y a humedales. Las zonas menos vulnerables son las que presentan una mayor cota.

4.7.2 Vulnerabilidad con efectos del cambio climático

Para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca considerando los efectos del cambio climático se utilizó la misma metodología que el capítulo anterior: el modelo DRASTIC, considerando que las únicas variables que varían son la profundidad piezométrica (D) y la recarga (R). El resto de variables, siendo propiedades intrínsecas del propio acuífero y de la naturaleza del suelo, son

constantes en el tiempo y tendrán el mismo valor en todos los escenarios proyectados. Al igual que en el caso de los escenarios simulados en el modelo se analizaron 3 periodos comprendidos entre los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2099.

Los resultados muestran una ligera disminución de la vulnerabilidad en la zona de Villa Elisa y Ñemby, zona donde el modelo prevé una disminución de la profundidad piezométrica. El resto del ámbito sigue una tendencia homogénea y no presenta grandes diferencias.

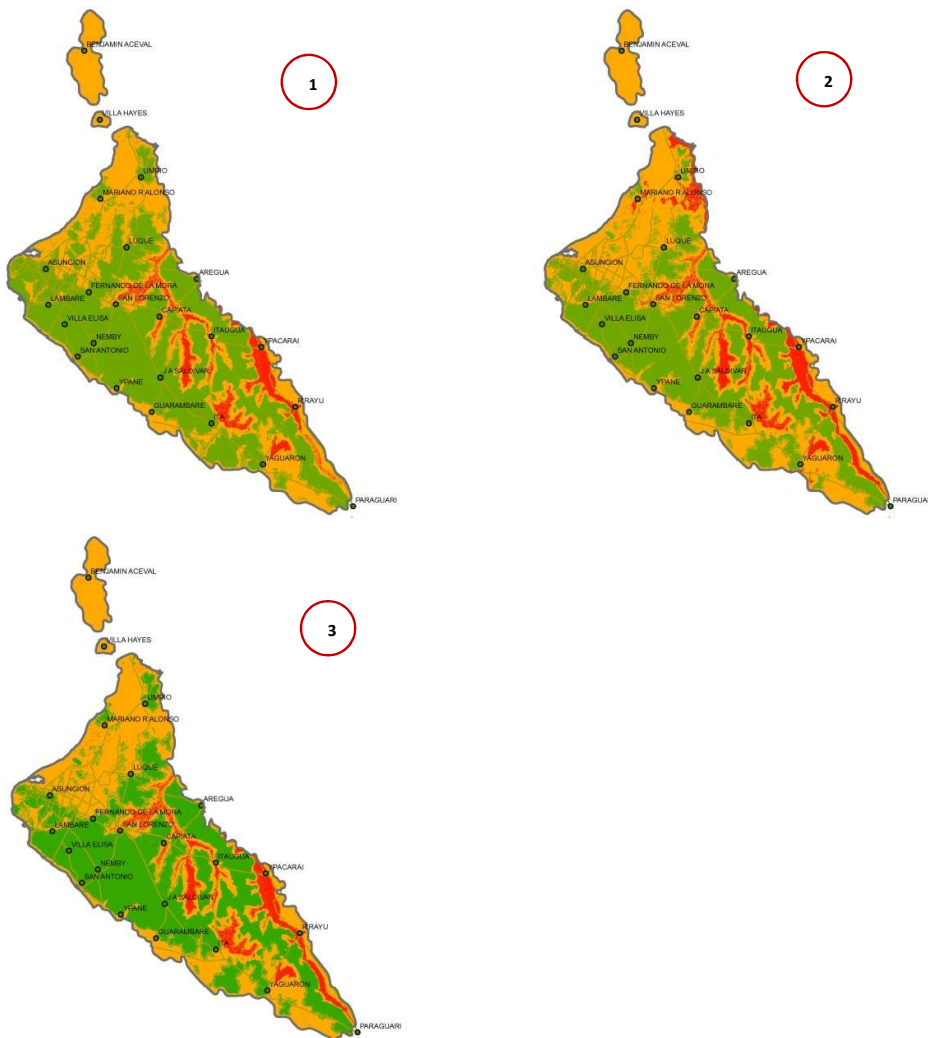


Figura nº16. Índices de vulnerabilidad DRASTIC. Escenarios simulados para 3 periodos:
Periodo 2011 – 2040 (1), Periodo 2041 – 2070 (2) y Periodo 2071 – 2099 (3)

4.7.3 Vulnerabilidad específica

El concepto de vulnerabilidad específica se refiere a la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante concreto, en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca ya definidos en el capítulo anterior. En el caso del acuífero Patiño se estudió la vulnerabilidad del acuífero frente a la presencia de nitratos en el medio, ya que no solo es uno de los indicadores más significativos de la contaminación de las aguas subterráneas, sino que constituye uno de los principales problemas detectados en el

ámbito de estudio y cuya concentración se ha mantenido constante experimentando incluso un ligero aumento.

En este caso la metodología utilizada fue un análisis estadístico multivariante, concretamente la regresión logística, donde se generó un modelo explicativo con el objetivo de modelar cómo influye sobre la probabilidad de aparición de un suceso, la presencia o no de diversas variables.

De esta manera, el resultado obtenido han sido mapas de probabilidad de ocurrencia, y como evento de referencia se consideró la probabilidad de superar 5 mg/l de nitrato. Este valor se escogió ya que es un valor estimado de concentración natural de nitrato en aguas subterráneas, es decir, valor a partir del cual se podría considerar que existe un impacto antrópico sobre el medio, independientemente que no se alcance el límite máximo permisible por legislación.

Una vez aplicada la metodología descrita y detallada en el documento Mapas de vulnerabilidad (INCLAM-HQA, 2018), se obtuvieron una serie de resultados de los cuales el que mejor predecía la ocurrencia del evento considerado era el modelo DRAS. El mapa de vulnerabilidad específica obtenido se muestra a continuación.

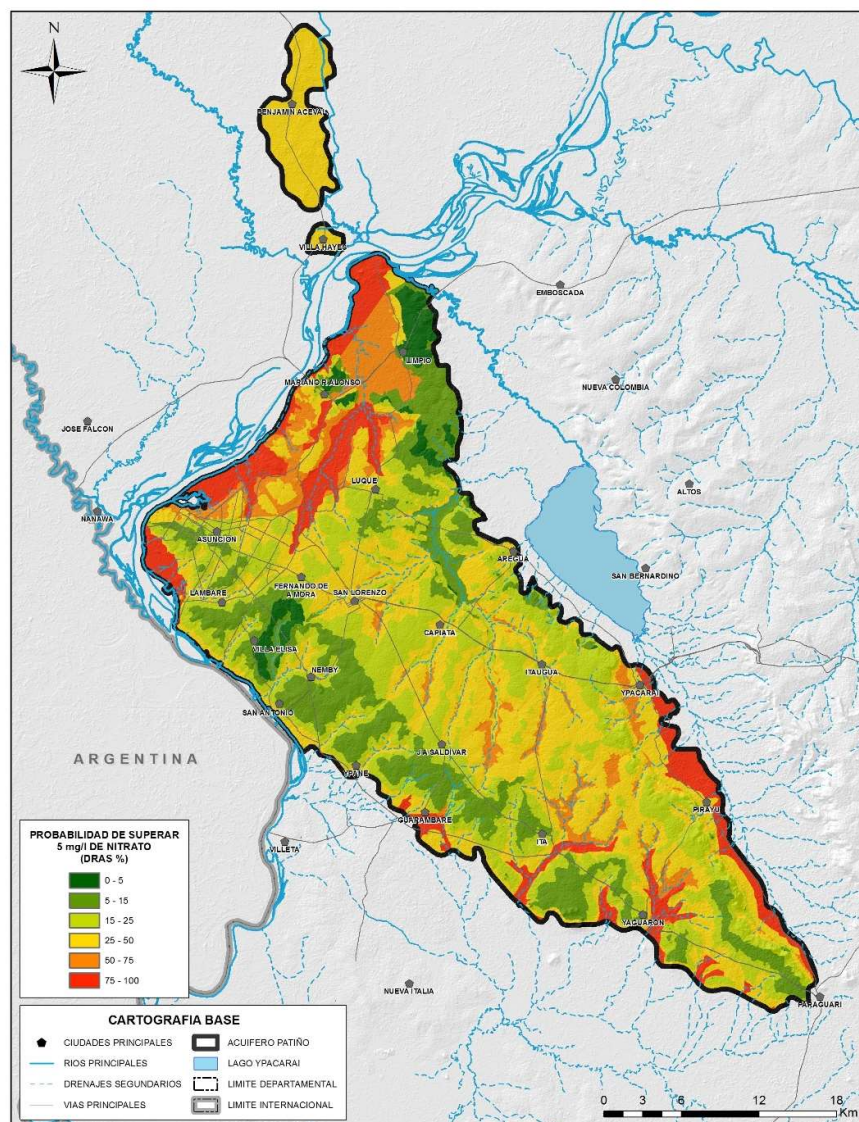


Figura nº17. Vulnerabilidad específica a los nitratos según modelo DRAS

5 DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO

5.1 Problemática detectada

El desarrollo del diagnóstico, el modelo integrado de agua superficial y subterránea y los mapas de vulnerabilidad han permitido realizar un análisis que han considerado todos los datos recopilados con el fin de identificar los problemas y conflictos potenciales del acuífero Patiño.

La identificación de los principales problemas presentes en el acuífero Patiño es una labor que se ha iniciado desde las primeras etapas de este trabajo, durante la elaboración del Diagnóstico, la construcción del modelo de flujo y transporte y la zonificación de la vulnerabilidad. Gracias a todos estos trabajos previos se puede afrontar un proceso de identificación de problemas que deben ser tratados con el objetivo de paliar sus efectos, reducirlos o cambiar su tendencia con la implantación y ejecución del plan estratégico de gestión.

Existen diferentes metodologías de identificación de problemas, identificación de presiones e impactos, tal y como lo prevé la Directiva Marco del Agua (*Directiva 2000/60/CE* del 23 de octubre de 2000), o la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).

Otra forma de afrontar esta identificación, ampliamente utilizada en la planificación es la identificación de los problemas a través de sus causas y efectos, los que comúnmente se llama árbol de problemas. La construcción de los árboles de problemas ayuda a identificar los principales objetivos y metas a alcanzar para cada uno de los problemas identificados y ayuda a definir un relato argumentativo del problema.

Los problemas que se identifican en este proceso son aquellos que ponen en dificultad alcanzar el uso sostenible del acuífero y ponen en riesgo el derecho de acceso de agua de calidad a una parte importante de la población. Bajo esta última consideración se analizan los problemas que ponen en dificultad de alcanzar el buen estado cuantitativo y cualitativo del acuífero.



Figura nº18. Reunión preparatoria del Plan de Gestión (10 agosto 2018)

A continuación se muestran los principales problemas detectados durante el desarrollo del estudio, los cuales han sido expuestos y socializados en la reunión preparatoria del Plan de Gestión llevada a cabo en agosto 2018.

5.1.1 Problemas relacionados con la cantidad el agua

Garantizar el adecuado estado cuantitativo del acuífero es fundamental para el conjunto de la población que actualmente se abastece del agua que extrae del acuífero y que además es su única fuente de agua potable.

Se ha podido observar durante la elaboración de las distintas fases de este estudio como los niveles del acuífero en los últimos años se encuentran estabilizados. Cabe destacar que la estabilización de los niveles se debe entre otras cuestiones al uso conjunto del agua superficial procedente del río Paraguay que abastece la ciudad de Asunción y el agua del acuífero.

Todo y así existe una depresión apreciable en la zona occidental del acuífero en los municipios de Lambaré, Fernando de la Mora o Ñemby, entre otros. En esta región se localizan las extracciones más importantes del acuífero, la estabilización de los niveles por su parte muestra una situación en equilibrio entre entradas y salidas del acuífero para este ámbito, tal y como quedó reflejado en el apartado del balance (ver apartado 4.4).

Esta situación de equilibrio se puede ver alterada si se mantiene en el tiempo la tendencia de crecimiento poblacional existente. Los escenarios evaluados de crecimiento futuro muestran como la sostenibilidad del acuífero se pone en riesgo, generando un riesgo futuro de desabastecimiento poblacional, por tanto es necesario profundizar en el uso alternativo o conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, conociendo de forma precisa los recursos disponibles en su globalidad y realizar una gestión conjunta que sitúe al acuífero como un reservorio estratégico de agua potable.

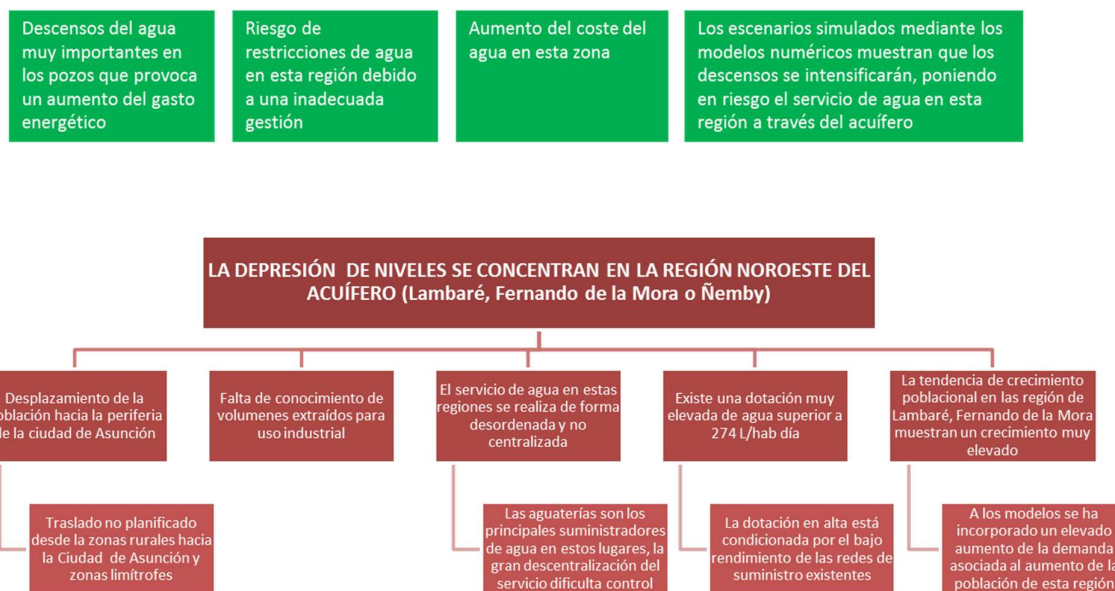


Figura nº19. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado con la cantidad de agua en el acuífero Patiño.

5.1.2 Problemas relacionados con la calidad

Tal y como se menciona en el apartado anterior, garantizar el adecuado estado cuantitativo del acuífero es fundamental. Sin embargo, resulta crucial el estado cualitativo del recurso ya que sin una calidad adecuada muchos de los usos quedan restringidos o bien quedan a expensas de un desembolso económico importante que disminuya cualquier tipo de riesgo.

Tras el análisis de todos los datos recopilados y obtenidos durante el desarrollo de los trabajos de campo y de gabinete se han detectado 2 problemas principales relacionados con la calidad.

5.1.2.1 Nitratos y patógenos

Se han detectado concentraciones muy elevadas de nitratos en gran parte de los puntos analizados durante la segunda campaña de campo (agosto 2018), valores que en gran parte de los casos superan los detectados en analíticas anteriores. Si bien las metodologías de análisis difieren entre los varios estudios recopilados, los resultados obtenidos evidencian una tendencia hacia el aumento de nitratos, y por lo tanto, una degradación progresiva del acuífero. Adicionalmente, se detecta presencia de contaminación microbiológica (coliformes y *Escherichia Coli*) que pone de manifiesto un problema de calidad ya que son elementos que no suelen estar presentes en las aguas subterráneas naturales y cuya procedencia es exclusiva de las aguas residuales de origen humano o animal y que no han sido debidamente tratadas.

Esto puede comprometer la disponibilidad de agua de calidad y generar problemas de seguridad hídrica y de salud pública, además del evidente impacto ambiental y paulatina degradación del acuífero. No hay que obviar tampoco el impacto económico asociado al tratamiento necesario.

El árbol de problemas que se desprende es el mostrado en la Figura nº20.

Este es un problema relacionado con la elevada presión antrópica que está sufriendo el acuífero donde se aprecia una inadecuada gestión de las aguas residuales urbanas. La poca eficiencia de las redes de saneamiento existentes, sumadas a la utilización progresiva de antiguos pozos como zonas de vertidos de aguas sucias, está provocando una continua degradación del acuífero pudiendo poner en riesgo este reservorio de agua como una fuente estratégica de abastecimiento en el futuro.

Es necesario por tanto revertir esta situación mediante unas adecuadas prácticas de saneamiento, tanto desde la perspectiva de las aguas residuales domésticas como las de tipo industrial. Los problemas derivados con la contaminación difusa son siempre difíciles de abordar y deben contemplar medidas tanto estructurales como no estructurales, siendo estas últimas donde se debe poner una mayor atención.



Figura nº20. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado con el aumento de nitratos y presencia de patógenos

5.1.2.2 Problemas de salinización

La salinidad del acuífero es un problema que ha suscitado una gran preocupación para los gestores del acuífero de forma histórica. Durante la fase de diagnóstico y el análisis de del monitoreo se ha podido comprobar como existe una zona con una salinidad superior a la del resto del acuífero en la zona norte, donde además esta circunstancia se correlaciona con aguas cloruradas sódicas, mostrando por tanto, una clara diferenciación entre la composición del agua en este sector y el resto del acuífero. Las concentración del ion cloruro en este sector presenta valores medios inferiores a los 300 mg/L, límite en el que agua comienza a tener sabor, aunque este valor no representa problemas para la salud (Custodio & Llamas, 1996), las concentraciones más elevadas se han registrado cercanas al municipio de Limpio, donde existen pozos no aptos para el consumo humano.

Para poder conocer mejor el problema se ha realizado un profundo análisis y comprobaciones en la fase de modelo donde se plantearon diferentes hipótesis sobre la procedencia de la salinidad, optando como opción más plausible aquella en la que el agua salina es congénita a la formación del acuífero siendo posible que esta agua salinizada se encuentre en profundidad en buena parte de la formación aflorando en las zonas de borde del acuífero, concretamente en el norte del acuífero, donde este descarga al río Paraguay. Esta hipótesis debe ser corroborada mediante la ejecución de estudios específicos que permitan mejorar el conocimiento del acuífero y corroborar esta hipótesis o plantear otras que sean plausibles con las condiciones físicas del acuífero.

Después del análisis de los últimos resultados (ver apartado 4.3), se han detectado pequeñas anomalías que ponen de manifiesto la existencia de salinidad y, aunque no suponga un problema excesivamente grave por el momento, se debe resaltar la necesidad de invertir la tendencia.

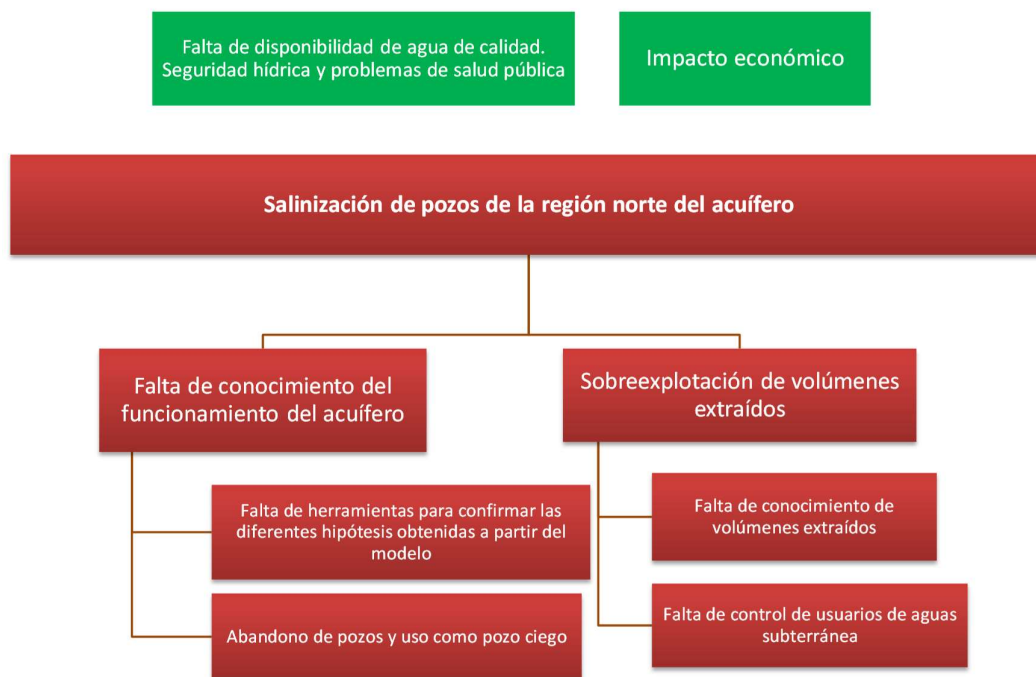


Figura nº21. Árbol de problemas que relaciona las causas y los efectos del problema relacionado la salinización del agua.

6 ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN BASE A LOS MAPAS DE VULNERABILIDAD Y LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE RECARGA

La zonificación del acuífero tiene como objetivo garantizar su sostenibilidad mediante la delimitación de zonas de protección o salvaguarda, en las cuales se debe extremar el control de las actividades que pueden impactar de forma negativa sobre la calidad del agua en el acuífero, evitando su degradación y garantizando el abastecimiento de agua a la población a través de este recurso.

La delimitación de las zonas de especial control y protección se realiza mediante el análisis de la información elaborada en las distintas fases de este estudio. Entre la que destaca la delimitación de las zonas de recarga, el estudio de las principales presiones que a las que está sometido el acuífero y el análisis de la vulnerabilidad intrínseca y específica asociada a la contaminación de nitratos.

La metodología utilizada para delimitar estas zonas consiste en definir aquellas zonas que están sometidas a presiones significativas y presentan una vulnerabilidad elevada (Jiménez-Madrid, Martínez, Luque, Rubio-Campos, & Carrasco, 2013). Esto se realiza mediante la superposición de las diferentes coberturas que contienen esta información mediante la utilización de sistemas de información geográfica.

A continuación se describe la información más relevante para la delimitación de las áreas de protección.

6.1 Zonas de recarga

La elaboración de los modelos de aguas subterráneas ha permitido obtener una estimación de la recarga para el conjunto de las subcuencas que drenan el acuífero Patiño en su conjunto.

Donde se obtuvo como resultado que la media anual de la recarga en el periodo de cálculo son **198,4 mm** que representa un **14 %** de la precipitación media anual en el período.

El acuífero Patiño es un acuífero libre que se recarga en mayor o menor medida a través de toda su superficie, existe una relación directa entre las aguas subterráneas y las cuencas hidrográficas que lo drenan, por tanto la gestión del territorio debe considerar esta dualidad.

Tal y como se puede observar el ratio de recarga es bastante homogéneo en el conjunto del acuífero aunque se puede apreciar una mayor recarga en la vertiente oeste del acuífero en las zonas de Capiatà, San Lorenzo o Itaguà, siendo por tanto la cuenca del Yukyry un área de especial recarga, la cual se debe tener en consideración en la definición de áreas de protección ya que además esta cuenca tiene una incidencia directa sobre la calidad y cantidad del agua del lago Ypacaraí.

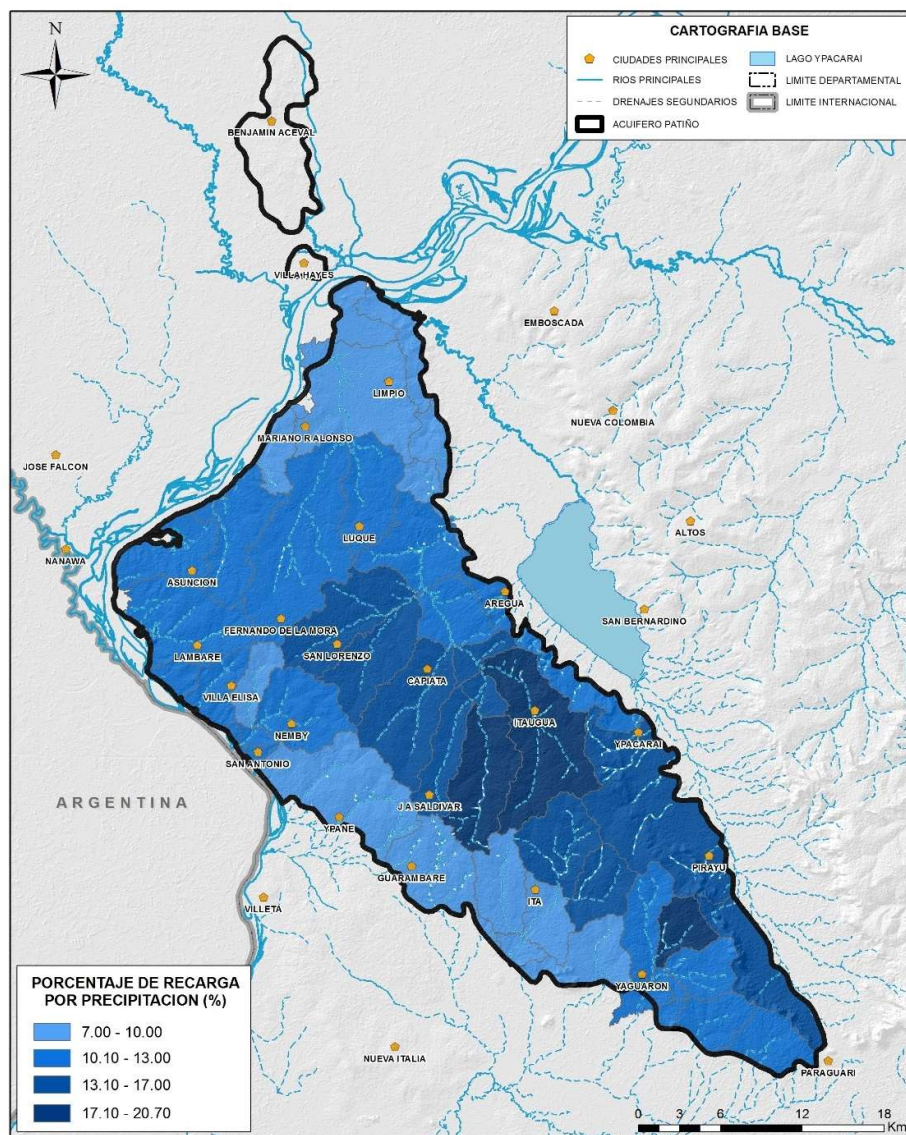


Figura nº22. Distribución espacial de la recarga para las diferentes cuencas que drenan el acuífero Patiño, expresada como % de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Presiones sobre el acuífero

Las principales actividades humanas que presionan el acuífero fueron identificadas durante la elaboración de la fase de diagnóstico (INCLAM-HQA, 2017), estas presiones afectan o impactan sobre el estado cuantitativo del acuífero, produciendo una clara deyección en los ámbitos donde se concentran las captaciones de agua, y sobre el estado cualitativo, provocando la degradación del acuífero debido al aumento de la concentración de elementos que pueden ser nocivos para la salud humana, como es el caso del ión nitrato y los patógenos.

6.2.1 Presiones que afectan al estado cuantitativo

Las zonas de captación muestran aquellos ámbitos donde se concentran las extracciones, de forma mayoritaria estas captaciones están destinadas a ser utilizadas tanto para el consumo humano como a las industrias, siendo por tanto necesario salvaguardar estos ámbitos con el objetivo de garantizar el suministro de agua a las personas que se abastecen del acuífero. En la figura nº243 se puede observar como es en el departamento central donde se concentran las extracciones, concretamente en los municipios de Capiatà, Ñemby, San Antonio, Villa Elisa, Itaguá o Lambaré.

Como se ha mostrado durante la fase de diagnóstico se ha podido comprobar que en estos momentos los niveles permanecen estables, existiendo por tanto un equilibrio entre las entradas y las salidas de agua en el acuífero. Por su parte los niveles piezométricos muestran una clara depresión en los lugares donde se concentran las captaciones antes mencionadas, por tanto aumento de las extracciones en estos lugares provocaría un claro descenso de los niveles piezométricos tal y como se han mostrado el resultado de la aplicación de los modelos numéricos de simulación, considerando los escenarios de aumento de la demanda (ver figura nº234).

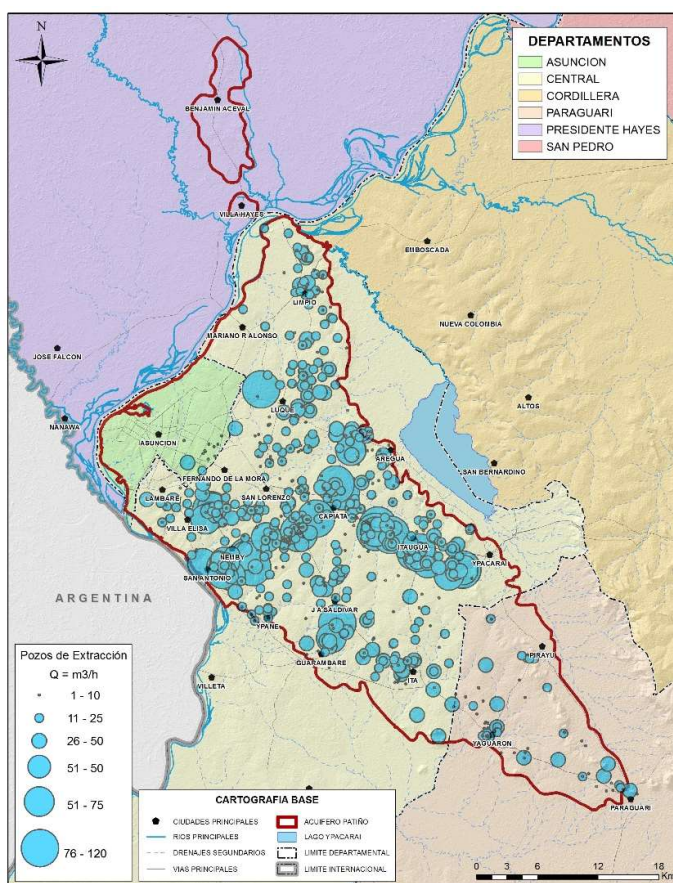


Figura nº23. Distribución de las principales captaciones de agua que se producen en el acuífero. Fuente: Elaboración propia.

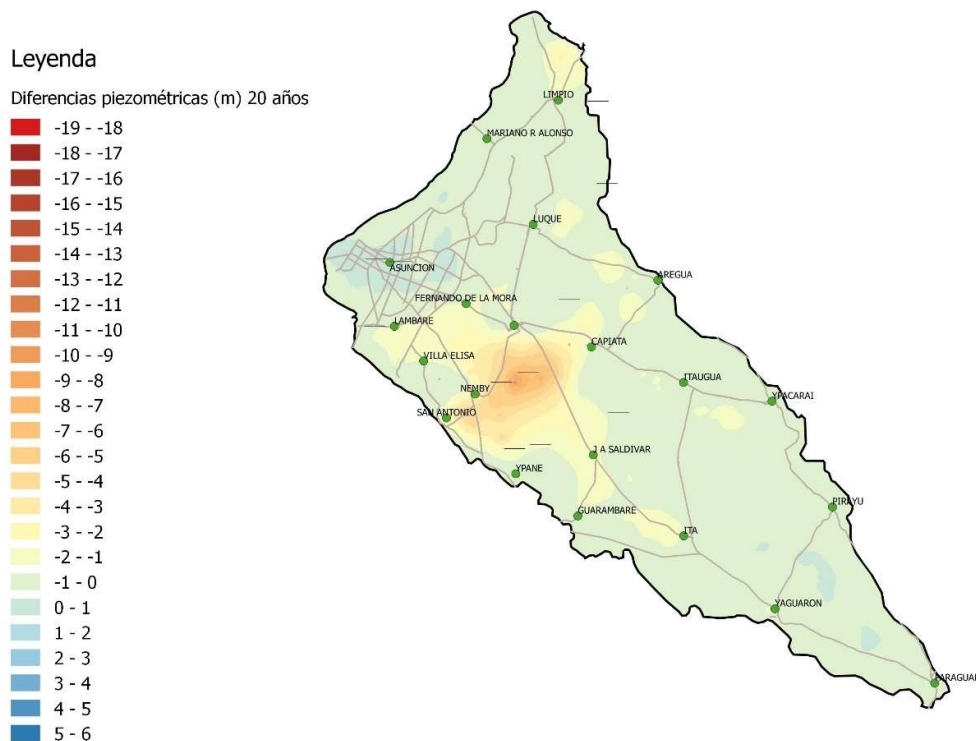


Figura nº24. Distribución de las diferencias piezométricas a 20 años. Obtenidas de la aplicación del modelo numérico de simulación (Recarga +5%, Bombeos +15%)

6.2.2 Presiones que afectan al estado cualitativo

Durante la elaboración de la fase de diagnóstico se han identificado las presiones más significativas sobre el acuífero. Este conjunto de presiones se puede considerar de carácter moderado (carreteras, surtidores de gasolina, pequeña industrias y vertimientos urbanos no controlados), que de forma conjunta configuran una contaminación de carácter difuso que es necesario combatir con medidas de gestión aumentado el conocimiento sobre el acuífero, la concienciación ciudadana, la vigilancia, el control y la aplicación de las medidas coercitivas que la ley contempla en su desarrollo.

La superposición entre las presiones sobre el acuífero y su vulnerabilidad frente a la contaminación, permite identificar las zonas de riesgo potencial a una contaminación. Este cruce es una de las herramientas fundamentales que permiten identificar aquellas zonas de especial control y protección. En la figura nº25 y figura nº26 se muestran las principales presiones identificadas en el acuífero.

Las presiones urbana e industrial se concentran al oeste del acuífero configurado por el eje de Asunción, San Lorenzo y Luque. Por su parte las presiones de origen agrícola y agropecuario se localizan en la zona sur y este del acuífero.

Estas presiones impactan en el acuífero de forma importante, aumentando la concentración de nitratos, patógenos y sustancias relacionadas con los hidrocarburos.

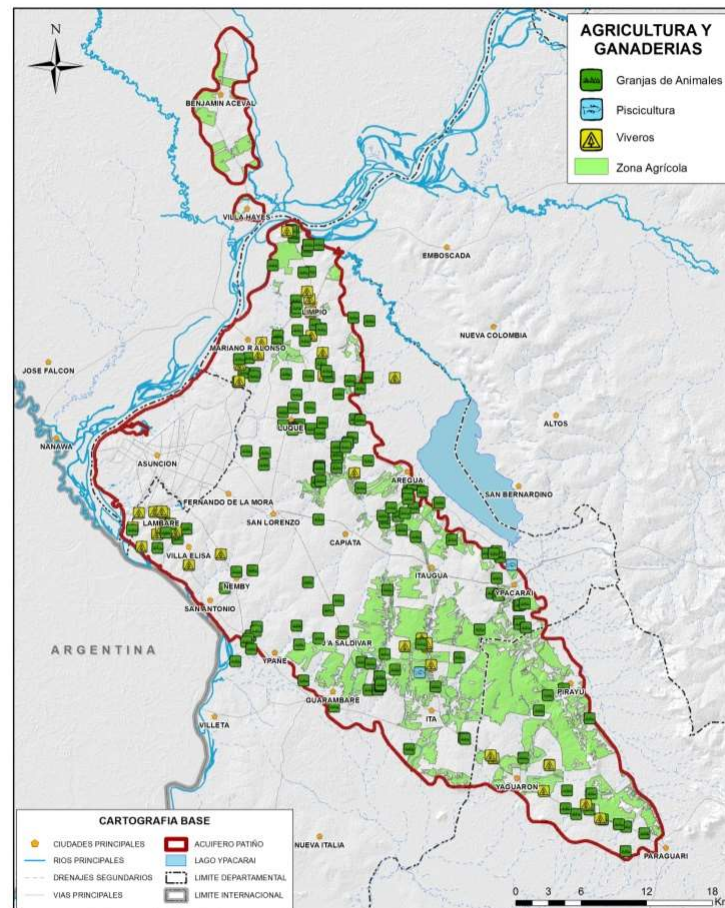
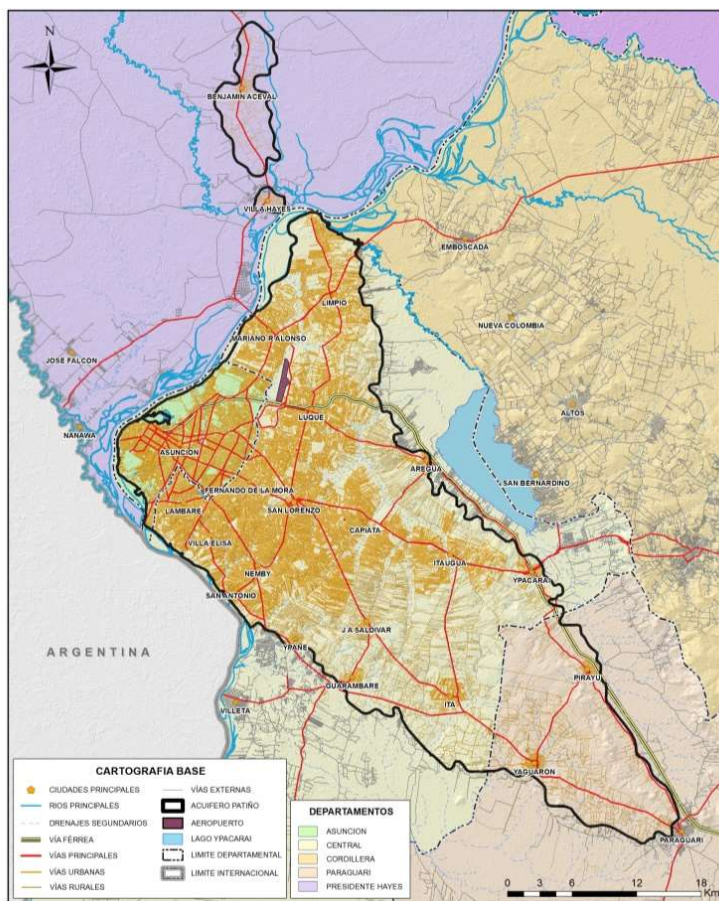


Figura nº25. Presión sobre el acuífero en base a los usos del suelo. Fuente: Elaboración propia.

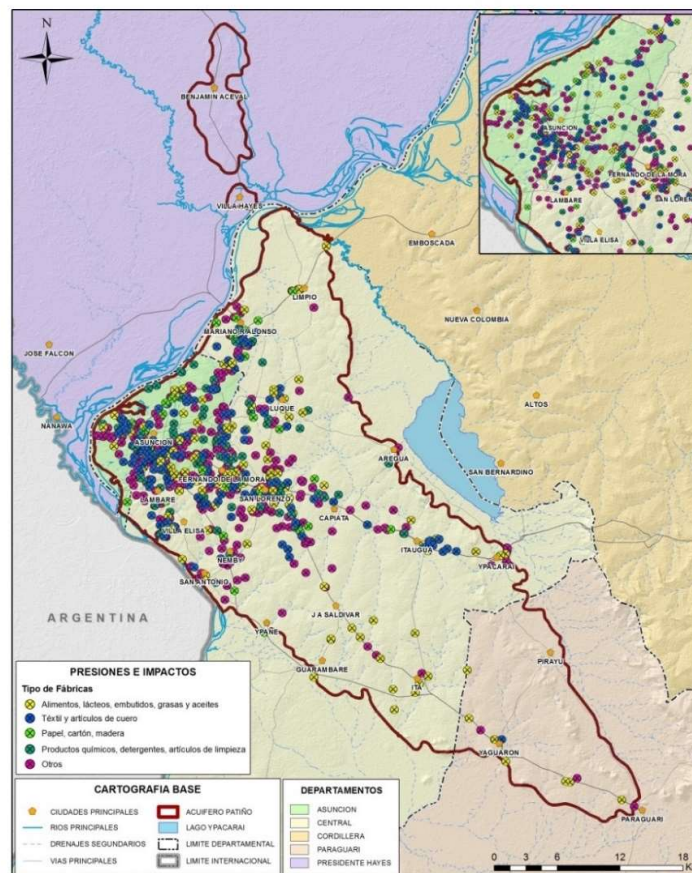
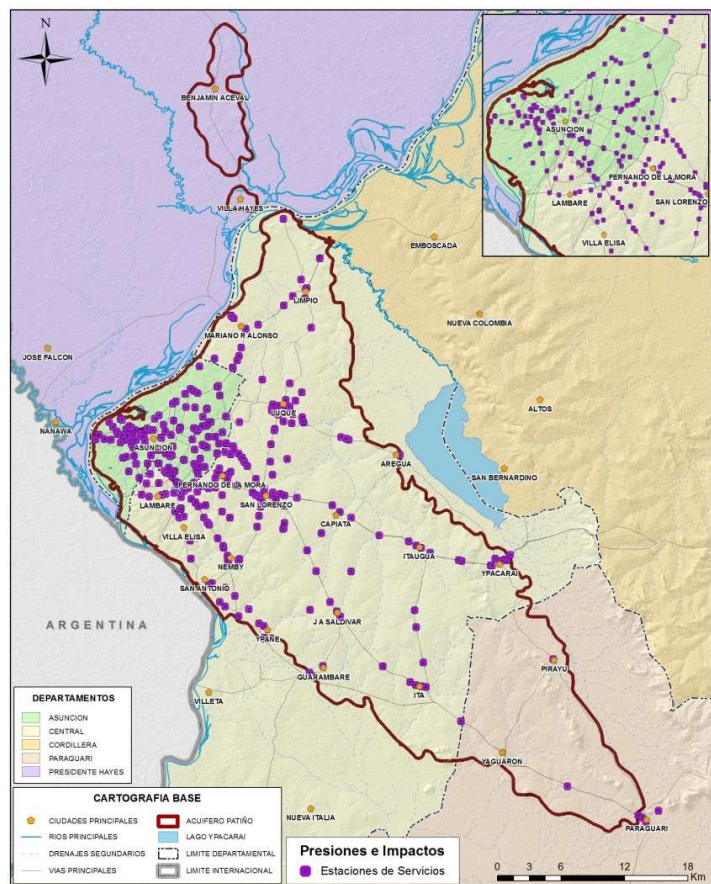


Figura nº26. Presión sobre el acuífero mostrando las principales actividades contaminantes, como son las estaciones de servicio y los diferentes tipos de actividad industrial. Fuente: Elaboración propia.

6.3 Vulnerabilidad intrínseca del acuífero y vulnerabilidad específica a los nitratos

El análisis de vulnerabilidad del acuífero permite identificar zonas donde la probabilidad de que suceda una contaminación es más elevada. Este mismo análisis se ha realizado sobre un elemento específico como es el caso de los nitratos, los cuales se han convertido en uno de los principales problemas a los que se enfrenta el acuífero en la actualidad.

En el apartado 4.7 se explica cómo se han obtenido estos mapas y se muestran los resultados de los mapas de vulnerabilidad del acuífero, tanto la vulnerabilidad intrínseca como aquella otra en la que se muestra la probabilidad de padecer una contaminación por nitratos.

Los resultados que se muestran en estos mapas son una de las principales herramientas que permiten una adecuada gestión del territorio y permiten definir zonas de especial protección que debe proteger el suministro de agua en la actualidad y en el futuro.

6.4 Zonas de protección

Las zonas de protección y salvaguarda son delimitadas en base al cruce entre las presiones y la vulnerabilidad. El análisis conjunto de todos los elementos antes expuestos se realiza mediante la aplicación de criterio experto (Jiménez-Madrid et al., 2013).

De forma habitual las zonas de protección están orientadas a proteger el acuífero de aquellas presiones que impactan sobre la calidad del agua subterránea, en este caso además se busca también proteger aquellas ámbitos que **están sometidos a una elevada extracción**, ya que aunque el acuífero en su conjunto pueda mostrarse en equilibrio, tal y como se ha indicado en el apartado de balance (ver capítulo 4.4), existen un conjunto de zonas que están altamente presionadas y que por tanto se deberían limitar las nuevas licencias de extracción, entre todos ellos destaca el municipio de **San Antonio, Ñemby, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Luque, Areguá, Itauguá, Gurambaré e Itá**, siendo el primer municipio de la lista el más presionado, tal y como se puede observar en la figura donde se muestra el mapa de densidad de las extracciones actuales.

Por otro lado, relacionado con **la protección de la calidad** del acuífero se han cruzado las principales presiones con la vulnerabilidad intrínseca y específica a los nitratos. Obteniendo como resultado los mapas que se muestran en la figura nº27 y figura nº28.

Sobre estos mapas se han identificado aquellas zonas vulnerables que están sometidas a una elevada presión, en este sentido destaca el municipio de **San Lorenzo, Capiatá e Itauguá**, donde se puede observar como existe una concentración muy importante de industrias y estaciones de servicio que se disponen **siguiendo la ruta “Mariscal Estigarribia”**. Cuando esta carretera cruza las zonas más vulnerables del acuífero correspondientes a las zonas aluviales de los cursos que lo drenan, se genera una zona de elevado riesgo asociado a una posible contaminación.

Los pozos situados en estos ámbitos presentan un riesgo muy elevado de sufrir una contaminación, por tanto en estos ámbitos se deben extremar el control y se deben restringir las actividades más contaminantes. Es importante además, reforzar la concienciación ciudadana con el objetivo de disminuir al máximo los vertimientos no controlados de aguas residuales.

En base a toda esta información se proponen a continuación las diferentes áreas de protección relacionadas con el estado cuantitativo y cualitativo.

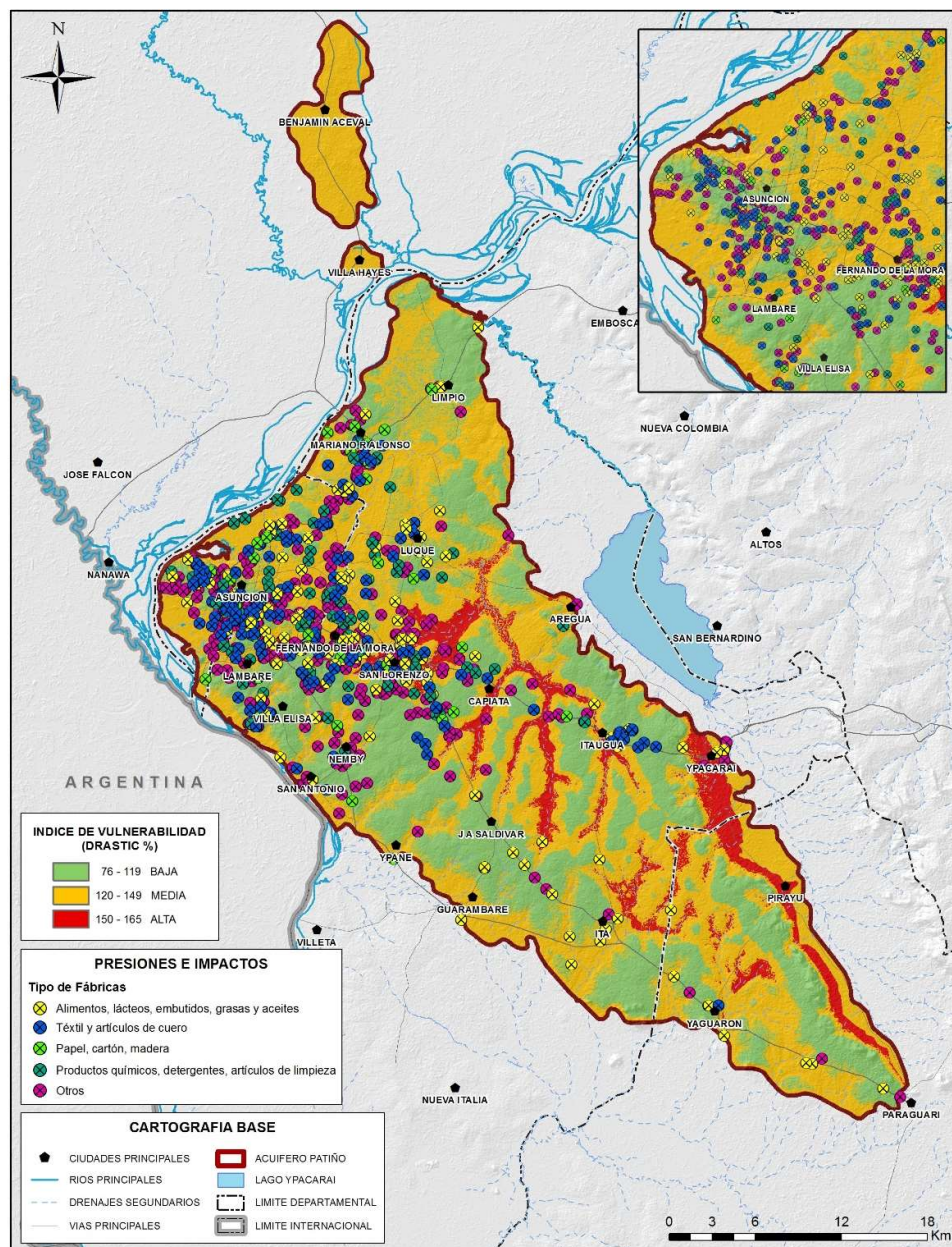


Figura nº27. Relación entre la vulnerabilidad y las presiones relacionadas con las actividades industriales contaminantes. Fuente: Elaboración propia.

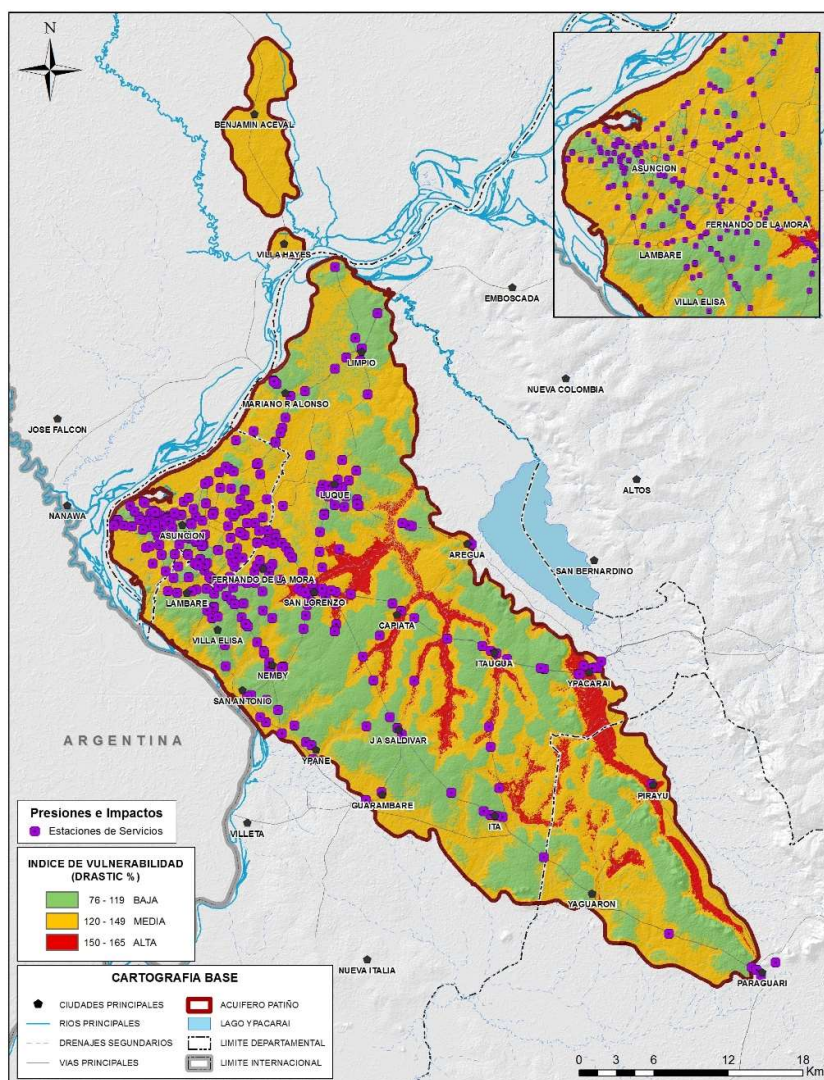


Figura nº28. Relación entre la vulnerabilidad intrínseca y . Fuente: Elaboración propia.

6.4.1 Zonas de limitación a la extracción

En base a lo descrito anteriormente, se ha procedido a delimitar una propuesta de zonas de limitación a la extracción. En dichas zonas, las medidas de control de extracción de caudal deberían ser prioritarias con el objetivo de asegurar una explotación sostenible del acuífero.

Los datos obtenidos de descenso piezométrico en los escenarios de aumento de la demanda (ver figura nº23) serán los que se consideren como “mapas de vulnerabilidad” en cuanto a la cantidad del recurso ya que nos indican que zonas son más sensibles a sufrir descensos de nivel ante escenarios de sobreexplotación. En este caso se ha utilizado el escenario H3 (recarga +5% y bombeo +15%), a partir del cual se ha generado un ráster asimilable a la vulnerabilidad donde se ha considerado vulnerabilidad alta en aquellas zonas donde los niveles descendían más de 5m, vulnerabilidad media donde descendían de 1 a 5m, y vulnerabilidad baja el resto de casos.

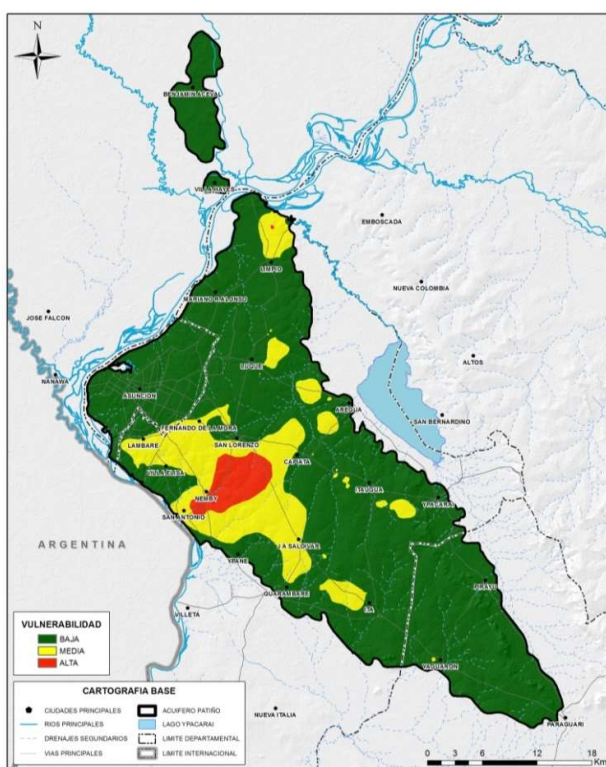


Figura nº29. Zonas vulnerables a descensos piezométricos. Fuente: propia a partir de los escenarios del modelo de flujo

La presión ejercida sobre la cantidad se refleja en los volúmenes de extracción de los pozos. Para ellos se utilizaron todos los datos de extracción recopilados y se realizó un mapa de densidad de puntos considerando solo aquellos que tenían un volumen de extracción superior a los 30 m³/s, ya que son los que se consideran una presión significativa sobre el acuífero. El mapa se reclasificó según 3 rangos según la presión ejercida: alta, media y baja.

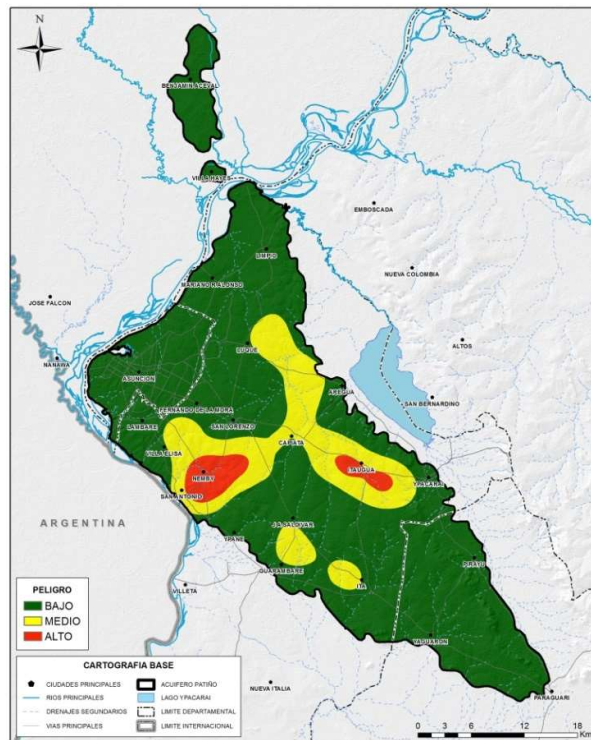


Figura nº30. Mapa de presiones sobre la cantidad del acuífero. Fuente: elaboración propia

Cruzando estas capas se obtiene un mapa de riesgo, el cual permitirá detectar las zonas que requieren una especial atención en cuanto a la cantidad.

Para cuantificar el riesgo se asignan valores de 1 a 3 a los diferentes rangos de vulnerabilidad y presión. La multiplicación de estas capas permitirá entonces obtener un valor de riesgo comprendido entre 1 y 9 según la siguiente matriz:

Peligro \ Vuln.	1	2	3
1	1	2	3
2	2	4	6
3	3	6	9
		Riesgo Bajo	
		Riesgo Medio	
		Riesgo Alto	

Tabla nº2. Matriz de cálculo de riesgo

Se obtiene el mapa de riesgos que nos indicará qué zonas tienen más riesgo de sufrir la contaminación del acuífero por las actividades realizadas.

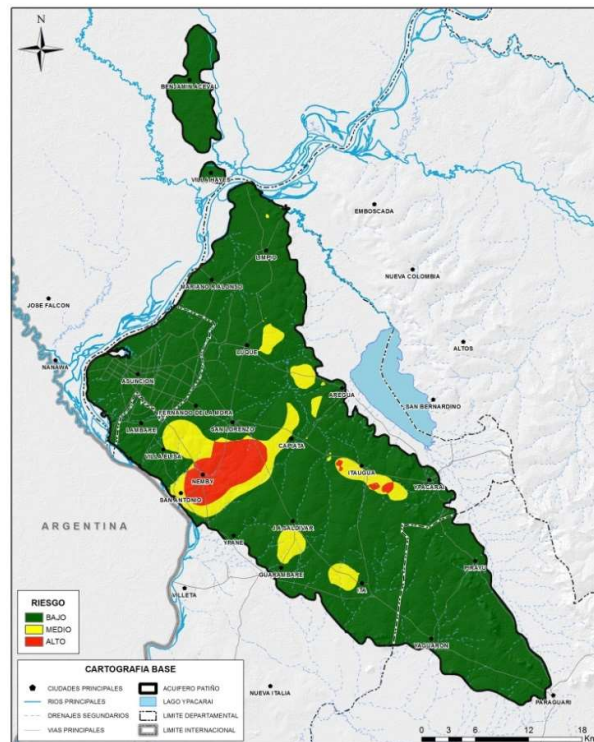


Figura nº31. Mapa de riesgo por extracción. Fuente: elaboración propia

Considerando que las zonas que requieren una especial protección son aquellas que han quedado definidas como “riesgo alto”, se propone la siguiente zonificación, donde las regiones de Ñemby y San Antonio son las que necesitan un especial control sobre las extracciones de agua subterránea.

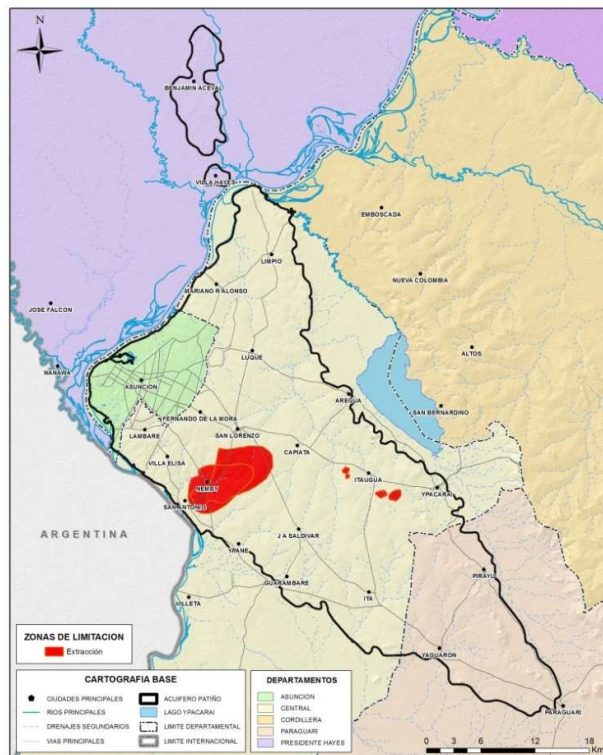


Figura nº32. Zonas de limitación a la extracción. Fuente: elaboración propia

El seguimiento y control de estas zonas de limitación a la extracción debe apoyarse de la red de monitoreo que se definió para el acuífero Patiño (INCLAM-HQA, 2017). Tal y como se observa en la Figura nº33, existen varios piezómetros con los cuales se puede realizar el seguimiento adecuado. Los puntos de control de calidad, como NEM33, al ser puntos bombeados no son adecuados para el seguimiento cuantitativo. Por ello se propone:

- **Piezómetro 02:** seguimiento de los niveles en la zona de Ñemby
- **Piezómetro 17:** equipado con sensor remoto. No se sitúa sobre la zona de alto riesgo, pero está relativamente cercano y su medición en continuo es un sistema de alerta ante cualquier descenso anormal
- **Piezómetro 06:** seguimiento de niveles en la zona de Itaguá.

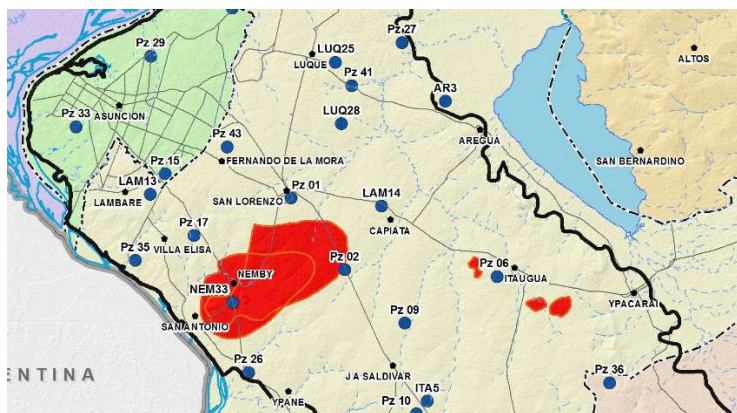


Figura nº33. Detalle de puntos de control para las zonas de limitación a la extracción

6.4.2 Zonas de especial protección relacionada a la contaminación

Para la delimitación de las zonas de protección a la contaminación se ha realizado el cruce entre las capas de vulnerabilidad intrínseca (INCLAM-HQA, 2018) con las presiones de actividades potencialmente contaminantes.

En el caso de la vulnerabilidad se ha utilizado el mapa de vulnerabilidad intrínseca generado con el modelo DRASTIC y que se clasificó en 3 rangos (vulnerabilidad baja, media y alta).

Para las presiones se han tenido en cuenta las principales actividades potencialmente contaminantes, tal y como se definió en el documento diagnóstico (INCLAM-HQA, 2017), y a las cuales se le asigna un rango de 1 a 3 según representen un peligro alto (3), medio (2) o bajo (1). De esta manera se han considerado 3 grandes grupos de presiones:

- Las actividades industriales (fábricas de alimentos, embutidos, aceites, papel, textiles, cueros y químicas) a las cuales se le asigna un peligro alto (3).
- Las estaciones de servicio, a las cuales se le asigna un peligro medio (2).
- Las vías y actividades desarrolladas en estas, a las cuales se ha establecido peligro bajo (1).

Al no disponer de datos concretos sobre la producción de sustancias contaminantes de estas actividades, se ha procedido a elaborar los mapas de densidad de puntos en el casos de las actividades industriales y estaciones de servicio, lo que nos indicará aquellas zonas que tienen una mayor concentración de dichas actividades, y por ende, donde existe un mayor peligro de contaminación. Se obtienen los denominados mapas de calor que se muestran en las siguientes figuras.

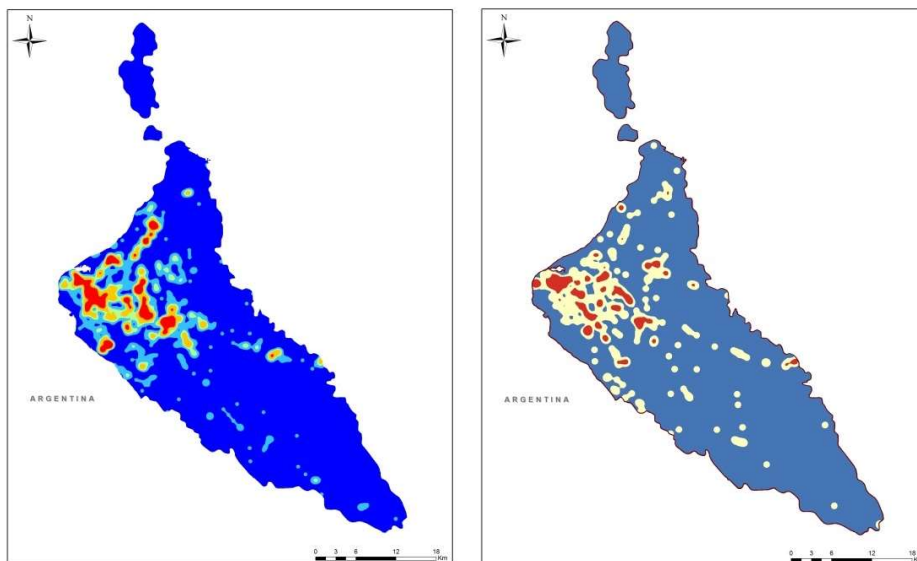


Figura nº34. Mapas de calor de actividades potencialmente contaminantes (izquierda) y de estaciones de servicio (derecha). Fuente: elaboración propia

En el caso de las vías y actividades asociadas se ha realizado un buffer al cual se le asigna el valor de 1 (peligro bajo).

El mapa de peligrosidad se obtiene a partir de la suma de estas 3 capas ponderadas por su valor de peligrosidad (1, 2 o 3), obteniendo el siguiente mapa, el cual se ha reclasificado en 3 rangos (baja, media y alta) para facilitar su cálculo posterior:

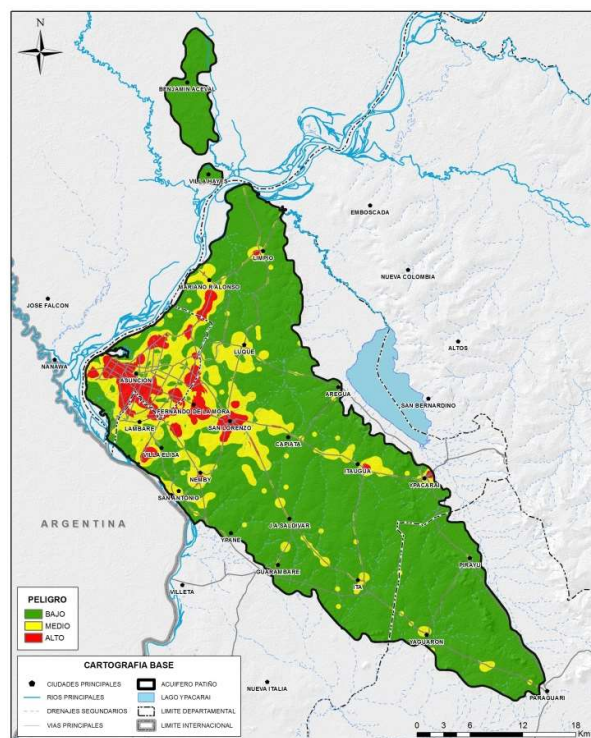


Figura nº35. Mapa de peligrosidad por actividades potencialmente contaminantes.

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se procede a multiplicar el mapa de peligrosidad por el mapa de vulnerabilidad intrínseca, obteniendo el mapa de riesgos según la matriz definida en la Tabla nº2.

Se obtiene el mapa de riesgos que nos indicará qué zonas tienen más riesgo de sufrir la contaminación del acuífero por las actividades realizadas.

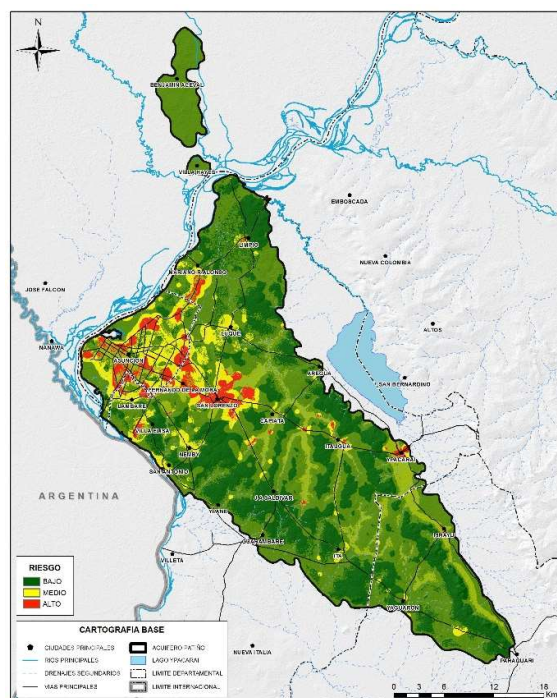


Figura nº36. Mapa de riesgos por contaminación. Fuente: elaboración propia

Considerando que las zonas que requieren una especial protección son aquellas que han quedado definidas como “riesgo alto”, se propone la siguiente zonificación:

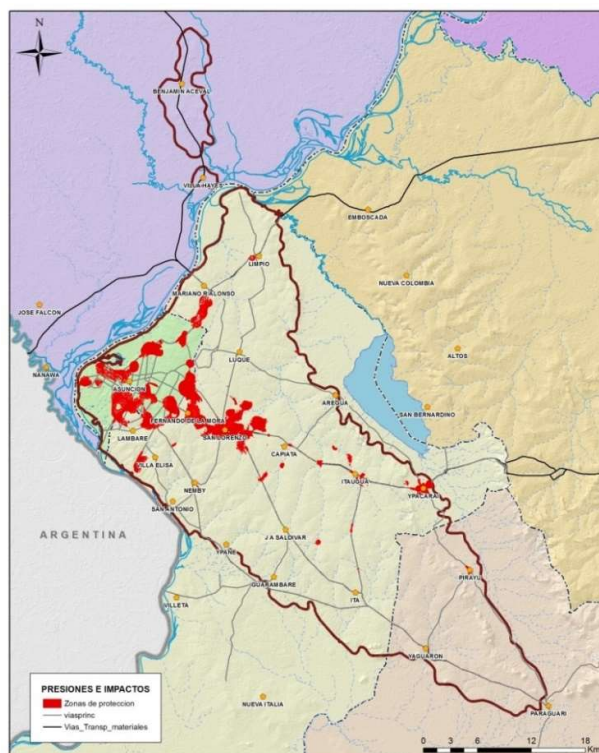


Figura nº37. Zonas de especial protección a la contaminación. Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura, las zonas de protección propuestas se centran en los núcleos urbanos de San Lorenzo, Fernando de la Mora, Villa Elisa, Mariano Roque Alonso y Asunción, además de alguna pequeña zona en Itauguá e Ypacarai.

El seguimiento y control de estas zonas de protección a la contaminación debe apoyarse de la red de monitoreo que se definió para el acuífero Patiño (INCLAM-HQA, 2017). Tal y como se observa en la siguiente figura, existen varios puntos que permiten un control de estas zonas especiales.

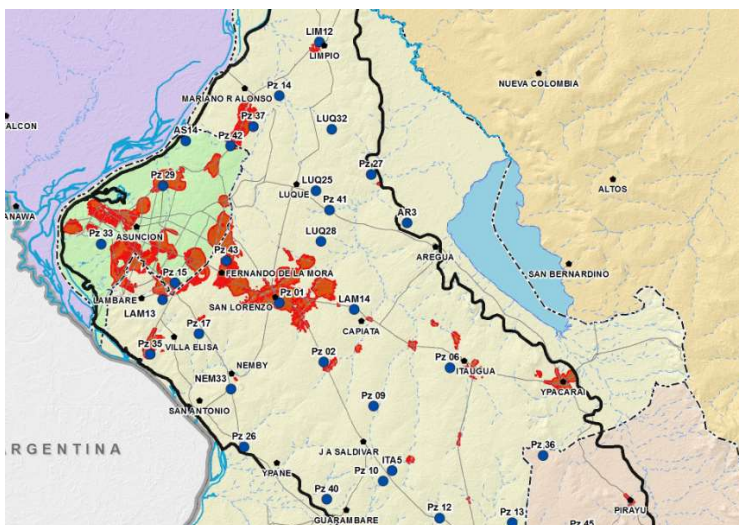


Figura nº38. Detalle de puntos de control para las zonas de protección a la contaminación

Se destacan los siguientes puntos de seguimiento (todos ellos ya incluidos en la red de control de la calidad del agua):

- **Piezómetro LIM12:** seguimiento de la calidad en la zona de Limpio. Pozo equipado con bomba perteneciente a la Junta de Saneamiento de Limpio.
- **Piezómetro 37:** seguimiento de la calidad en la zona de Mariano Roque Alonso
- **Piezómetros 29 y 15:** seguimiento de la calidad en la zona de Asunción.
- **Piezómetro 01:** seguimiento de la calidad en la zona de San Lorenzo
- **Piezómetro 43:** seguimiento de la calidad en la zona de Fernando La Mora
- **Piezómetro 35:** seguimiento de la calidad en la zona de Villa Elisa

El núcleo urbano de Ypacarai sería la única zona de especial protección que no tendría un punto de control para el seguimiento y control de la calidad con las medidas de protección que se propongan.

6.4.3 Zonas de especial protección a los nitratos

Para la delimitación de las zonas de protección a los nitratos se ha realizado el cruce entre las capas de vulnerabilidad específica a los nitratos (INCLAM-HQA, 2018) con las presiones susceptibles a ser generadoras de nitratos.

En el caso de la vulnerabilidad se ha utilizado el mapa de vulnerabilidad específica a los nitratos generado con el modelo DRAS que resultó ser el mejor modelo predictivo según la metodología utilizada. El mapa se trabajó en porcentajes pero a efectos de este cálculo se ha

reclasificado a 3 rangos (vulnerabilidad baja, media y alta) para simplificar el proceso de multiplicación con el mapa de peligrosidad.

Para las presiones se han tenido en cuenta las principales actividades generadoras de nitratos: por una parte las actividades agrícolas (tal y como se muestra en la Figura nº25) y por otra parte los nitratos procedentes del vertimiento de aguas residuales urbanas. A estas presiones se le asigna un rango de 1 a 3 según sean altas (3), medias (2) o bajas (1).

En el caso de las actividades agrícolas se han considerado las áreas de uso agrícola que fueron definidas Plan Estratégico Metropolitano de Asunción (PEMA) (MOPC, 2014), elaborado entre 2012 y 2014, considerando estas regiones como una presión media ya que son presiones difusas. Además se ha realizado un mapa de densidad de puntos con la ubicación de las granjas de ganado y lecherías (DGEEC, 2012), considerando esta presión como alta al ser una zona concentrada.

En el caso de la presión por vertimiento de aguas residuales urbanas se ha utilizado también el mapa de usos del suelo de PEMA, diferenciando en este caso las zonas de alta densidad urbana, de media densidad urbana y de baja densidad urbana, asignándoles a cada una su rango correspondiente.

De esta manera se ha generado un mapa de presiones o de peligro utilizando los siguientes rangos:

Presión	Peligro asignado
Áreas de uso agrícola	2
Granjas de ganado y lecherías	3
Áreas de alta densidad urbana	3
Áreas de media densidad	2
Áreas de baja densidad urbana	1

Tabla nº3. Rangos de peligro asignado

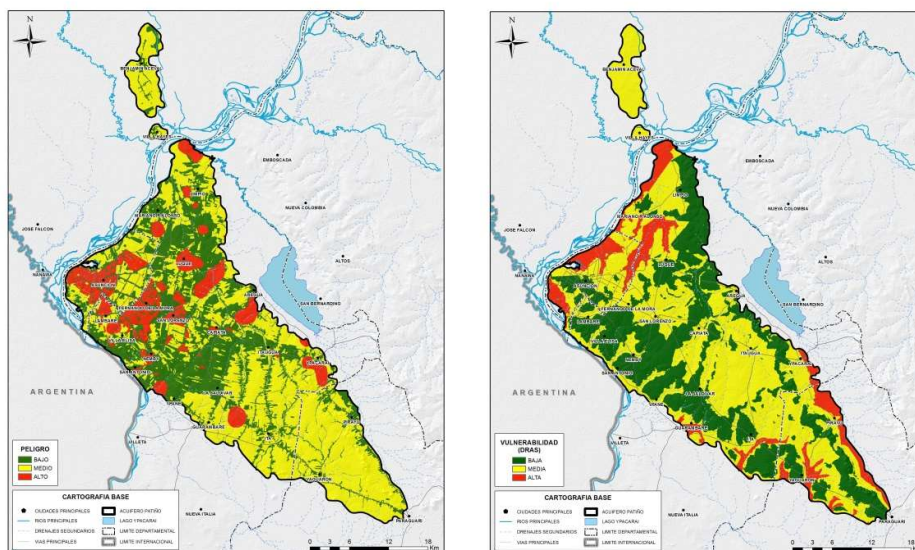


Figura nº39. Mapa de peligros por actividades generadoras de nitratos (izquierda) y mapa de vulnerabilidad específica a los nitratos según modelo DRAS (derecha). Fuente: elaboración propia

Finalmente, y al igual que se ha hecho en los apartados anteriores, se procede a multiplicar el mapa de peligrosidad por el mapa de vulnerabilidad específica a los nitratos, obteniendo el mapa de riesgos según la matriz ya definida en la Tabla nº2.

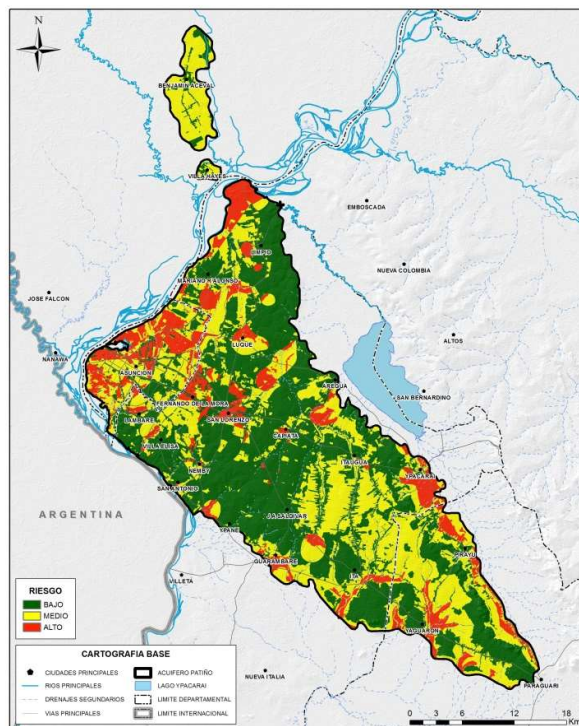


Figura nº40. Mapa de riesgos por contaminación al nitrato

Considerando que las zonas que requieren una especial protección son aquellas que han quedado definidas como “riesgo alto”, se propone la siguiente zonificación:

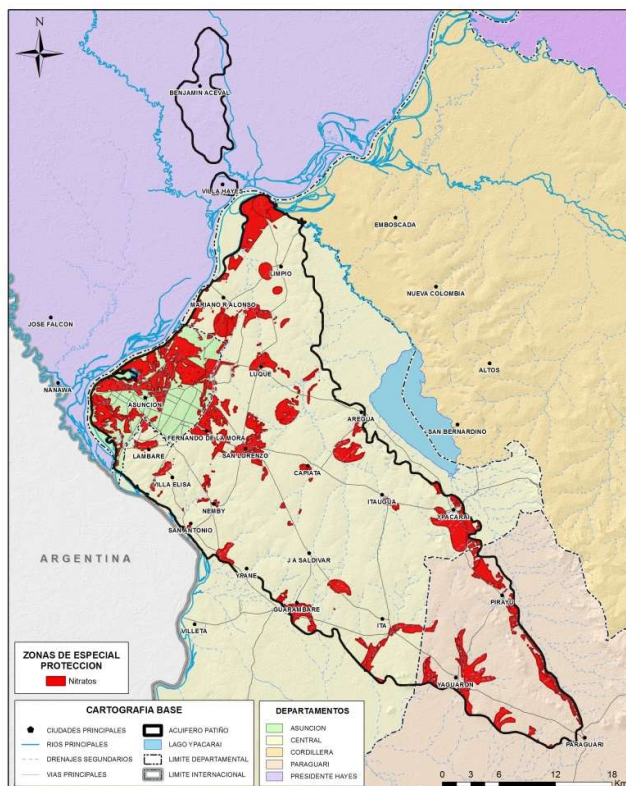


Figura nº41. Zonas de especial protección a los nitratos

Como se observa en la figura, las zonas de protección propuestas se centran en los núcleos urbanos de Asunción, San Lorenzo, Fernando de la Mora y las zonas de Limpio, Ypacarai, Pirayú, Guarambaré e Itá.

El seguimiento y control de estas zonas de protección a la contaminación por nitratos debe apoyarse de la red de monitoreo que se definió para el acuífero Patiño (INCLAM-HQA, 2017), y muy especialmente en los puntos que se definieron para formar parte de la red de seguimiento y control de nitratos y de los cuales se analiza a continuación la idoneidad de su elección en función de las zonas de protección propuestas.

- **Piezómetro 01:** seguimiento de la calidad en la zona de San Lorenzo
- **Piezómetro 29 y 33:** seguimiento de la calidad en la zona de Asunción. Se propone la sustitución del piezómetro 15 (originalmente definido como punto de control de nitratos en el Plan de Monitoreo) por el 29 al estar ubicado en una zona de mayor riesgo con una mayor necesidad de control.
- **Piezómetro 17:** seguimiento de la calidad en la zona de Villa Elisa.
- **Piezómetro 43:** seguimiento de la calidad en la zona de Fernando La Mora
- **Piezómetro 35:** seguimiento de la calidad en la zona de Villa Elisa
- **LUQ25:** seguimiento de la calidad en la zona de Luque. Se propone incluir también a esta red de control de piezómetros el punto LUQ28.
- **LAM13:** seguimiento de la calidad en la zona de Lambaré.
- **Piezómetros 23, 20 y 40:** seguimiento de la calidad en Yguarón, Itá y Guarambaré respectivamente. Originalmente estos puntos no se incluyen en la red de control de

nitratos definida en el Plan de Monitoreo. Se propone su inclusión para control de las zonas de protección definidas.

Como se ha indicado en el apartado anterior, la zona de Ypacarai y Pirayú no disponen de puntos de control con las características adecuadas para realizar el seguimiento y control de la calidad del agua subterránea y de las medidas que puedan plantearse.

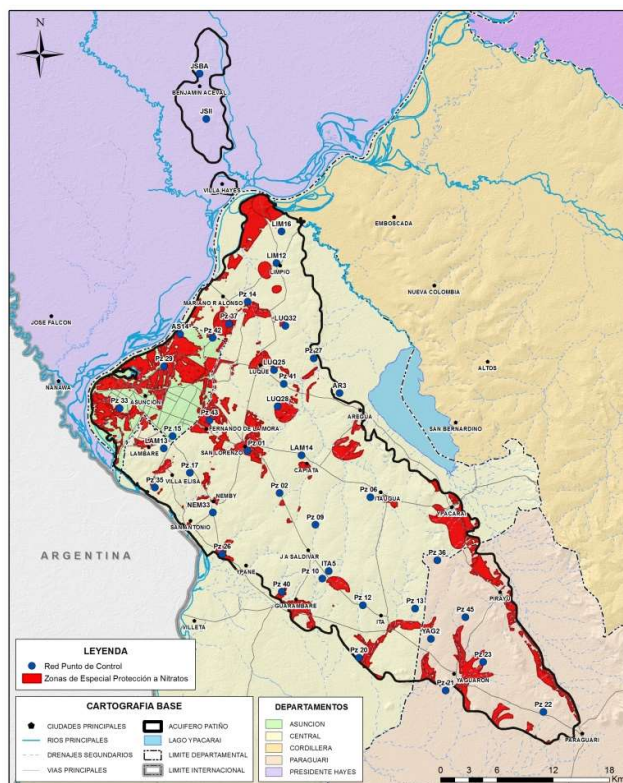


Figura nº42. Detalle de puntos de control para las zonas de protección a los nitratos

7 LÍNEAS ESTRATÉGICAS DE ACCIÓN

7.1 Líneas estratégicas

En base a la problemática detectada se proponen una serie de líneas estratégicas de acción que permitan en la medida de lo posible dar respuesta a los objetivos planteados.

Por una parte, una serie de líneas de acción que dan respuesta a los principales problemas detectados en las fases anteriores del estudio: mejora de la gestión de los recursos hídricos para los problemas de cantidad, y mejora de la preservación de la calidad del agua y reducción de la vulnerabilidad para los problemas de calidad.

Por otra parte, se definen otras líneas de acción que aportan soluciones de manera transversal a los problemas mencionados, como es toda aquella problemática relacionada con la institucionalidad, cultura del agua y financiamiento de la gestión del agua.

Línea de acción	
1	Línea de acción de Gestión integrada de los recursos hídricos
2	Línea de acción de mejora de preservación de la calidad del agua y reducción del riesgo
3	Línea de acción de mejora de la institucionalidad para la implementación del Plan
4	Línea de acción de mejora de la cultura del agua
5	Línea de acción de mejora del financiamiento

Tabla nº4. Líneas estratégicas propuestas

Lógicamente, la problemática detectada abarca un amplio espectro de posibles respuestas y soluciones que no todas están en los alcances de este Plan ya que corresponden a actuaciones correspondientes y planificadas (o ya en ejecución) por otras instituciones.

En los apartados siguientes se contemplarán únicamente las medidas aplicables en referencia a las aguas subterráneas del ámbito del acuífero Patiño.

7.1.1 Línea estratégica 1: Gestión integrada de los recursos hídricos

Esta línea estratégica incluye todas aquellas actuaciones que van a dar respuesta al principal problema detectado en cuanto a la cantidad del recurso subterráneo que es la depresión de niveles localizados en la zona noroeste del acuífero Patiño.

7.1.1.1 Programa 1: Vigilancia, seguimiento y control

Para dar respuesta a los principales problemas detectados resulta imprescindible disponer de datos que permitan conocer el estado cuantitativo y cualitativo del agua y su evolución, permitiendo de esa manera una gestión más eficaz y adecuada a los problemas que puedan presentar.

Al respecto resultan imprescindibles las herramientas generadas en este Plan: por una parte, la implementación del Plan de monitoreo en cuanto al control y seguimiento de los niveles piezométricos y la calidad del recurso subterráneo, así como su actualización periódica en función de la evaluación de resultados obtenidos. Por otra parte, el modelo integrado de agua subterránea y superficial, que deberá actualizarse con los datos obtenidos y mantenerse como una herramienta de predicción para la ayuda a la toma de decisiones.

A todas estas actuaciones se añade la recuperación de piezómetros no operativos y el mantenimiento de las actuales estaciones de medición automática que son la principal fuente de información en continuo que permiten detectar cualquier variación que pueda indicar un posible problema. También se considera necesario la implementación de planes de contingencia que permitan actuar ante la detección de problemas durante las labores de seguimiento y control.

7.1.1.2 Programa 2: Conocimiento del recurso

La mejora continua del conocimiento del recurso hídrico es imprescindible para dar respuesta a la problemática detectada en el ámbito del acuífero Patiño, con lo cual deben plantearse algunas actuaciones que permitan aumentar el conocimiento adquirido en etapas anteriores.

La hipótesis planteada como origen de la salinidad presente en el acuífero necesita tener piezómetros exploratorios con características específicas que permitan conocer mejor la base del acuífero. Además, se considera necesario una mejora en el conocimiento de las aguas superficiales con la implementación de estaciones de aforos que permitan el cálculo de los volúmenes de recarga que afectan directamente al acuífero.

7.1.1.3 Programa 3: Coordinación con otras instituciones

La solución a los problemas actuales de abastecimiento pasa por una mejora de las infraestructuras de abastecimiento y de saneamiento, de esta manera se mejora el servicio, se evitan fugas y se evita la contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de aguas usadas urbanas. Si bien todas estas medidas estructurales ya son gestionadas y están planificadas por otras instituciones, corresponde a MADES la coordinación con éstas para hacer el seguimiento de las mejoras llevadas a cabo en este aspecto.

En resumen,

LÍNEA ESTRATÉGICA 1: GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	Problema al que da solución	Responsable
Programa 1: Vigilancia, seguimiento y control		
➤ Mejora y actualización del modelo de flujo desarrollado	Falta de información actualizada y falta de conocimiento del funcionamiento del acuífero	MADES
➤ Implementación del Plan de monitoreo de control y seguimiento de niveles piezométricos y control de calidad	Falta de información actualizada y falta de conocimiento del funcionamiento del acuífero	MADES
➤ Actualización periódica del Plan de monitoreo en función de la evaluación de los resultados obtenidos	Falta de información actualizada y falta de control de las actividades antrópicas	MADES
➤ Definición de las acciones de contingencia que respondan a posibles problemas detectados en las tareas de seguimiento y control	Falta de implementación de acciones como resultado de monitoreos	MADES

➤ Plan de operación y mantenimiento de las estaciones automáticas, que permitan detectar y solucionar problemas que puedan surgir	Falta de información actualizada y falta de implementación de acciones como resultado de monitoreos	MADES/DMH
➤ Implementación de nuevas estaciones automáticas en ubicaciones estratégicas, recuperación de piezómetros no operativos	Falta de conocimiento del funcionamiento del acuífero	MADES
Programa 2: Conocimiento del recurso		
➤ Construcción de nuevos piezómetros exploratorios (profundidades de más de 300m) con las características adecuadas	Falta de información para confirmar las diferentes hipótesis de procedencia de la salinidad	MADES
➤ Implementación estaciones de aforo	Falta de información de la descarga del acuífero en los cauces	MADES/DMH
Programa 3: Coordinación con otras instituciones		
➤ Coordinación para la mejora de la infraestructura de abastecimiento poblacional	Mejorar la situación de explotación intensiva para revertir las tendencias observadas	MADES/MOPC, SENASA, ESSAP, municipios, otras
➤ Coordinación para la mejora de la infraestructura de saneamiento urbano		MADES/MOPC, SENASA, ERSSAN, municipios, otras

Tabla nº5. Resumen línea estratégica 1

7.1.2 Línea estratégica 2: Preservación de la calidad del agua y reducción del riesgo

Esta línea estratégica incluye todas aquellas actuaciones que van a ayudar a la preservación de la calidad del agua subterránea y a contribuir a la reducción de la vulnerabilidad del acuífero. Los programas y actuaciones contemplados en esta línea de acción responden a la problemática detectada debido al aumento de nitratos y patógenos y a la problemática de salinización natural del acuífero.

7.1.2.1 Programa 1: Establecimiento de zonas de protección para las aguas subterráneas

Uno de los problemas detectados es la inexistencia de zonas de protección de las aguas subterráneas (zonas de recarga o zonas muy vulnerables). Los mapas de vulnerabilidad fueron elaborados para detectar aquellas zonas que tienen una mayor vulnerabilidad y que por lo tanto deben ser protegidas para asegurar que la calidad de las aguas subterráneas no se deterioren por las acciones antrópicas que pudieran afectarlas. El establecimiento de zonas de protección es un paso clave para evitar la degradación del acuífero y por lo tanto, asegurar una fuente de recurso de calidad.

Las medidas de protección definidas deben comenzar por restricciones de uso en aquellas zonas más vulnerables y presionadas, así como otras medidas como delimitación de perímetros de protección, sellado de pozos o implementación de buenas prácticas agrarias.

En resumen,

LÍNEA ESTRATÉGICA 2: PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DEL RIESGO	Problema al que da solución	Responsable
Programa 1: Establecimiento de zonas de protección para las aguas subterráneas		
➤ Implementación de restricciones de uso en zonas de protección	Débil protección de las fuentes de agua	MADES
➤ Elaboración de buenas prácticas agrarias	Débil protección de las fuentes de agua	MADES/MAG y Gobernaciones
➤ Establecimiento de perímetros de protección	Débil protección de las fuentes de agua	MADES/Municipios
➤ Actualización y delimitación de las áreas de protección especial definidas en el Plan	Falta de información actualizada y control del uso del suelo y débil protección de las fuentes de agua	MADES
➤ Sellado de pozos abandonados	Débil protección de las fuentes de agua. Abandono de pozos y uso como pozos ciegos.	MADES/SENASA

Tabla nº6. Resumen línea estratégica 2

7.1.3 Línea estratégica 3: Fortalecimiento de institucionalidad para la implementación del Plan

Esta línea estratégica incluye todas aquellas actuaciones que van a contribuir al fortalecimiento de la institucionalidad para la implementación del Plan. Esta línea responde de manera transversal a los problemas detectados, ya que el éxito de las actuaciones propuestas depende de una institucionalidad fuerte que sea capaz de articular a los diferentes actores y de llevar a cabo una adecuada gestión integrada de los recursos hídricos.

7.1.3.1 Programa 1: Formalización de usuarios de agua subterránea

Uno de los principales problemas detectados es la falta de conocimiento preciso de los volúmenes extraídos, especialmente en lo referente al uso industrial del cual se dispone de pocos datos. Por lo tanto, es difícil precisar cómo afectan éstos, tanto a la cantidad como a la calidad del recurso subterráneo. Este conocimiento permitiría una mejor gestión, distribución y tratamiento de los mismos, por lo que se hace necesario que las autoridades competentes tengan un control de los usuarios en activo del agua subterránea.

Las medidas a considerar sería una formalización de los usuarios de agua subterránea y la instalación de medidores de volúmenes de extracción.

7.1.3.2 Programa 2: Fortalecimiento de las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos

La elevación de la SEAM a rango de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha sido un paso fundamental en el fortalecimiento de la institucionalidad. Su función es la de diseñar,

establecer, supervisar, fiscalizar y evaluar la política ambiental nacional, lo que responde en parte a la problemática detectada en el acuífero Patiño. Para ello, se necesita ir reforzando sus funciones con personal capacitado y conocedor de los problemas, así como conocer todos aquellos actores implicados en el ciclo del agua.

LÍNEA ESTRATÉGICA 3: FORTALECIMIENTO DE LA INSTITUCIONALIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN		Problema al que da solución	RESPONSABLE
Programa 1: Formalización de usuarios de agua subterránea			
➤ Formalización de usuarios de agua subterránea	Falta de control de usuarios de agua subterránea	MADES	
➤ Instalación de elementos de medición de volúmenes extraídos	Falta de conocimiento de volúmenes extraídos	MADES	
Programa 2: Fortalecimiento de las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos			
➤ Mejora de la institucionalidad de la institución responsable de la gestión de los recursos hídricos	Insuficiente estructura actual	MADES	
➤ Mapeo de los diferentes actores implicados en la distribución de agua subterránea	Falta de control en las actividades antrópicas		

Tabla nº7. Resumen línea estratégica 3

7.1.4 Línea estratégica 4: Cultura del agua

Como eje transversal común a las diferentes problemáticas detectadas se incluye la línea estratégica de cultura del agua ya que es una línea base que debe contribuir a llevar a cabo las diferentes actuaciones propuestas.

Según la Unesco (2005), la cultura del agua es definida como el conjunto de modos, estrategias y medios utilizados para la satisfacción de necesidades fundamentales relacionadas con el agua y con todo lo que depende de ella, incluyendo lo que se hace con el agua, en el agua y por el agua. Se manifiesta en la lengua, en las creencias, en los valores; en las normas y formas organizativas; en las prácticas tecnológicas y en la elaboración de objetos materiales; en las creaciones simbólicas (artísticas y no artísticas); en las relaciones de los hombres entre sí y de éstos con la naturaleza y en la forma de resolver los conflictos generados por el agua. La cultura del agua es por lo tanto, un aspecto específico de la cultura de un colectivo que comparte, entre otras cosas, una serie de creencias, de valores y de prácticas relacionadas con el agua.

7.1.4.1 Programa 1: programa de cultura del agua

Todas las líneas estratégicas comentadas tienen un componente en común: la cultura del agua, eje fundamental para hacer entender y concienciar de los problemas que pueden suponer en

un futuro el no poder tener una fuente de agua de calidad y que pueden acarrear problemas de salud.

En resumen,

LÍNEA ESTRATÉGICA 4: CULTURA DEL AGUA		Problema al que da solución
Programa 1: Programa de cultura del agua		
➤ Programas de capacitación a técnicos y responsables de la gestión del recurso	Escasa cultura del agua	MADES, municipios
➤ Promoción y divulgación del conocimiento del acuífero	Escasa cultura del agua	MADES, MEC, Gobernación, municipios
➤ Promoción del conocimiento del acuífero en el ámbito académico	Escasa cultura del agua	MADES, Universidades

Tabla nº8. Resumen línea estratégica 4

7.1.5 Línea estratégica 5: Mejora del financiamiento de la gestión del agua

Finalmente, como eje transversal a todos los mencionados anteriormente, el financiamiento es un aspecto clave necesario para la implementación de todas aquellas medidas propuestas. Sin este aspecto la gestión del agua no puede ser sostenible y se dificulta en gran medida las posibilidades de éxito.

7.1.5.1 Programa 1: Búsqueda de fuentes de financiamiento para gestión del recurso

El principal programa propuesto se basa en la sustentabilidad del cobro del agua por canon que permitiría el desarrollo y avance de la gestión del agua y el facilitar la aplicabilidad de las medidas propuestas.

LÍNEA ESTRATÉGICA 5: FINANCIAMIENTO DE LA GESTIÓN DEL AGUA		Problema al que da solución
Programa 1: Sustentabilidad económica para gestión del recurso		
➤ Implementar el cobro del agua por canon establecido en la ley 3239/2007	Falta de financiamiento de la GIRH	

8 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PLAN

La valoración económica del plan tiene como objetivo poder realizar una previsión financiero – económica que dote de un presupuesto operativo que permita llevar a cabo el conjunto de actuaciones previstas y se garantice la sostenibilidad económica del plan y en consecuencia su adecuada ejecución.

La valoración económica se realiza en base a costes unitarios de las principales partidas de ejecución previstas en la elaboración de cada proyecto. Es un presupuesto estimado, que deberá ser revisado durante el proceso de diseño de los proyectos concretos.

A continuación, se presentan el presupuesto estimado para cada uno de los proyectos descritos anteriormente, indicando como se ha realizado la valorización y el periodo considerado. Todos los valores se han plasmado en dólares norteamericanos.

LÍNEA ESTRATÉGICA 1:					
GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	Responsable	DESCRIPCIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL COSTE	Coste estimado	Periodo considerado	Costo anual
Programa 1: Vigilancia, seguimiento y control					
Mejora y actualización del modelo de flujo desarrollado	MADES	Se considera el coste de una persona perteneciente al departamento de planificación dedicado al 50% al desarrollo de los modelos y contrataciones a expertos en modelos del ámbito privado y/o universitario	\$45,000	Anual	\$45,000
Implementación del Plan de monitoreo de control y seguimiento de niveles piezométricos y control de calidad	MADES	Costes asociados a la toma de muestras según la frecuencia indicada en el plan de monitoreo	\$20,000	Trimestral	\$80,000
Actualización periódica del Plan de monitoreo en función de la evaluación de los resultados obtenidos	MADES	Coste unitario del estudio de actualización en el periodo de planificación	\$30,000	5 años	\$6,000
Definición de las acciones de contingencia que respondan a posibles problemas detectados en las tareas de seguimiento y control	MADES	Coste unitario de la elaboración de acciones de contingencia estudio de actualización en el periodo de planificación	\$30,000	5 años	\$6,000
Plan de operación y mantenimiento de las estaciones automáticas, que permitan detectar y solucionar problemas que puedan surgir	MADES/ DMH	Visitas periódicas a las estaciones automáticas para mantenimiento, además de visitas puntuales en caso de detectar problemas en el registro de datos	\$3,000	Anual	\$3,000
Implementación de nuevas estaciones automáticas en ubicaciones estratégicas, recuperación de piezómetros no operativos	MADES	Recuperación de los 12 piezómetros no operativos y 3 piezómetros destruidos.	\$90,000	Durante el periodo de planificación	\$18,000

Programa 2: Conocimiento del recurso					
Construcción de nuevos piezómetros exploratorios (profundidades de más de 300m) con las características adecuadas	MADES	Se considera la construcción de 2 pozos exploratorios de 300m de profundidad con todos los ensayos asociados.	\$80,000	Durante el periodo de planificación	\$16,000
Implementación estaciones de aforo	MADES/DMH	Se ha considerado la construcción de 7 nuevas estaciones de aforo en diferentes localizaciones de todo el ámbito de estudio (Nivel y Caudal)	\$203,000	Durante el periodo de planificación	\$40,600
Programa 3: Coordinación con otras instituciones					
Coordinación para la mejora de la infraestructura de abastecimiento poblacional	MADES/ MOPC, SENASA, ESSAP, municipios, otras	Contempla la reunión periódica con los actores que intervienen en la gestión (3 reuniones anuales)	\$6,000	Anual	\$6,000
Coordinación para la mejora de la infraestructura de saneamiento urbano	MADES/ MOPC, SENASA, ERSSAN, municipios, otras	Contempla la reunión periódica con los actores que intervienen en la gestión (3 reuniones anuales)	\$6,000	Anual	\$6,000
TOTAL			\$513,000		\$226,600

Tabla nº9. Valoración económica línea estratégica 1

LÍNEA ESTRATÉGICA 2: PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DEL RIESGO	Responsable	DESCRIPCIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL COSTE	Coste estimado	Periodo considerado	Costo anual
Programa 1: Establecimiento de zonas de protección para las aguas subterráneas					
Implementación de restricciones de uso en zonas de protección	MADES	Partida contempla posibles rescates de concesiones de agua, vigilancia y control cuantificada en base a los recursos humanos necesarios	\$30,000	5 años	\$6,000
Elaboración de buenas prácticas agrarias	MADES/ MAG y Gobernaciones	Elaboración de manuales y talleres	\$21,000	5 años	\$4,200
Establecimiento de perímetros de protección	MADES/ Municipios	Horas de personal de la oficina de planificación	-	5 años	-
Actualización delimitación de las áreas de protección especial definidas en el Plan	MADES	Horas de personal de la oficina de planificación	-	5 años	-
Sellado de pozos abandonados	MADES/ ENASA	Partida alzada a valorar en función del avance obtenido	\$30,000	Anual	
TOTAL			\$81,000		\$10,200

Tabla nº10. Valoración económica línea estratégica 2

LÍNEA ESTRATÉGICA 3: FORTALECIMIENTO DE LA INSTITUCIONALIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN		RESPONSABLE	DESCRIPCIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL COSTE	Coste estimado	Periodo considerado	Costo anual
Programa 1: Formalización de usuarios de agua subterránea						
Formalización de usuarios de agua subterránea	MADES		Se realiza el presupuesto que considera una oficina de gestión de las concesiones	\$50,000	Anual	\$50,000
Instalación de elementos de medición de volúmenes extraídos	MADES		Se evalúa el coste relacionado con la fiscalización del cumplimiento, conjuntamente con la recogida de datos e inventario (sin contabilizar los elementos de medición)	\$50,000	Anual	\$50,000
Programa 2: Fortalecimiento de las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos						
Fortalecimiento de la institución responsable de la gestión de los recursos hídricos	MADES		El presupuesto contempla el coste asociado a la estructura de la futura institución responsable de la gestión de los recursos hídricos	\$250,000	Anual	\$250,000
Mapeo de los diferentes actores implicados en la distribución de agua subterránea	MADES		El presupuesto contempla el coste asociado a las reuniones de coordinación con los actores implicados en la gestión del agua	\$6,000	Anual	\$6,000
TOTAL				\$356,000		\$356,000

Tabla nº11. Valoración económica línea estratégica 3

LÍNEA ESTRATÉGICA 4:		DESCRIPCIÓN DE LA	Coste	Periodo	Costo anual
CULTURA DEL AGUA		EVALUACIÓN DEL COSTE	estimado	considerado	
Programa 1: Programa de cultura del agua					
Programas de capacitación a técnicos y responsables de la gestión del recurso	MADES, municipios	Partida para la cultura del agua destinada a capacitación, promoción y divulgación del conocimiento a diversos niveles y con carácter anual	\$50,000	Anual	\$50,000
Promoción y divulgación del conocimiento del acuífero	MADES, MEC, Gobernación, municipios				
Promoción del conocimiento del acuífero en el ámbito académico	MADES, Universidades				
TOTAL			\$50,000		\$50,000

Tabla nº12. Valoración económica línea estratégica 4

LÍNEA ESTRATÉGICA 5:					
FINANCIAMIENTO DE LA GESTIÓN DEL AGUA		DESCRIPCIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL COSTE	Coste estimado	Periodo considerado	Costo anual
Programa 1: Sustentabilidad económica para gestión del recurso					
Implementar el cobro del agua por canon establecido en la ley 3239/2007	MADES	Implantación considera el coste relacionado con la puesta en funcionamiento de una oficina de recaudación con 3 personas	\$75,000	Anual	\$75,000
TOTAL			\$75,000		\$75,000

Tabla nº13. Valoración económica línea estratégica 5

En resumen, la valoración total incluyendo las 5 líneas de acción remonta a 717 800 dólares norteamericanos.

LÍNEA DE ACCIÓN ESTRATÉGICA	COSTO ANUAL
GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	\$226.600
PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DEL RIESGO	\$10.200
FORTALECIMIENTO DE LA INSTITUCIONALIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN	\$356.000
CULTURA DEL AGUA	\$50.000
FINANCIAMIENTO DE LA GESTIÓN DEL AGUA	\$75.000
TOTAL	\$717.800

Tabla nº14. Valoración total de las 5 líneas de acción consideradas

En el siguiente gráfico circular se muestra el porcentaje de costo anual por línea de acción. Destacar que la línea estratégica de fortalecimiento de la institucionalidad para la implementación del Plan es la partida más elevada, a la cual se destinarían el 50% del costo estimado.

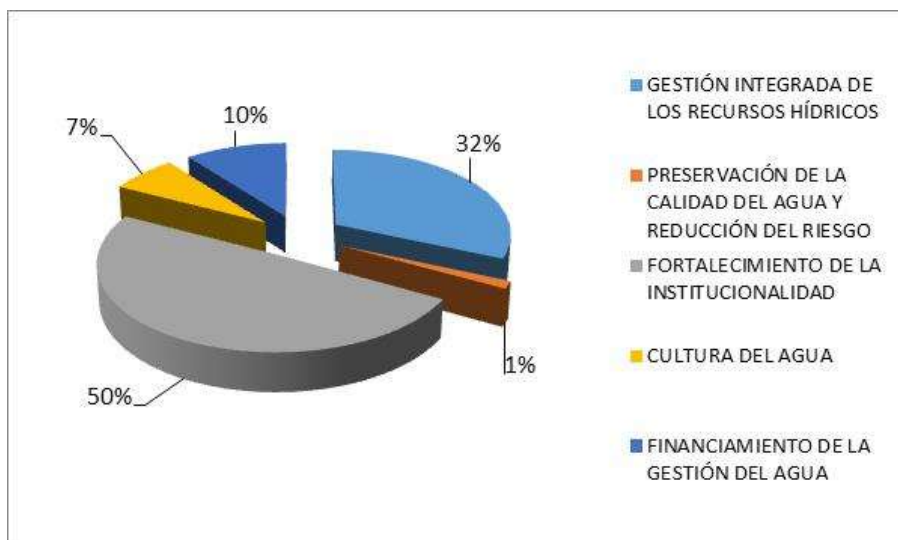


Figura nº43. Distribución del costo anual por línea de acción

9 SEGUIMIENTO DEL PLAN

El seguimiento del Plan es una herramienta fundamental para la evaluación del desarrollo del Plan de Acción Estratégica para la Gestión y la valoración de sus resultados. La principal fuente de información viene dada por una serie de indicadores previamente definidos y unas metas cuantificables a alcanzar por estos indicadores.

Por lo tanto, en este capítulo:

- Se incluye la recopilación de información para la cuantificación del grado de avance del Plan de Acción Estratégica para la Gestión del acuífero Patiño.
- Se define qué indicadores se deben considerar, la vinculación de los indicadores con los objetivos, cuándo se deben obtener estos indicadores, con qué frecuencia, quién debe medirlos y quién debe analizarlos.

9.1 Matriz de indicadores

Según la definición de la FAO, un indicador cuantifica y simplifica un fenómeno, ayudando a entender realidades complejas y reflejando los cambios que tengan lugar. Los indicadores son seleccionados con el objetivo de ayudar a la toma de decisiones.

En la siguiente tabla se muestra la matriz de indicadores donde se indica para cada programa el indicador, la fuente de la información, método de recolección, periodicidad y meta a alcanzar durante los próximos 5 años.

LÍNEA ESTRATÉGICA 1: GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Mejora y actualización del modelo de flujo desarrollado	Actualización anual del modelo de flujo	MADES	Modelo de gestión	Verificación	Actualización anual
Implementación del Plan de monitoreo de control y seguimiento de niveles piezométricos y control de calidad	Frecuencia de monitoreo de la red piezométrica	MADES	Revisión de registros	Verificación	Según lo indicado en el Plan de Monitoreo
Actualización periódica del Plan de monitoreo en función de la evaluación de los resultados obtenidos	Actualización del Plan de Monitoreo	MADES	Plan de Monitoreo	Verificación	Actualización anual
Definición de las acciones de contingencia que respondan a posibles problemas detectados en las tareas de seguimiento y control	Implementación Plan de contingencia	MADES	Plan de contingencia	Verificación	Elaboración de un plan de contingencia

LÍNEA ESTRATÉGICA 1: GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Plan de operación y mantenimiento de las estaciones automáticas, que permitan detectar y solucionar problemas que puedan surgir	Operación y mantenimiento de estaciones automáticas	MADES	Verificación	Verificación	Todas las estaciones en funcionamiento
Implementación de nuevas estaciones automáticas en ubicaciones estratégicas, recuperación de piezómetros no operativos	Nuevas estaciones implementadas y recuperación de piezómetros no operativos	MADES	Verificación	Verificación	Recuperación de los 15 piezómetros no operativos
Construcción de nuevos piezómetros exploratorios (profundidades de más de 300m) con las características adecuadas	Nuevos piezómetros exploratorios	MADES	Verificación	Verificación	2 piezómetros exploratorios de 300m
Implementación estaciones de aforo	Nuevas estaciones de aforo	MADES	Verificación	Verificación	7 nuevas estaciones de aforo
Coordinación para la mejora de la infraestructura de abastecimiento poblacional	Reuniones de coordinación	MADES	Actas de reunión	Verificación	Al menos 3 reuniones anuales
Coordinación para la mejora de la infraestructura de saneamiento urbano	Reuniones de coordinación	MADES	Actas de reunión	Verificación	Al menos 3 reuniones anuales

LÍNEA ESTRATÉGICA 2: PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Implementación de restricciones de uso en zonas de protección	Rescates de concesiones de agua, vigilancia y control	MADES	Verificación	Implementación	Implementación de restricciones de uso en base a rescates de concesiones, vigilancia y control
Elaboración de buenas prácticas agrarias	Buenas prácticas agrarias	MADES	Verificación	Elaboración	Difusión buenas prácticas agrarias y realización de talleres asociados

LÍNEA ESTRATÉGICA 2: PRESERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Establecimiento de perímetros de protección	Perímetros de protección establecidos	MADES	Protocolos	Elaboración	Normativa de perímetros de protección aplicada
Actualización delimitación de las áreas de protección especial definidas en el Plan	Actualización perímetros de protección	MADES	Estudio	Verificación	Actualización anual
Sellado de pozos abandonados	Número de pozos sellados	MADES	Revisión de registros	Verificación	50 pozos abandonados sellados al año

LÍNEA ESTRATÉGICA 3: FORTALECIMIENTO DE LA INSTITUCIONALIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Formalización de usuarios de agua subterránea	Nº de usuarios formalizados	MADES	Revisión de registros	Verificación	80% usuarios formalizados
Instalación de elementos de medición de volúmenes extraídos	Nº de elementos instalados	MADES	Revisión de registros	Verificación	80% pozos en uso con medidor instalado
Fortalecimiento de la institución responsable de la gestión de los recursos hídricos	Estructura de la institución	MADES	Verificación	Verificación	Implementación de la estructura de la institución
Mapeo de los diferentes actores implicados en la distribución de agua subterránea	Reuniones con los actores mapeados	MADES	Documento	Verificación	Al menos 3 reuniones anuales con actores implicados

LÍNEA ESTRATÉGICA 4: CULTURA DEL AGUA					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Programas de capacitación a técnicos y responsables de la gestión del recurso	Número de capacitaciones	MADES	Revisión de registros	Verificación	Realización de al menos 2 capacitaciones anuales a técnicos responsables

LÍNEA ESTRATÉGICA 4: CULTURA DEL AGUA					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Promoción y divulgación del conocimiento del acuífero	Promoción y divulgación	MADES	Revisión de registros	Verificación	Promoción y divulgación
Promoción del conocimiento del acuífero en el ámbito académico	Creación de diplomados relacionados con los recursos hídricos subterráneos	MADES	Revisión de registros	Verificación	Creación de 1 diplomado relacionados con los recursos hídricos subterráneos

LÍNEA ESTRATÉGICA 5: FINANCIAMIENTO					
Objetivos	Indicador	Proveedor de información	Método de recolección	Método de análisis	Meta
Implementar el cobro del agua por canon establecido en la ley 3239/2007	Implementación oficina de recaudación	MADES	Revisión de registros	Verificación	Implementación de una oficina de recaudación

10 CONCLUSIONES GENERALES

El plan de acción estratégico elaborado es la culminación del primer ciclo de planificación que se ha iniciado con la elaboración del conjunto de este trabajo.

El ciclo de planificación consta de 5 fases bien diferenciadas y descritas, las cuales se basan en la aplicación del plan de monitoreo, un diagnóstico de estado, cuantitativo y cualitativo, evaluación prospectivos gracias a la utilización de modelos de simulación, determinación del riesgo asociado a las presiones que impactan sobre el estado del acuífero y por último la definición del plan estratégico que considera las líneas estratégicas de acción.

Gracias al estudio realizado y a la coordinación con los técnicos del MADES se ha podido abordar un diagnóstico estratégico del estado del acuífero siguiendo la metodología de árbol de problemas. Se han identificado tres grandes problemas, el primero de ellos se refiere al estado cuantitativo, identificando una depresión apreciable en la zona occidental del acuífero en los municipios de Lambaré, Fernando de la Mora o Ñemby, entre otros.

En segundo lugar se ha identificado un problema relacionado con la contaminación de nitratos distribuida por buena parte del acuífero, se aprecia una tendencia hacia el aumento de nitratos y una degradación progresiva del acuífero, relacionada además con la presencia de contaminación microbiológica (coliformes y *Escherichia Coli*) que pone de manifiesto un problema de calidad ya que son elementos que no suelen estar presentes en las aguas subterráneas naturales y cuya procedencia es exclusiva de las aguas residuales de origen humano o animal que no han sido debidamente tratadas.

El tercer problema identificado está relacionado con la presencia de elevada salinidad en la zona norte del acuífero, este es un problema identificado de forma histórica, donde la contaminación producida tiene un origen natural, posiblemente agravada por la intensa explotación que ha sufrido el acuífero en esta zona.

En base a estos problemas o impactos sobre el acuífero se ha realizado el análisis de riesgo correspondiente en este primer ciclo de planificación que ha servido para realizar una primera propuesta de zonificación del territorio que debe servir a su vez para establecer limitaciones en el uso del agua y restricciones en la ocupación del territorio, que tienen como objetivo revertir las tendencias observadas y preservar la sostenibilidad del acuífero de cara al futuro. Se han definido zonas de protección en relación a las extracciones de agua, a la calidad general del acuífero y a la calidad relacionada con la contaminación por nitratos. Estas acciones están sujetas a lo establecido en la Ley N° 3239/2007, en relación a los artículos 24 y 25 que hacen referencia a las zonas de protección y al artículo 33 en relación a la limitación de las extracciones en base a la disponibilidad de agua.

La aplicación de las acciones necesarias para poder revertir o paliar los problemas detectados se materializa en el Plan de Acción estratégica, este plan considera cinco líneas estratégicas de acción, las cuales se pueden consultar en la Tabla n°4, sobre estas líneas estratégicas se desarrollan los programas de acción y los proyectos concretos. Para poder evaluar el grado de cumplimiento del plan se han establecido un conjunto de indicadores de seguimiento, indicando las metas a alcanzar para cada uno de los programas establecidos, en base a estos indicadores se realizarán las revisiones y actualizaciones del Plan de Acción.

Se ha plantado la revisión y actualización del conjunto del ciclo de planificación, considerando adecuado realizar una revisión del plan cada cinco años y una actualización completa cada diez años. Todas estas fechas son revisables en base al grado de avance y cumplimiento del plan.

El presupuesto estimado del plan estratégico de acción es de 717.800 dólares, de los cuales el 50% se destinaria a la línea de acción de fortalecimiento de la institucionalidad, 32% al agestión de recursos hídricos, 10% al financiamiento de la gestión del agua, 7% a la cultura del agua y el 1% restante a la preservación de la calidad y reducción del riesgo.

11 RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

Los problemas detectados en el acuífero son complejos y su resolución implica la acción conjunta de los actores que inciden en el acuífero, desde las instituciones gubernamentales, explotadores y usuarios. Por tanto es completamente necesario establecer mesas de dialogo entre todos ellos para poder realizar una acción conjunta y coordinada.

Como se ha comentado anteriormente uno de los principales problemas que en estos momentos más preocupa es el relacionado con la calidad del agua en el acuífero, por una parte, el problema de la salinidad, presente en la zona norte y que debería controlarse mediante el Plan de monitoreo para detectar posibles agravamientos de la situación, ante los cuales se deberán plantear medidas de contingencia adecuadas. Por otra parte, el problema relacionado con la creciente concentración de nitratos, ocasionado por la deficiente gestión de las aguas residuales urbanas e industriales. Es necesario por tanto abordar una solución a este problema construyendo los sistemas de saneamiento adecuados, que vayan desde la recogida de las aguas residuales hasta su tratamiento. La dimensión de este problema supera el ámbito de acción del plan de acción del acuífero y por tanto se deberá generar el marco adecuado de acción, el fomento de este marco sí que está contemplado en el plan.

De forma análoga al problema anterior sucede con la explotación del acuífero, la multitud de explotadores, la falta de control del volumen explotado exige una coordinación en la explotación del acuífero aumentando la eficiencia en la explotación, mejorando el rendimiento de las redes de suministro, evitando la pérdida de agua. Para una mejor gestión, distribución y tratamiento de las aguas referente al uso industrial, se recomienda que las autoridades competentes tengan un control de los usuarios en activo del agua subterránea, adoptar medidas como la formalización de estos y la instalación de medidores de volúmenes de extracción. La homologación de los explotadores en base a la eficiencia y la calidad es una necesidad urgente, ya que se debe garantizar que el agua de consumo cumple con los requerimientos de calidad sanitarios adecuados, evitando posibles efectos adversos contra la salud de las personas.

.

12 BIBLIOGRAFÍA

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., & Petty, R. J. (1985). Drastic A Standardized System For The Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Settings. *USEPA*, 163. <https://doi.org/EPA/600/2-85/0108>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega SA.
- Foster, S. (2002). Groundwater Management : Gestión Sustentable del Agua and Tools de la Práctica Paraguay : El Uso de Agua Subterránea en Gran Asunción – Problemas Actuales y Regulación Propuesta, 1–6.
- Georg Houben et al. (2012). Investigación de la calidad del agua, Cuenca hídrica del arroyo San Lorenzo, Departamento Central.
- IADB. (2014). Plan de Acción Asunción, Paraguay.
- INCLAM-HQA. (2017). Estudio de recursos hídricos y vulnerabilidad climática del acuífero Patiño (Diagnóstico) PR-T1207.
- Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas TNO. (2001). Desarrollo del Banco Nacional de Datos Desarrollo del banco de datos hidrogeológicos del SENASA.
- Jiménez-Madrid, A., Martínez, C., Luque, J. A., Rubio-Campos, J. C., & Carrasco, F. (2013). Estrategias de protección del agua subterránea destinada al consumo humano en la cuenca del Guadalquivir. *Boletín Geológico Y Minero*, 124(1), 3–19.
- MOPC. (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de Asunción. Retrieved from http://www.geam.org.py/v3/uploads/2015/10/Informe_Final_PEMA_Socio_Demografico-parte-1.pdf
- MOPC, geAM - GESTIÓN AMBIENTAL, & MOPC. (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de Asunción, 110. Retrieved from http://www.geam.org.py/v3/uploads/2015/10/Informe_Final_PEMA_Socio_Demografico-parte-1.pdf
- Naciones Unidas. (1986). Mapa hidrogeológico.
- Strandberg, G., Barring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., ... Wang, A. U. and S. (2014). CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. *Report Meteorology and Climatology*, 116(116), 84. <https://doi.org/ISSN: 0347-2116>