



Recarga Gestionada de Acuíferos: Sur de África

Eberhard Braune y Sumaya Israel
Traductor: J. Alberto Casillas-Trasviña et. al.

Recarga Gestionada de Acuíferos: Sur de África

The Groundwater Project

The Groundwater Project depende de financiamiento privado para la producción de libros y la gestión de the Project.

Por favor considera hacer una donación al the Groundwater Project para que los libros sigan estando disponibles de manera gratuita.

<https://gw-project.org/donate/>

Gracias.

Eberhard Braune

*Profesor Asociado
Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad del Cabo Occidental
División de Agua Subterránea de la Sociedad Geológica
Ciudad del Cabo, Sudáfrica*

Sumaya Israel

*Profesor Titular
Ciencias Ambientales y del Agua, Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad del Cabo Occidental
División de Agua Subterránea de la Sociedad Geológica
Ciudad del Cabo, Sudáfrica*

*Líder de traducción: J. Alberto Casillas-Trasviña
Hidrogeólogo, University of California, Davis*

*Equipo de traducción:
Maria Loreto Encalada, Pamela Garay, Pablo Guerrero, Alfredo Huamani, Juan
Bautista Reyna Martínez, Joaquin Riquelme, Susana Torres & Lei Zhong*

Recarga Gestionada de Acuíferos: Sur de África

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Todos los derechos reservados. Esta publicación está protegida por derechos de autor. Ninguna parte de este libro puede reproducirse de ninguna forma ni por ningún medio sin el permiso por escrito de los autores (para solicitar permiso, póngase en contacto con: permissions@gw-project.org). La distribución comercial y la reproducción están estrictamente prohibidas.

Los trabajos de GW-Project se pueden descargar de forma gratuita desde gw-project.org. Cualquiera puede usar y compartir enlaces de gw-project.org para descargar el trabajo de GW-Project. No está permitido que los documentos de GW-Project estén disponibles en otros sitios web ni enviar copias de los documentos directamente a otros. Tenga la amabilidad de honrar esta fuente de conocimiento gratuito que lo beneficia a usted y a todos aquellos que quieran aprender sobre las aguas subterráneas.

Derechos de Autor © 2021 Eberhard Braune y Sumaya Israel.

Publicado por the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2021.

Braune, Eberhard.

Managed Aquifer Recharge: Southern Africa / Eberhard Braune y Sumaya Israel. - Guelph, Ontario, Canada, 2021.

96 páginas.

Traducción por J. Alberto Casillas-Trasviña, Maria Loreto Encalada, Pamela Garay, Pablo Guerrero, Alfredo Huamani, Juan Bautista Reyna Martínez, Joaquin Riquelme, Susana Torres & Lei Zhong, 2024.

118 páginas. ISBN: 978-1-77470-123-2

Cita: Braune, E. e Israel, S., 2022, [Recarga Gestionada de Acuíferos: Sur de África](#) The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.

Considere suscribirse a la lista de correo del Groundwater Project y manténgase informado sobre los lanzamientos de libros nuevos, eventos y formas de participar en the Groundwater Project. Cuando se registra en nuestra lista de correo electrónico, nos ayuda a construir una comunidad mundial de aguas subterráneas. [Inscribirse](#).



Editores: John Cherry and Eileen Poeter

Consejo: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira y Eileen Poeter

Comité Directivo: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, y Yan Zheng.

Imagen de Portada: Depósitos de infiltración que pueden formar parte integrante de los sistemas de recarga y reciclaje artificiales. La montaña de la Mesa de Ciudad del Cabo está al fondo (de Tredoux y Cain, 2010). Foto tomada por Ricky Murray.

Traducción: J. Alberto Casillas-Trasviña, Maria Loreto Encalada, Pamela Garay, Pablo Guerrero, Alfredo Huamani, Juan Bautista Reyna Martínez, Joaquin Riquelme, Susana Torres & Lei Zhong

Tabla de Contenidos

RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS: SUR DE ÁFRICA	I
POR FAVOR CONSIDERE HACER UNA DONACIÓN.....	II
AUTORES.....	III
COPYRIGHT.....	IV
TABLA DE CONTENIDOS.....	V
1 INTRODUCCIÓN	1
2 LA HISTORIA DE LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS EN EL SUR DE ÁFRICA.....	4
2.1 PRINCIPALES RESULTADOS DE APRENDIZAJE.....	4
2.2 LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN EL SUR DE ÁFRICA	4
2.3 LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL SUR DE ÁFRICA	5
2.4 EL INCREMENTO DE LA DEMANDA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS.....	8
2.5 TÉCNICAS TRADICIONALES DE CONSERVACIÓN DEL AGUA	9
2.6 LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS MODERNA EN EL SUR DE ÁFRICA.....	13
2.7 SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO.....	14
3 CASO DE ESTUDIO: ATLANTIS, CIUDAD DEL CABO, SUDÁFRICA.....	21
3.1 LA NECESIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL – ESTABLECIENDO LAS CONDICIONES	21
3.2 LA FUENTE DEL AGUA.....	23
3.3 HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO	24
3.4 CALIDAD DEL AGUA.....	24
3.4.1 Contaminación.....	24
3.4.2 Monitoreo y Mejora de la Calidad del Agua	25
3.5 ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	28
3.6 ENTORNO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	30
3.7 EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR.....	31
4 CASO DE ESTUDIO: DELTA DE OMARURU, COSTA OESTE, NAMIBIA	33
4.1 LA NECESIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL – PREPARANDO EL ESCENARIO	33
4.2 LA FUENTE DEL AGUA.....	34
4.2.1 Ríos de Arena	34
4.3 HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO	35
4.4 CALIDAD DEL AGUA.....	35
4.5 ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	36
4.6 ENTORNO DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	37
4.6.1 Abastecimiento de Agua Enfoque Institucional.....	37
4.7 EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR.....	38
5 CASO DE ESTUDIO: LANGEBAAN, COSTA OESTE, SUDÁFRICA.....	39
5.1 LA NECESIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL – PREPARANDO EL ESCENARIO	39
5.1.1 La Planificación de los Recursos del Agua lleva a la RGA	39
5.2 LA FUENTE DEL AGUA.....	41
5.3 HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO	42
5.4 CALIDAD DEL AGUA.....	42
5.5 ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	43
5.5.1 Selección de los Sitios de Recarga.....	45
5.6 ENTORNO DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	45
5.6.1 Logrando la Participación de las Partes Interesadas.....	45

5.7	EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR.....	46
5.7.1	<i>Un Enfoque de Implementación por Etapas</i>	47
6	CASO DE ESTUDIO: WINDHOEK, NAMIBIA	48
6.1	LA NECESIDAD DE UNA RECARGA ARTIFICIAL – PREPARADO EL ESCENARIO	48
6.1.1	<i>Opciones de Aumento en un País con Escasez de Agua</i>	49
6.1.2	<i>La Oportunidad de RGA</i>	50
6.2	HIDRÁULICA DEL ACUIFERO	51
6.2.1	<i>Condiciones Favorables en Acuíferos de Roca Dura</i>	51
6.2.2	<i>Sobreexplotación del Almacenamiento del Acuífero</i>	53
6.3	LA FUENTE DEL AGUA.....	53
6.4	CALIDAD DEL AGUA.....	55
6.4.1	<i>Principios Guía para la Calidad del Agua Inyectada Directamente en el Acuífero</i>	56
6.4.2	<i>Preocupaciones Especiales sobre la Calidad del Agua Asociadas con la Inyección de Pozos</i>	57
6.5	ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	58
6.5.1	<i>Beneficios del Sistema RGA de Windhoek</i>	59
6.6	ENTORNO DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	60
6.6.1	<i>Modelo de Financiamiento para el sistema RGA</i>	60
6.7	EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR.....	61
7	CASO DE ESTUDIO: KHARKAMS, INTERIOR SEMIÁRIDO, SUDÁFRICA.....	63
7.1	LA NECESIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL – PREPARANDO EL ESCENARIO.....	63
7.2	LA FUENTE DE AGUA	64
7.2.1	<i>Suministro de Agua a Pequeña Escala en una Zona Semiárida</i>	64
7.3	HIDRÁULICA DE LOS ACUIFEROS.....	65
7.4	CALIDAD DEL AGUA.....	65
7.5	ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	65
7.6	ENTORNO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	67
7.7	EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR	67
8	CASO DE ESTUDIO: PLETTENBERG BAY, CABO DEL SUR, SUDÁFRICA	69
8.1	LA NECESIDAD DE LA RECARGA ARTIFICIAL - PREPARANDO EL ESCENARIO	69
8.2	LA FUENTE DEL AGUA.....	71
8.3	HIDRAULICA DE ACUIFEROS	71
8.3.1	<i>Consideraciones de RGA en un acuífero fracturado</i>	72
8.4	CALIDAD DEL AGUA.....	74
8.4.1	<i>Hierro Disuelto y Obstrucción de Pozos</i>	74
8.5	ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	74
8.5.1	<i>Costo de la RGA en Comparación con Desalinización</i>	76
8.6	ENTORNO DE LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	77
8.7	EVALUACIÓN Y CAMINO A SEGUIR.....	77
9	RGA COMO PARTE DEL DESARROLLO SUSTENTABLE DEL RECURSO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	82
9.1	ALGUNAS EXPERIENCIAS CON FACTORES DE ÉXITO DE RGA	82
9.1.1	<i>Asuntos Técnicos Necesarios para una Implementación Exitosa de RGA</i>	82
9.2	DESPLIEGUE DE LA ESTRATEGIA DE RECARGA ARTIFICIAL.....	83
9.3	DEFICIENCIAS INSTITUCIONALES: EL CASO DEL ACUIFERO DE CAPE FLATS	87
9.3.1	<i>RGA y la creciente urbanización</i>	90
10	CONCLUSIÓN	92
10.1	EL CAMINO A SEGUIR HACIA UNA BUENA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	92
11	EJERCICIOS.....	95

12	REFERENCIAS	96
13	SOLUCIONES A LOS EJERCICIOS	107
14	ACERCA DE LOS AUTORES.....	111
15	ACERCA DEL EQUIPO DE TRADUCCIÓN	113
	MODIFICACIONES A LA PUBLICACIÓN ORIGINAL.....	A

Dedicatoria

"Agua subterránea para África": dedicamos este libro a las mujeres de África en su continuo esfuerzo por un suministro de agua seguro para sus familias y comunidades.

The Groundwater Project: Prólogo

Los Miembros y Socios del Agua de las Naciones Unidas establecen su tema anual con algunos años de anticipación. El tema del Día Mundial del Agua del 22 de marzo de 2022 es “Aguas subterráneas: haciendo visible lo invisible”. Esto es más apropiado para el debut de los primeros libros de The Groundwater Project (Proyecto GW) en 2020, que tienen el objetivo de hacer visibles las aguas subterráneas.

El Proyecto GW, una organización sin fines de lucro registrada en Canadá en 2019, se compromete a contribuir al avance de la educación y aporta un nuevo enfoque a la creación y difusión de conocimientos para la comprensión y la resolución de problemas. El Proyecto GW opera el sitio web <https://gw-project.org/> como una plataforma global para la democratización del conocimiento del agua subterránea y se basa en el principio de que:

“El conocimiento debe ser libre y el mejor conocimiento debe ser conocimiento libre.” Anónimo

La misión del Proyecto GW es proporcionar materiales educativos accesibles, atractivos y de alta calidad, gratuitos en línea en muchos idiomas, a todos los que quieran aprender sobre las aguas subterráneas y comprender cómo las aguas subterráneas se relacionan y sustentan los sistemas ecológicos y a la humanidad. Este es un nuevo tipo de esfuerzo educativo global que se basa en el voluntariado de profesionales de diferentes disciplinas e incluye académicos, consultores y jubilados. El Proyecto GW involucra a muchos cientos de voluntarios asociados con más de 200 organizaciones de más de 14 países y seis continentes, con una participación creciente.

El Proyecto GW es un esfuerzo continuo y continuará con cientos de libros que se publicarán en línea en los próximos años, primero en inglés y luego en otros idiomas, para descargar donde esté disponible el acceso a Internet. Las publicaciones del Proyecto GW también incluyen materiales de apoyo como videos, conferencias, demostraciones de laboratorio y herramientas de aprendizaje, además de proporcionar, o enlazar, software de dominio público para varias aplicaciones de aguas subterráneas que respaldan el proceso educativo.

El Proyecto GW es una entidad viva, por lo que las ediciones posteriores de los libros se publicarán de vez en cuando. Se invita a los usuarios a proponer revisiones.

Te agradecemos por ser parte de la Comunidad del Proyecto GW. Esperamos saber de usted acerca de su experiencia con el uso de los libros y el material relacionado. ¡Agradecemos ideas y voluntarios!

El Comité Directivo del GW-Project

Julio 2021

Prólogo

Hay crisis de agua en muchas partes del mundo debido a los efectos combinados del agotamiento de las aguas subterráneas y el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. Un tercio de los grandes acuíferos del mundo están severamente sobreexplotados sin perspectivas de recuperación durante décadas o incluso siglos si todo el bombeo se detuviera ahora. El bombeo de agua subterránea fósil sustenta grandes poblaciones en climas secos. Se avecinan sequías más severas que las de las últimas décadas, exacerbadas por el cambio climático. La mayor parte del agotamiento de los acuíferos se realiza en apoyo de la agricultura de regadío a escala industrial, con agua subterránea que se bombea desde pozos o se desvía del flujo base de los ríos para sustentar el 70 por ciento de la agricultura mundial.

El agotamiento de los acuíferos se ha vuelto tan excesivo que el agua de su agotamiento se escurre hacia los océanos y contribuye con el 25 por ciento del reciente aumento del nivel del mar. La escorrentía excesiva se ve potenciada por la tala de bosques y el deterioro de la "salud" del suelo. La única opción para revertir esta trayectoria hacia el desastre es reducir la cantidad de agua dulce que se escapa a los océanos. Para esto, el enfoque más fácilmente implementable es utilizar la ingeniería para aumentar la cantidad de lluvia que recarga los depósitos de agua subterránea para que se escape menos a los océanos. Esto ahora se conoce ampliamente como "recarga gestionada de acuíferos" (RGA) o "recarga artificial" (AR). La RGA no es nuevo, se ha practicado en algunos países durante más de 70 años, pero ha tenido un fuerte aumento en la diversidad y sofisticación de las técnicas en las últimas dos décadas. Sin embargo, en relación con los beneficios que pueden derivarse de la RGA y la magnitud del agotamiento de las aguas subterráneas, la RGA está lamentablemente subutilizada a escala mundial. La recarga se puede aumentar cambiando la vegetación y rejuveneciendo el suelo, pero esto generalmente requiere un largo período de tiempo. Ahora, hay suficiente conocimiento técnico de RGA para implementarlo rápidamente en áreas con voluntad política.

Este libro es escrito por dos científicos sudafricanos de aguas subterráneas. Sudáfrica tiene la mayor experiencia con RGA porque hay docenas de aplicaciones de RGA sustanciales en diversas condiciones hidrológicas y geológicas que van desde acuíferos no consolidados en climas semiáridos hasta rocas fracturadas en climas desérticos. Sudáfrica es líder en RGA como resultado de más de 50 años de investigación y práctica apoyada por financiamiento gubernamental con visión de futuro. Este libro es uno de los muchos libros de Groundwater Project en una serie planificada de libros sobre RGA en países o regiones específicos.

Los dos autores de este libro, los Dres. Eberhard Braune y Sumaya Israel, actualmente son miembros de la Universidad de Western Cape, Sudáfrica, y han sido participantes de larga data en investigaciones sobre RGA y temas relacionados que

incluyen recarga natural, gestión de recursos hídricos y geoquímica de aguas subterráneas. Aportan una perspectiva holística a la RGA como se ilustra en el contenido de este libro.

John Cherry, Líder del Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada, Julio 2021

Prefacio

La clave de la crisis del agua africana, a la que a menudo se hace referencia en los foros internacionales, es la gran variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de recursos, junto con el clima más árido que prevalece en aproximadamente el 60 por ciento del continente africano y la falta generalizada de recursos humanos calificados y experimentados. para gestionar la disponibilidad irregular de agua. La provisión de suficiente capacidad de almacenamiento bajo la creciente demanda de agua y la creciente variabilidad climática es una de las principales preocupaciones de los administradores del agua en la región en las próximas décadas. El almacenamiento natural en los acuíferos hace que el uso conjunto de los recursos hídricos y la recarga artificial de los acuíferos sea particularmente atractivo en la región.

Se han logrado excelentes avances en todos los aspectos relacionados con el conocimiento y la promoción de la recarga artificial en Sudáfrica. Esto ha sido impulsado por la Comisión de Investigación del Agua con sus programas de investigación y desarrollo durante casi cincuenta años. Entre otros, condujo a la construcción de un importante sistema de inyección de pozos para la ciudad de Windhoek, el sistema RGA de Namibia Windhoek, de particular interés porque involucra la inyección y recuperación de pozos a gran escala en un acuífero de cuarcita fracturado altamente complejo. La implementación en Sudáfrica contó con la ayuda de la detallada Estrategia de Recarga Artificial desarrollada por el Departamento Nacional de Asuntos Hídricos y Silvicultura. Con 17 casos informados, Sudáfrica tiene, con mucho, la implementación de RGA más alta en África.

Con esto como antecedente, se analizan seis casos que abarcan diferentes entornos físicos y de gestión y métodos de recarga en el sur de África. Están estructurados para brindar una comprensión de las diferentes fuerzas impulsoras hacia el uso de las técnicas RGA, los factores que afectan la selección de una técnica RGA en particular y cuán eficientes y efectivas han demostrado ser varias técnicas RGA.

El principal obstáculo para un despliegue mucho mayor y sistemático de esta tecnología ha sido la falta de una gobernanza adecuada y un desarrollo institucional para la utilización y gestión sostenibles de los recursos de agua subterránea en Sudáfrica. Esto ha estado fallando en África en general, a pesar del papel estratégico del agua subterránea como un recurso esencial para ayudar a lograr el desarrollo comunitario y el alivio de la pobreza.

Prefacio de la versión en español

La clave de la crisis del agua africana, a la que a menudo se hace referencia en los foros internacionales, es la gran variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de recursos, junto con el clima más árido que prevalece en aproximadamente el 60 por ciento del continente africano. Además de la falta generalizada de recursos humanos calificados y experimentados, para gestionar la disponibilidad irregular de agua. La provisión de suficiente capacidad de almacenamiento bajo la creciente demanda de agua y la creciente variabilidad climática es una de las principales preocupaciones de los administradores del agua en la región en las próximas décadas. El almacenamiento natural en los acuíferos hace que el uso conjunto de los recursos hídricos y la recarga artificial de los acuíferos sea particularmente atractivo en la región.

J. Alberto Casillas-Trasviña, Maria Loreto Encalada, Pamela Garay, Pablo Guerrero, Alfredo Huamani, Juan Bautista Reyna Martínez, Joaquin Riquelme, Susana Torres & Lei Zhong.
Equipo de Traducción.

Agradecimientos

Por la presente se reconoce la dedicación y el excelente trabajo científico / técnico de muchas personas e instituciones, durante muchas décadas. Cabe mencionar especialmente el papel pionero en toda la región del Dr. Gideon Tredoux del Consejo de Investigación Científica e Industrial, y del Dr. Ricky Murray de Groundwater Africa. El papel continuo de iniciación y financiación de la Comisión de Investigación del Agua (*Water Research Commission, WRC*) ha sido un factor crítico de éxito. El ahora Departamento de Asuntos del Agua y Saneamiento (*Department of Water Affairs and Sanitation, DWS*) ha actuado como custodio de todo el trabajo de recarga artificial durante muchos años y, lo que es más importante, ha contribuido con una estrategia y un sitio web a este respecto. La financiación de la División de Aguas Subterráneas de la Sociedad Geológica del Sur de África ha permitido la tarea resumida y se agradece por la presente. Gracias a los revisores, el texto recibió una nueva estructura para resaltar el propósito educativo con este resumen.

Agradecemos profundamente las revisiones exhaustivas y útiles y las contribuciones a este libro de las siguientes personas:

- ❖ Yan Zheng, Universidad de Ciencia y Tecnología del Sur, Shenzhen, China, Shenzhen, China
- ❖ Bill Alley, Asociación Nacional de Aguas Subterráneas, San Diego, California, EE. UU.
- ❖ Dr. Ricky Murray, Groundwater Africa, Somerset West, Cabo Occidental, Sudáfrica

Estamos agradecidos por la supervisión de Amanda Sills (GW-P) de este libro y la corrección de estilo de Juliana Apolonio (GW P). Agradecemos a Eileen Poeter (Escuela de Minas de Colorado, Golden, Colorado, EE. UU.) Por la corrección de estilo, la edición de diseño y la producción de este libro.

Agradecimientos del Equipo de Traducción

Agradecemos la oportunidad de traducir este libro que forma parte de un esfuerzo colectivo impresionante. Reconocemos la dedicación y el excelente trabajo científico y técnico de todos los involucrados ya sean personas e instituciones. ¡Gracias por la confianza y enhorabuena por este y todos los demás libros del GW Project!

1 Introducción

Este libro describe el desarrollo de las prácticas de recarga gestionada de acuíferos (RGA) en Sudáfrica. Se incluyen ejemplos de Namibia porque el territorio (África Sud-Occidental) fue administrado por Sudáfrica hasta su independencia en 1990. Se utilizan varios estudios de casos para contrastar diferentes entornos, las tecnologías RGA elegidas y los resultados obtenidos. Una evaluación conclusiva es proporcionada con respecto a su adopción e integración a la fecha en políticas y prácticas más amplias de gestión de recursos hídricos del país.

La pobreza es el problema de desarrollo dominante en África subsahariana y la falta de acceso a agua potable es una de las causas clave de pobreza. Y, sin embargo, hasta la fecha, la región ha utilizado solo una pequeña parte (5 por ciento) de sus recursos hídricos disponibles. La crisis Africana del agua, como se la menciona a menudo en foros internacionales, es mucho más compleja que la disponibilidad de agua. Los factores de complicación incluyen: la gran variación espacial y temporal de la disponibilidad de recursos; el clima árido que prevalece en aproximadamente el 60 por ciento del continente Africano; y la falta generalizada de recursos humanos capacitados y experimentados para gestionar la disponibilidad irregular de agua. Dichas habilidades necesarias incluyen la construcción y el equilibrio del almacenamiento de agua, la transferencia de agua entre áreas ricas y pobres en agua, y la implementación de programas para gestionar la demanda y la conservación del agua (Braune y Xu, 2008).

El agua subterránea es el recurso fundamental para la supervivencia humana y el desarrollo económico en áreas extensas propensas a la sequía en África subsahariana. La accesibilidad de las aguas subterráneas en los pozos, manantiales y áreas de filtración tradicionales poco profundos excavados a mano siempre ha controlado la extensión de los asentamientos humanos más allá de las principales extensiones ribereñas. La introducción extensa de equipos de perforación y bombas para pozos de agua en la década de 1970 permitió una mayor extensión de la actividad humana. Hoy en día, la dependencia del suministro de agua rural del agua subterránea es indiscutible, con pozos de agua exitosos que permiten el funcionamiento de aldeas, clínicas, escuelas, mercados y establecimientos ganaderos en grandes áreas.

En los últimos años, la demanda de suministro de agua urbana ha aumentado en una variedad de escalas, desde la mejora de los servicios de agua en innumerables ciudades pequeñas (pero en rápida expansión) hasta fuentes de suministro de agua públicas y privadas complementarias en ciudades más grandes. Además, se pronostica que el uso de agua subterránea para el riego aumentará sustancialmente, tanto para la producción de cultivos de alto valor a escala comercial como para la horticultura de subsistencia y el cultivo de plantíos básicos a prueba de sequía (Foster et al., 2012).

En contraste con su papel estratégico como un recurso esencial para ayudar a lograr el desarrollo comunitario y el alivio de la pobreza en el sur de África y más ampliamente, el agua subterránea ha seguido siendo un recurso mal entendido y mal administrado (Braune et al., 2008). Los acuíferos que abastecen a muchas megaciudades Africanas suelen estar muy contaminados (por ejemplo, Dakar, Abidjan, Lagos, Accra, Lomé, Lusaka, Addis Abeba). El agua subterránea sometida a una extracción excesiva y no planificada (bombeo de agua del subsuelo) en las ciudades costeras está induciendo la intrusión de agua salada que da como resultado un daño permanente a los acuíferos costeros (Xu y Usher, 2006). Los datos sobre los sistemas de aguas subterráneas son escasos y el estado actual de los conocimientos es bajo. Durante la última década se han realizado esfuerzos para mejorar la situación mediante la publicación de síntesis y reseñas a nivel nacional, regional y continental. MacDonald y otros (2012) produjeron los primeros mapas cuantitativos de los recursos de agua subterránea para África en su conjunto. Estos mapas indican que el almacenamiento de agua subterránea es típicamente de una a dos magnitudes menos en el África subsahariana que en el norte de África.

La provisión de suficiente capacidad de almacenamiento ante la creciente demanda de agua y la creciente variabilidad climática es una de las principales preocupaciones de los administradores del agua en la región en las próximas décadas. Si bien no existen estimaciones precisas de la capacidad de almacenamiento requerida, se prevé que, en cinco a diez años, se necesitará un aumento de la capacidad de almacenamiento actual para proporcionar suficiente agua durante los períodos secos. Es importante destacar que, para las áreas áridas, el agua almacenada en un acuífero no está sujeta a las mismas pérdidas de agua por evaporación que el agua almacenada en los embalses superficiales detrás de las presas. Las pérdidas por evaporación pueden ser significativas según la ubicación de la presa y el área de la superficie del embalse. El almacenamiento natural (amortiguador de agua) disponible en los acuíferos hace que el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas sea particularmente atractivo y proporciona una necesidad urgente de inversión en preparación para sequías en una variedad de escalas. Se requieren inversiones para mejorar la gestión del almacenamiento de aguas subterráneas, incluida la recarga gestionada de acuíferos, para amortiguar los impactos de la sequía (Van Steenberg y Tuinhof, 2009; Tuinhof et al., 2011).

La recarga gestionada de acuíferos no es un concepto nuevo en el sur de África. Hace casi 40 años, la perspectiva de almacenar aguas residuales tratadas en los lechos de arena de Cape Flats en Sudáfrica llevó a la Comisión de Investigación del Agua a financiar investigaciones al respecto (DWAF, 2010). El sistema Atlantis cerca de Ciudad del Cabo ha estado operativo durante más de 40 años. Se ha demostrado que la RGA tiene una variedad de beneficios, especialmente si se practica como parte de un enfoque más amplio de la gestión de los recursos hídricos, y existe un creciente reconocimiento de que la RGA proporciona a menudo la forma más barata de suministro de agua potable para pueblos y comunidades pequeñas. No obstante, la adopción de la RGA en la práctica ha sido limitada

en África subsahariana. A nivel técnico, esto puede atribuirse a una falta de comprensión de la hidrogeología y/o al conocimiento de RGA, pero a un nivel amplio puede estar relacionado con la reforma lenta o ausente del marco institucional para la gobernanza de las aguas subterráneas (Gale, 2005; Foster et al., 2012). Esto se analiza con más detalle en la Sección 10, Conclusiones.

La recarga gestionada de acuíferos ha reemplazado gradualmente el término recarga artificial para enfatizar la recarga como un proceso gestionado. El término recarga artificial todavía se usa en regulaciones y pautas en el sur de África, y usamos los dos términos indistintamente en este libro.

2 La Historia de la Recarga Gestionada de Acuíferos en el Sur de África

2.1 Principales Resultados de Aprendizaje

Al finalizar este libro, se debería tener un mayor entendimiento sobre:

- Disponibilidad de agua en el sur de África basado en patrones de lluvia;
- Recursos de agua subterránea en el sur de África (su importancia, ocurrencia y relación con unidades geológicas);
- Factores que influyen en la recarga natural en el sur de África;
- Los principales impulsores de la exploración de agua subterránea y de la Recarga Gestionada de Acuíferos (RGA) en la región; y,
- Las distintas técnicas de RGA empleadas en el sur de África, cómo funcionan y su aplicabilidad.

2.2 La Disponibilidad del Agua en el Sur de África

La disponibilidad de agua en el sur de África puede ilustrarse mediante el régimen de precipitaciones, que generalmente es bajo y muy variable. La lluvia que cae en aguaceros intensos a menudo se escurre hacia los canales de los ríos, ya que cae más rápido de lo que puede ser absorbido por el suelo, donde puede recargar el agua subterránea. Muchas áreas, particularmente en el sur y el oeste, reciben muy poca lluvia (<250 mm / año) y están sujetas a altas temperaturas y altas tasas de evaporación. El mapa a continuación (**Figura 1**) muestra la distribución de la precipitación anual promedio en el sur de África.

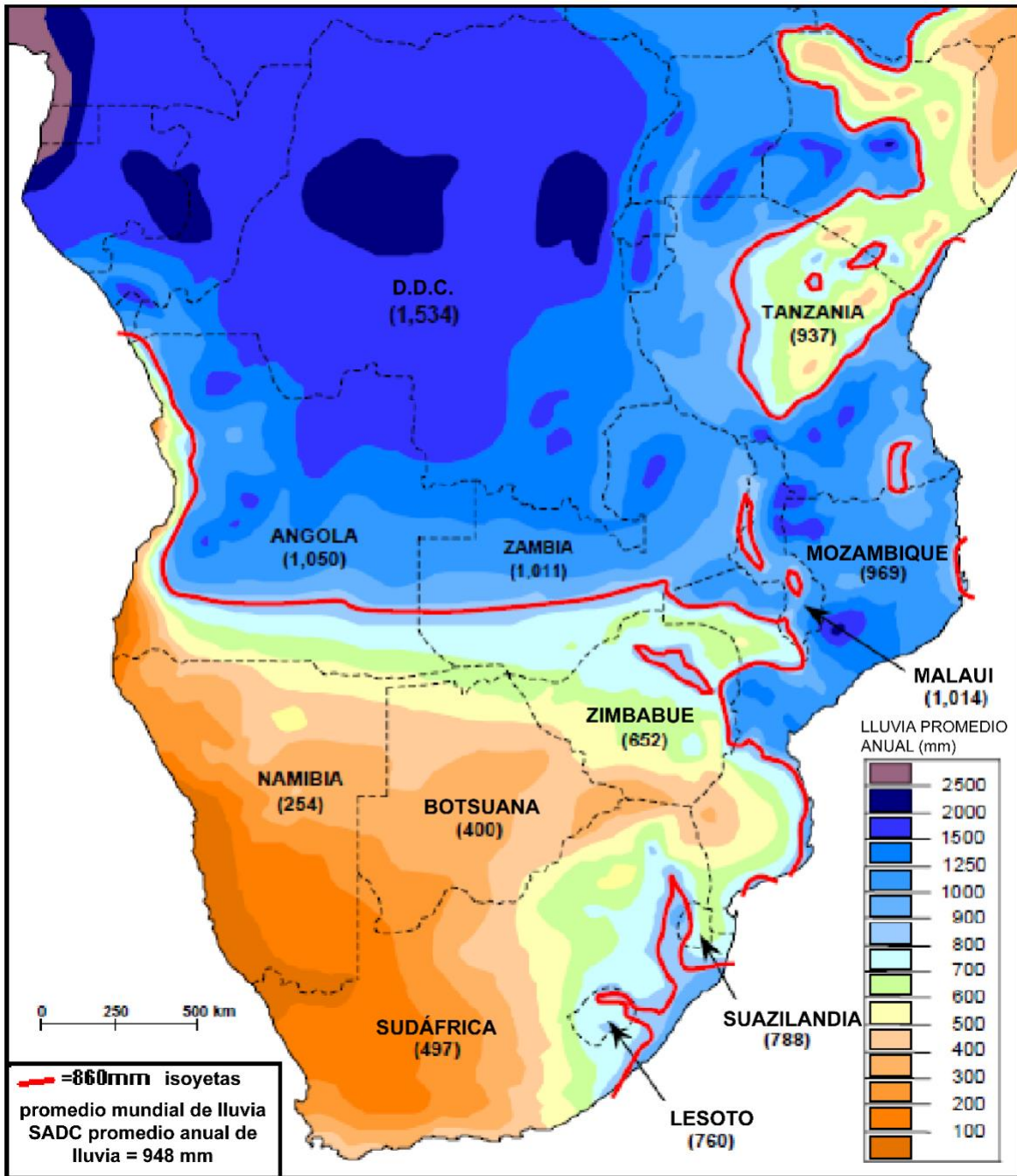


Figura 1 - Distribución media anual de las precipitaciones en la región del Comité de Desarrollo del Sur de (SADC) (SADC 2007).

2.3 Los Recursos de Agua Subterránea en el Sur de África

Debido a la disponibilidad limitada de recursos hídricos superficiales, el agua subterránea es fundamental para una gestión integral de los recursos hídricos, particularmente en áreas rurales no cercanas a grandes ríos o redes urbanas de suministro de agua. La presencia de agua subterránea en el sur de África se caracteriza por la gran variedad de estructuras geológicas. Esto se ilustra en la **Figura 2** del Mapa de hidrogeología del sur de África (SADC, 2009). La discusión de las principales características

hidrogeológicas está tomada en gran parte del Folleto Explicativo que acompaña a este mapa (SADC, 2009).

Aproximadamente el 55 por ciento de la región está cubierta por formaciones de baja permeabilidad (colores marrones, D1 y D2). Se trata en gran parte de rocas de basamento con sistemas de acuíferos desarrollados en la capa meteorizada y el lecho rocoso fracturado. Los acuíferos desarrollados en estas áreas no están confinados, están desarrollados localmente y no son espacialmente extensos. En general, solo se pueden extraer de estos acuíferos de forma sostenible suministros modestos de agua subterránea y no es factible el desarrollo de campos de pozos de agua subterránea a gran escala.

Los sistemas acuíferos fisurados (colores verdes, B1 y B2) están asociados particularmente con las formaciones de Karoo (esquisto/pizarra y areniscas intercaladas) que se encuentran ampliamente en todo el sur de África. Las formaciones son normalmente de bajo rendimiento, pero donde las rocas han sido sometidas a deformación e intrusión de doleritas, se puede encontrar una permeabilidad secundaria donde se podrían encontrar buenos acuíferos.

Los sistemas acuíferos intergranulares no consolidados (colores azules, A1 y A2) se presentan como grandes cuencas interiores, como las cuencas de Kalahari y Congo, en acuíferos costeros y en acuíferos aluviales en canales de ríos, riberas y llanuras aluviales. La cuenca del Kalahari consiste en depósitos complejos de sedimentos no consolidados a semi-consolidados, que incluyen arenas, calcreta, eolianita, grava, arcilla y silcreta. El agua subterránea salina tiende a ocurrir en estas cuencas en las áreas más áridas de Botswana y Namibia.

Los acuíferos kársticos (colores amarillos, C1 y C2) constituyen algunos de los acuíferos más productivos de Namibia, Botsuana, Zimbabue y Sudáfrica. Se encuentran en rocas altamente solubles, sobre todo en piedra caliza y dolomita. El flujo de agua subterránea se concentra a lo largo de fracturas y fisuras secundarias agrandadas y otras aberturas conectadas, donde el agua de la lluvia ligeramente ácida puede disolver los minerales.

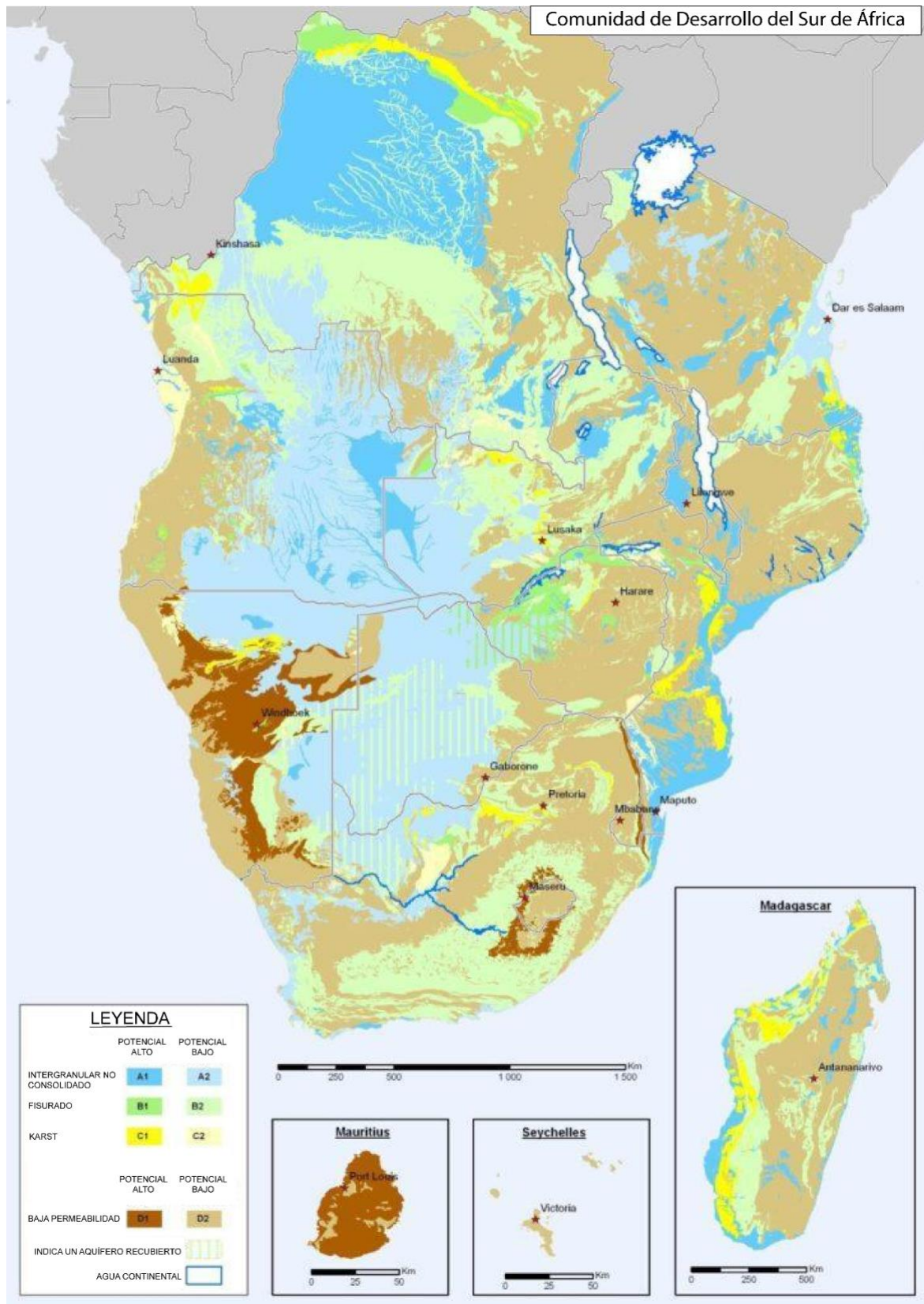


Figura 2 - Mapa de Hidrogeología del sur de África (SADC, 2009).

El potencial de recarga de las aguas subterráneas está relacionado con las condiciones climáticas como las temperaturas medias y la evapotranspiración, y factores

geológicos como la porosidad y las tasas de infiltración. El potencial de recarga es relativamente bajo en gran parte del sur de África, aunque mejora en el norte principalmente debido al aumento de las precipitaciones. La **Figura 3** muestra valores reportados de recarga, incluidos los de las regiones más húmedas del sur de África, en la revisión ampliamente citada de Beekman y Xu (2003). En regiones áridas, la recarga de agua subterránea puede ser del 3 por ciento o menos de la lluvia; en las regiones donde las precipitaciones superan los 600 mm / año, la recarga de las aguas subterráneas puede alcanzar el 20 por ciento. La determinación de la recarga de agua subterránea en áreas áridas y semiáridas no es sencilla ni fácil, (Xu y Beekman, 2019). Esto es consecuencia de la variabilidad temporal de la precipitación en climas áridos y semiáridos, y la variabilidad espacial en las características del suelo, la topografía, la vegetación y el uso del suelo.

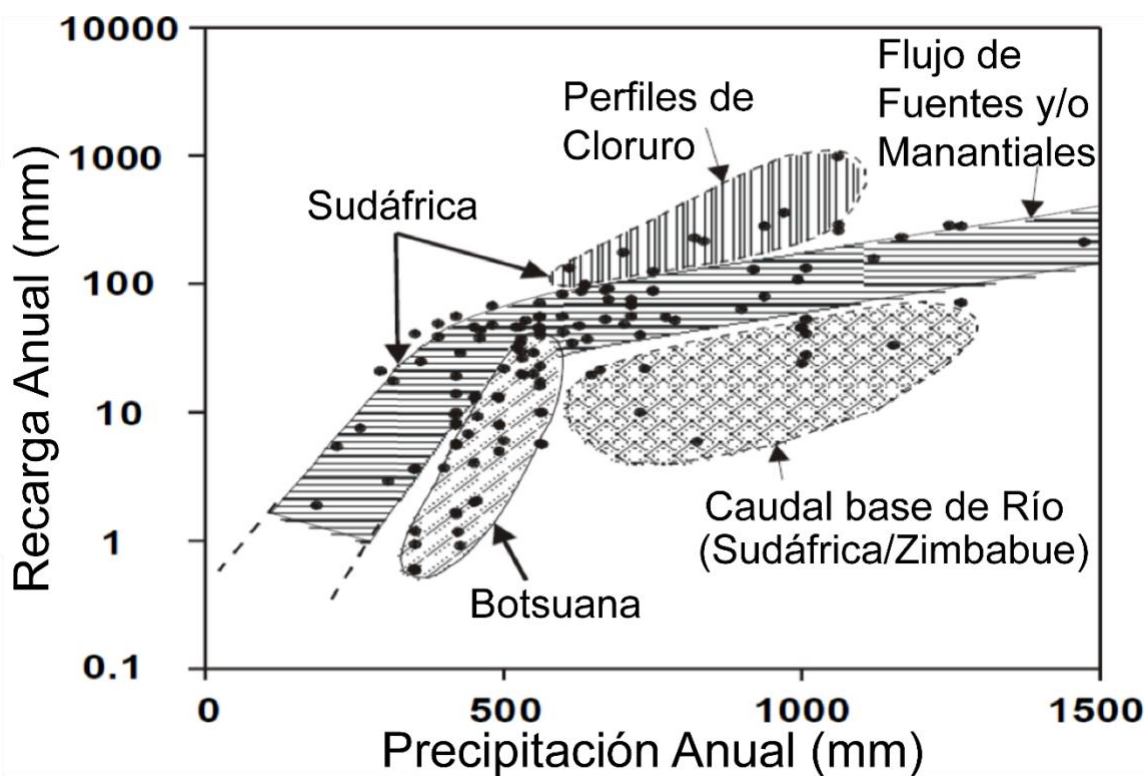


Figura 3 - Resultados de varios estudios de recarga de aguas subterráneas en el sur de África, indicando la región y el tipo de estudio (Beekman y Xu, 2003).

2.4 El Incremento de la Demanda de los Recursos Hídricos Subterráneos

El objetivo político de crecimiento económico y reducción de la pobreza en la región requiere que todos los recursos hídricos potenciales se protejan y utilicen adecuadamente. El agua subterránea es un recurso importante en la región, pero su gestión se ha descuidado. En países más secos con una fuerte dependencia de las aguas subterráneas, como Botsuana, Namibia y Mauricio, el nivel de desarrollo en el sector de las aguas subterráneas es bastante alto. Las sequías recurrentes en la región también han reforzado

el valor potencial de las aguas subterráneas. El papel del agua subterránea en la región incluye (SADC, 2009):

- satisfacer las necesidades de agua doméstica de un porcentaje significativo de la población;
- abastecimiento de ciudades y asentamientos más pequeños;
- desempeñar un papel de uso conjunto en asentamientos urbanos más grandes;
- contribuir a la seguridad hídrica durante condiciones de sequía;
- lograr la seguridad alimentaria en las comunidades rurales; y,
- mantener las funciones ambientales.

El papel cambiante de las aguas subterráneas se puede ilustrar mejor con Sudáfrica como ejemplo. Hasta la nueva Ley Nacional del Agua de 1998, las aguas subterráneas se definían en la ley como “agua privada” y se consideraba que solo tenían importancia local. Los sistemas predominantemente de roca dura, de los cuales los acuíferos de basamento constituyen la mayor parte, contribuyeron solo con alrededor del 12 por ciento al suministro de agua. Con la democratización del país en 1994, hubo un fuerte cambio de política hacia la provisión de servicios básicos, incluidos los de agua y saneamiento, a toda la población lo antes posible. En ese momento, aproximadamente 15 millones de personas, o alrededor del 40 por ciento de la población, no tenían el suministro de agua más básico. Las estrategias y los planes de acción enfocados redujeron esta acumulación de servicios a menos del 5 por ciento de la población en 2013. En general, el agua subterránea se había convertido en el suministro doméstico para el 60 por ciento de las comunidades y hasta el 90 por ciento en algunas provincias (Braune et al., 2014).

Una recientemente redactada Estrategia Nacional de Aguas Subterráneas (DWAf, 2017) prevé un camino institucional incremental que pasa de::

1. desarrollo técnico del recurso, a;
2. gestión de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta su valor real y sus características únicas; y finalmente a,
3. gobernanza de las aguas subterráneas como parte de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Todos los aspectos de la utilización sostenible de los recursos, incluido el uso conjunto de las aguas subterráneas y otras fuentes de agua, así como la recarga artificial de las fuentes de agua subterránea, deberán abordarse, junto con las reglamentaciones adecuadas, una clara orientación y la continua concienciación a través de iniciativas de educación y capacitación.

2.5 Técnicas Tradicionales de Conservación del Agua

Las técnicas tradicionales de conservación del agua se han practicado en áreas secas bajo una amplia gama de condiciones ecológicas durante milenios. Además del uso doméstico del agua, las primeras poblaciones usaban el agua principalmente para la

agricultura a pequeña escala que implicaba la cría de ganado, cultivos o una combinación de ambos. La minimización de las pérdidas por escorrentía (en combinación con una mayor infiltración) y la recolección y concentración de la lluvia (incluido el almacenamiento) son los enfoques más importantes para hacer un mejor uso de la escasez de lluvia en las regiones secas. Los enfoques típicos incluían pequeños pozos con suelo trabajado y líneas de piedra a través de los campos para la conservación de la humedad in situ (Malí, Burkina Faso), recolección de escorrentía en depresiones naturales poco profundas excavadas (Namibia, Angola) y pozos excavados en las arenas de lechos de ríos secos (Kenia, Namibia) según lo documentado por Postel (1992) y Braune (2007).

La recolección de escorrentía, por ejemplo, a través de presas de excavación y presas de almacenamiento por bombeo (**Figura 4**), fue introducida sistemáticamente por el gobierno en el centro-norte de Namibia (antigua Ovamboland) durante las décadas de 1950 y 1960. La eficacia se incrementó mediante la construcción de una presa completamente cerrada, de varios metros de altura, alrededor de la depresión con el material excavado. El agua se bombea a estas presas de almacenamiento por bombeo (capacidad entre 23 000 y 105 000 m³) durante el breve período de inundación del río Cuvelai en Namibia. Para evitar la evaporación de esta agua tan costosa, la superficie de la represa a menudo se cubría con material flotante (Stengel, 1963). Un proyecto alemán de investigación por cooperación, de 2006 a 2015, tuvo como objetivo reforzar los recursos hídricos de la región. El proyecto combinó tecnologías nuevas y adaptadas (recolección de agua de lluvia, desalinización descentralizada de agua subterránea a pequeña escala, almacenamiento de agua subterránea, así como saneamiento y reutilización del agua) en una combinación de múltiples recursos para el suministro de agua y el saneamiento (CuveWaters, 2015).



Figura 4 - Imagen satelital de la represa de almacenamiento por bombeo de Onandjokwe en el norte de Namibia (Drießen y Jokisch, 2011).

La práctica de almacenamiento de agua en lechos de ríos arenosos en Namibia tiene una larga historia. Fue promovido desde principios del siglo XX por la entonces administración colonial alemana y nuevamente desde la década de 1950 en adelante por la Administración de África Sudoccidental. El principal proponente fue Otto Wipplinger, director del Departamento de Asuntos Hídricos en la antigua África Sudoccidental. Su estudio de varios tipos de presas de almacenamiento de arena, "El almacenamiento de agua en la arena", se centró en la creación artificial de cuencas de arena mediante la construcción de muros bajos en las cuencas de los ríos (Wipplinger, 1953). La innovación fue construir un muro lo suficientemente alto para romper el flujo del agua y permitir la deposición de sedimentos gruesos, mientras que el material muy fino (arcilla) pasa sobre el muro con la inundación. Una vez que la cuenca se llena, se levanta el muro y continúa el proceso de construcción del dique de arena (**Figura 5**). Una cuenca de arena puede tardar de 10 a 20 años en alcanzar su capacidad máxima y puede sincronizarse con una demanda creciente de agua. Este tipo de represas ahora se utilizan ampliamente en Namibia, especialmente por la comunidad agrícola, pero también para uso a gran escala. El beneficio clave es que el agua almacenada en la arena está en gran parte protegida de la evaporación, que puede ser de hasta 2000 mm/año desde una superficie de agua abierta en el área. También es una importante medida de conservación a través de la cual los niveles y la calidad de las aguas subterráneas han sido restaurados a sus niveles originales (Lau y Stern, 1990).

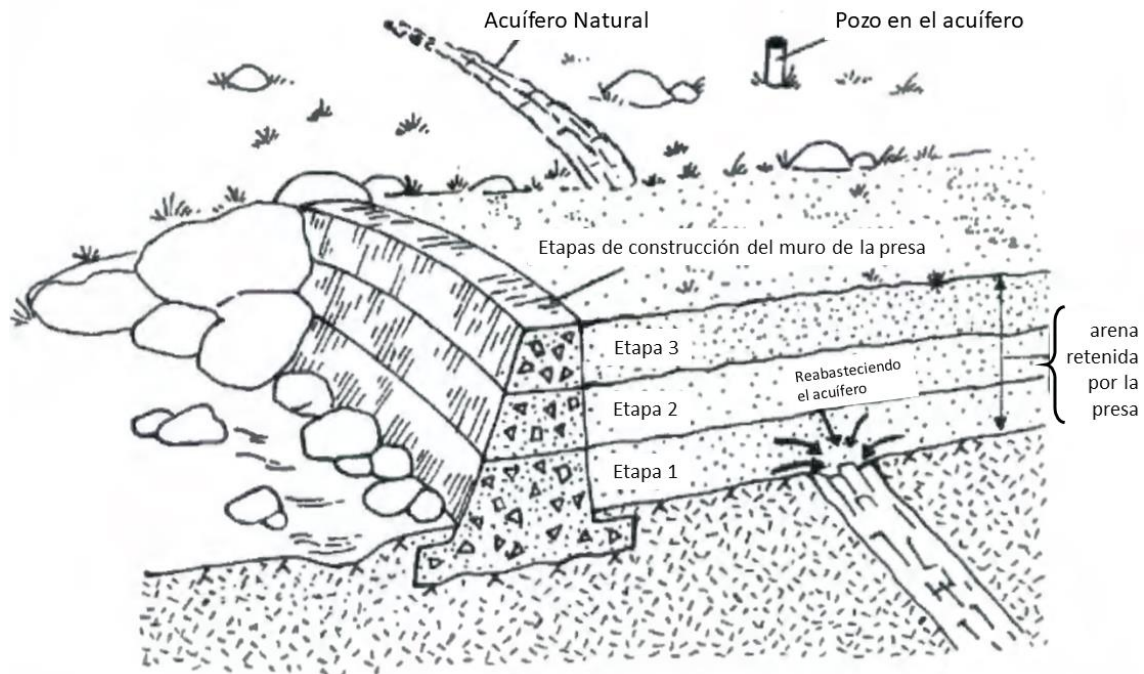


Figura 5 - Presa de almacenamiento de arena construida en etapas (Sauermann, 1966).

También se han desarrollado y aplicado varias técnicas de represamiento de aguas subterráneas a pequeña escala en muchas otras partes del mundo, especialmente en el sur y el este de África y en la India (Nilsson, 1988). Las primeras presas de Kenia se construyeron en la década de 1950. Hubo un aumento significativo en el número de presas de arena construidas en Kenia entre 1980 y 2010, impulsado principalmente por el trabajo del Proyecto de Desarrollo Utooni (UDO) y la Solución Saheliana (SASOL). A principios de la década de 2020, se construyeron aproximadamente 150 represas cada año, de las cuales 100 están en Kenia. Las represas de arena también se han introducido recientemente en Mozambique, Etiopía y Sudán (Excellent, 2012).

La experiencia de Namibia mostró que las tecnologías apropiadas a pequeña escala y sus diversas mejoras generalmente no son conocidas por los agricultores, ni por las agencias agrícolas cuyo fuerte es la producción de cultivos, ni por las agencias de agua cuyo enfoque principal es el suministro de agua a granel. El enfoque particular y el liderazgo internacional de la antigua África Sudoccidental en las opciones de suministro de agua a pequeña escala durante las décadas de 1950 y 1960 surgieron a través de la iniciativa de un pequeño número de personas dedicadas y altamente capacitadas en el lugar y en el momento correcto (Stengel, 1963). Bajo sus sucesores, en un período de enfoque renovado en el suministro de agua a granel (minas y ciudades más grandes), los enfoques y tecnologías a pequeña escala fueron virtualmente olvidados en un período de 20 años (Lau y Stern, 1990).

2.6 La Recarga Gestionada de Acuíferos Moderna en el Sur de África

En Sudáfrica, luego de un período de grave escasez de agua, las tecnologías RGA modernas ocuparon el lugar que les correspondía cuando se inició la investigación sistemática del agua con la promulgación de la Ley de Investigación del Agua (Ley número 34 de 1971) y el establecimiento de la Comisión de Investigación del Agua. Algunos de los primeros proyectos abordaron el almacenamiento de escorrentía de ríos, aguas pluviales y agua recuperada (efluentes de aguas residuales tratadas) en los depósitos de arena del acuífero de Cape Flats para su posterior extracción y aumento de los suministros de agua dulce de la Península del Cabo.

El sistema RGA más antiguo de Sudáfrica se inspiró en la prueba a escala piloto mencionada anteriormente de recarga artificial de agua subterránea en Cape Flats. El reciclaje indirecto de agua en la ciudad industrial recientemente establecida, Atlantis, en la árida costa oeste de Sudáfrica, comenzó poco después de que comenzara el desarrollo de la ciudad a mediados de la década de 1970, Tredoux y otros (2002). El efluente doméstico tratado (de los estanques de maduración) se mezcla con la escorrentía de aguas pluviales urbanas y se descarga en cuencas de recarga en el área de dunas costeras.

Una oleada de investigación encargada por la Comisión de Investigación del Agua a fines de la década de 1990 y principios de la de 2000 (Murray y Tredoux, 1998; Murray y Tredoux, 2002) sentó las bases para la implementación práctica de RGA en la región. Entre otros, condujo a la construcción de un importante sistema de inyección de pozos para la ciudad de Windhoek, Namibia (Murray, 2002; Murray, 2016). El sistema de RGA de Windhoek es de particular interés porque implica la inyección y recuperación de pozos a gran escala en un acuífero de cuarcita fracturado altamente complejo. Antes de este sistema, la RGA no se había practicado en ninguna parte del mundo a gran escala en entornos geológicos complejos. El riesgo de perder agua generalmente se consideraba demasiado alto. Al realizar un estudio de factibilidad integral, se demostró que las pérdidas de agua serían insignificantes si el sistema se diseñara y operara correctamente (Murray, 2002).

Es importante destacar que, en 2007, el gobierno de Sudáfrica, a través de su Departamento de Asuntos Hídricos y con el apoyo de la Comisión de Investigación del Agua, desarrolló y puso en marcha una Estrategia Nacional de Recarga Artificial (DWAF, 2007). Su propósito era *“utilizar el almacenamiento subterráneo natural como parte de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos siempre que sea tecnológica, económica, ambiental y socialmente factible”*.

La estrategia tenía tres ejes principales:

- aumentar la conciencia sobre la recarga artificial;
- incorporar la recarga artificial en los documentos de planificación pertinentes; y,
- desarrollar sitios de demostración exitosos.

Como seguimiento de la estrategia, se elaboró una lista completa de áreas específicas del sitio para la posible recarga artificial para cada una de las 19 áreas de gestión del agua (DWAF, 2009). El Departamento mantiene un sitio web como recurso para la investigación y la educación y como centro de información para los profesionales del agua en el gobierno y el sector privado (<https://www.artificialrecharge.co.za/>⁷).

La implementación ha sido lenta desde entonces. Además de los sistemas más grandes de Windhoek y Atlantis mencionados anteriormente, se han implementado algunos sistemas de RGA de pequeña a mediana escala en Sudáfrica y se han realizado estudios de factibilidad con la intención de implementarlos en un futuro cercano. Se llevó a cabo un importante estudio de factibilidad para el gobierno de Botswana con el objetivo de evaluar el valor de la RGA para la parte oriental más poblada del país (Groundwater Africa, 2012; Lindhe, et al., 2012).

Si bien el propósito principal de la RGA en el sur de África es aumentar el suministro de agua y mejorar la seguridad del agua, dos sistemas son para que la eliminación del agua de la mina cumpla con las regulaciones ambientales. En estos casos, no está permitido disponer los excedentes de agua de los procesos de deshidratación de las minas en la superficie terrestre, por lo que la recarga de acuíferos se ha convertido en la alternativa elegida y los agricultores locales se benefician de ella (Murray, 2016).

El volumen total de la RGA en el Sur de África en 2015 fue de 10,3 Mm³/año, o el 0,2% del uso de agua subterránea, en comparación con un promedio mundial del 2,4% (Murray, 2016; Dillon et al., 2019). Si bien el volumen es pequeño, sigue siendo un aspecto importante del desarrollo de las aguas subterráneas en el continente africano. La gran mayoría de los países africanos no han implementado la RGA. La RGA se practica con mayor frecuencia en Sudáfrica (17 casos notificados), seguido de Túnez (11 casos), Kenia (8 casos) y Argelia (5 casos). De los casos sudafricanos, 12 representan pozos abiertos, zanjas y pozos de inyección, cuatro son el método de distribución/infiltración en la superficie y uno es la modificación en el canal (Ebrahim et al., 2020).

Si bien las actividades de la RGA en el Sur de África son limitadas, es evidente que las prácticas de RGA a mayor escala podrían mejorar sustancialmente la seguridad hídrica de la región (Murray, 2016).

2.7 Selección de Casos de Estudio

Los sistemas de RGA son generalmente discutidos en términos de cinco mayores componentes (National Research Council, 2008):

- fuentes de agua a almacenar;
- método de recarga;
- método de almacenamiento y enfoque de gestión;
- método de recuperación; y,
- uso final del agua recuperada.

Las oportunidades y los problemas relacionados con la selección, el desarrollo, el uso y la regulación de los sistemas de RGA generalmente están vinculados a estos componentes, y la discusión sobre hidrogeología e hidráulica, calidad del agua, aspectos legales, regulatorios y económicos y la gestión de los sistemas generalmente están vinculados a uno o más de estos componentes. Si bien los problemas relacionados con las fuentes de agua y los usos finales pueden ser comunes tanto al almacenamiento subterráneo como al superficial del agua, muchos de estos problemas son exclusivos de los sistemas de almacenamiento subterráneo, como las posibles interacciones entre el agua almacenada y el agua nativa en el acuífero circundante.

La **Figura 6** ilustra los principales componentes de RGA mencionados anteriormente, junto con algunos criterios asociados, que afectan la selección y el diseño del sistema (Consejo Nacional de Investigación, 2008). Tenga en cuenta que muchos sistemas de RGA contienen algún tipo de tratamiento previo antes de la recarga y tratamiento posterior durante la recuperación. A menudo se requiere el control del agua almacenada. Se requiere una fuente de agua para todos los sistemas, pero la selección de la fuente está ligada al uso final (particularmente con respecto a si ese uso final será potable o no), al igual que el tratamiento y la gestión durante la recarga, el almacenamiento y la recuperación. Los principales factores que afectan la selección de métodos de recarga incluyen el tipo de acuífero, la disponibilidad de la tierra y la proximidad a la fuente de agua.

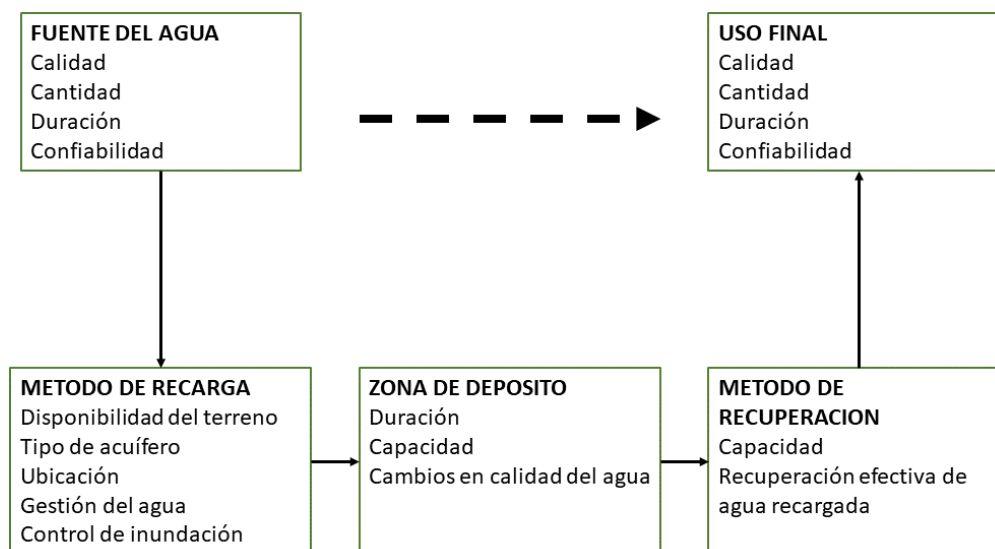
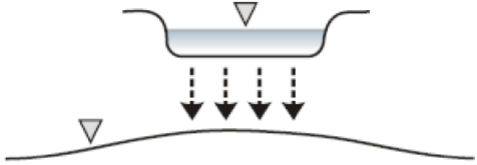
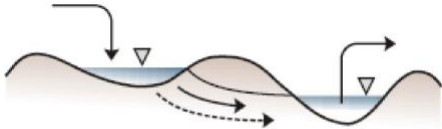
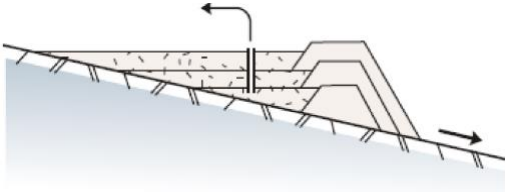


Figura 6 - Componentes técnicos de un sistema RGA (según el Consejo Nacional de Investigación, 2008).

Con estos antecedentes, se han seleccionado seis casos que cubren diferentes entornos físicos y de gestión y métodos de recarga en el Sur de África. La **Tabla 1** incluye

los casos de Cape Flats y Sedgefield, así como el uso generalizado de diques de arena, pero estos no se analizan como estudios de caso. Cada uno de los diferentes métodos de recarga en estos casos seleccionados del sur de África se ilustra en general en la **Figura 7**, utilizando un diagrama conceptual y algunos indicadores de su aplicabilidad y costo relativo (de Murray y Harris, 2010).

	<p>Cuenca de infiltración</p> <p>Cuencas construidas en acuíferos de arena o grava. El agua superficial se desvía hacia las cuencas y se permite que se infiltre a través de una zona no saturada hasta el acuífero libre subyacente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para acuíferos libres arenosos, no adecuados para suelos arcillosos. • <i>Tratamiento:</i> la infiltración es más rápida con agua limpia que con agua turbia; el tratamiento alarga las “tiradas” antes de tener que raspar las cubetas y eliminar el material fino. La zona no saturada proporciona un tratamiento natural. • <i>Costos:</i> moderados: pueden recargar gradiente arriba de pozos perforados existentes.
	<p>Infiltración de dunas</p> <p>La infiltración de agua a través de una duna de arena y la extracción de pozos/ perforaciones en el suelo/ estanques aguas abajo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para acuíferos libres sedimentarios. • <i>Tratamiento:</i> pretratamiento mínimo; el agua de la fuente debe ser razonablemente clara para evitar la obstrucción • <i>Costos:</i> bajos: solo se requiere una extracción superficial
	<p>Presa de arena</p> <p>Construido en arroyos efímeros en zonas áridas sobre litología de baja permeabilidad. Atrapan sedimentos gruesos cuando se produce el flujo y, tras sucesivas inundaciones, la presa de arena se eleva para crear un "acuífero". A menudo, se construyen sobre características de fracturas en el paisaje para acelerar la recarga del acuífero natural debajo. La extracción también puede ser del acuífero de arena. Lleva años crear el acuífero artificial, pero el enfoque permite una implementación por etapas.</p>

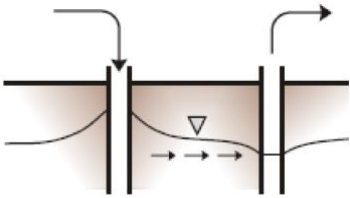
	<p>Inyección de pozo: almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA es un término comúnmente utilizado para la RGA usando pozos en los Estados Unidos y Australia)</p> <p>La inyección de agua en un pozo para almacenamiento y recuperación (principalmente de diferentes pozos)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adecuado tanto en acuíferos confinados como libres. • <i>Tratamiento:</i> por lo general se requiere mucho tratamiento: se necesita eliminar sedimentos/escombros para evitar la obstrucción del pozo. • <i>Costo:</i> moderado a alto
---	---

Figura 7 - Descripción general de los métodos de recarga discutidos en los estudios de caso de África del Sur (Murray y Harris, 2010).

Tabla 1 - Casos de estudio seleccionados con sistemas de RGA activos en el Sur de África.

Nombre del Sistema	Tipo de Acuífero	Fuente del Agua	Método de Recarga	Capacidad de Recarga (Mm ³ /year) ¹	Estado
Cape Flats ²	Arena	Aguas residuales tratadas y aguas pluviales	Cuenca de infiltración	-	Escala piloto
Atlantis	Arena	Agua pluvial urbana & aguas residuales tratadas	Cuenca de infiltración	2.7	En operación
Sedgefield ³	Arena	Aguas residuales tratadas	Infiltración en dunas	0.5	Estudio de escritorio
South Africa and wider ⁴	Aluvión	Agua de inundación efímera del río	Presas de arena que alimentan acuíferos más profundos	pequeña	En operación
Omdel (Namibia)	Aluvión	Agua de inundación efímera del río	Presa para retener el agua de la inundación - descarga al acuífero d/s	7.9	En operación
Langebaan	Sedimentos del Cenozoico	Agua de río y aguas residuales tratadas	Inyección en pozo	14	Pruebas iniciales de inyección
Windhoek (Namibia)	Cuarcita fracturada	Embalses de agua superficial	Inyección en pozo	12	En operación
Kharkams	Gneis fracturado	Manantiales efímeros	Inyección en pozo	0.005	En operación
Plettenberg Bay	Cuarzo-arenitas fracturadas	Escorrentía del río	Inyección en pozo	0.8	Pre-feasibilidad

¹ Millones de metros cúbicos por año

² Discutido en la sección final

³ Mencionado bajo Plettenberg Bay

⁴ Bajo tecnologías tradicionales

Con fines de comparación y evaluación general, cada estudio de caso se discutirá bajo los siguientes encabezados:

- necesidad de recarga artificial – preparación del escenario;
- fuente de agua;
- hidráulica de acuíferos;
- calidad del agua;
- elementos del sistema;
- entorno de gestión de los recursos hídricos; y,
- evaluación y camino a seguir.

La sección de estudio de caso concluirá con algunas ideas sobre el despliegue de RGA hasta la fecha como parte del desarrollo sostenible de los recursos de agua subterránea en la región.

3 Caso de Estudio: Atlantis, Ciudad del Cabo, Sudáfrica

El objetivo de presentar varios casos de estudio en este libro es discutir:

- las diversas fuerzas que fomentan el uso de las técnicas de Gestión de Recarga de acuíferos (RGA);
- los factores que influyen en la selección de una técnica RGA específica;
- diferentes técnicas RGA y su aplicabilidad en diferentes entornos;
- la eficiencia y efectividad de varias técnicas RGA;
- la importancia de la calidad del agua y la mezcla de diferentes tipos de agua cuando se aplican técnicas RGA;
- los procesos legislativos del sur de África involucrados en la implementación de RGA;
- el monitoreo y la sustentabilidad de las técnicas RGA implementadas en el sur de África; y,
- lecciones aprendidas en África del sur respecto a la implementación de RGA.
- Esta sección, Sección 3, presenta la RGA en el acuífero Atlantis.

3.1 La Necesidad de Recarga Artificial – Estableciendo las Condiciones

La ciudad de Atlantis se encuentra aproximadamente 50 km al norte de Ciudad del Cabo, Sudáfrica, y forma parte de la zona metropolitana de Ciudad del Cabo. Atlantis presenta un clima mediterráneo con la mayor parte de sus 450 mm de precipitación promedio anual sucediendo en invierno, entre Abril y Septiembre. Hasta un 30% de la lluvia recarga el sistema subyacente de agua subterránea, particularmente a través de áreas de dunas sin vegetación. La ciudad fue establecida como una ciudad industrial, basado en “el concepto ciudad nueva”, encontrándose lo suficientemente lejos del centro de Ciudad del Cabo para ser autosuficiente, y en la cual todos los habitantes tendrían empleos en la misma ciudad, Tredoux y Cave (2002). La **Tabla 2** muestra un resumen del suministro de agua de Atlantis.

Tabla 2 - Sistema del suministro de agua de Atlantis.

Nombre del sistema	Atlantis Water Supply Scheme
Ubicación	Acuífero Atlantis, Ciudad del Cabo, Sudáfrica
Promedio anual de precipitaciones	450 mm/año
Fuente del agua	Aguas de tormenta y aguas residuales con tratamiento secundario
Tipo de acuífero	Acuífero primario, predominantemente arena, presencia de caliche (calcreta ó tosca)/calcisol y turba
Uso final del agua	Usos industrial y doméstico
Tipo de recarga gestionada de acuíferos	Cuencas de infiltración amplias
Volumen actual de agua recargada	7500 m ³ /d aguas de tormenta y aguas residuales tratadas
Volumen de agua recuperada	2.7 Mm ³ /año
Año de inicio	1979
Dueño/Operador del sistema	Ciudad del Cabo
Atributos únicos de este sistema RGA	Reutilización de agua, tanto aguas residuales como de tormenta, buen ejemplo de la gestión integrada de los recursos hídricos.

El suministro de agua subterránea inicialmente planeado para Atlantis fue insuficiente para proveer a la población y a la creciente industria en el área, Tredoux (1987). La fuente de agua alternativa más cercana era el río Berg, que se encuentra a 70 km de distancia y la canalización de agua a Atlantis resultaría demasiado costoso, Tredoux y Cave (2002). Por lo tanto, los recursos de agua subterránea fueron explorados y las áreas de pozos fueron desarrollados (**Figura 8**). Se construyeron cuencas de retención de aguas de tormenta y gran parte del agua se infiltró a los suelos arenosos, recargando el acuífero involuntariamente.

El cambio a la recarga intencional y artificial del acuífero llegó como resultado de un cambio en la legislación nacional, que introdujo un estricto sistema de permisos para descarga de aguas residuales y un riguroso protocolo de monitoreo. Hasta la década de 1970 la descarga al mar de aguas residuales tratadas era una práctica común en Sudáfrica. Los costos asociados al cumplimiento a las nuevas medidas de control de polución resultaron prohibitivos para Atlantis. Teniendo como base los resultados de estudios piloto llevados a cabo en Planicies del Cabo (1973-1979) para investigar aplicaciones alternas de las aguas residuales, se inició a recargar el acuífero local de Atlantis con aguas residuales tratadas en 1979 (DWAF, 210; Quayle, 2012). La **Figura 8** muestra la ciudad, el área industrial y los componentes principales del sistema de suministro de agua.

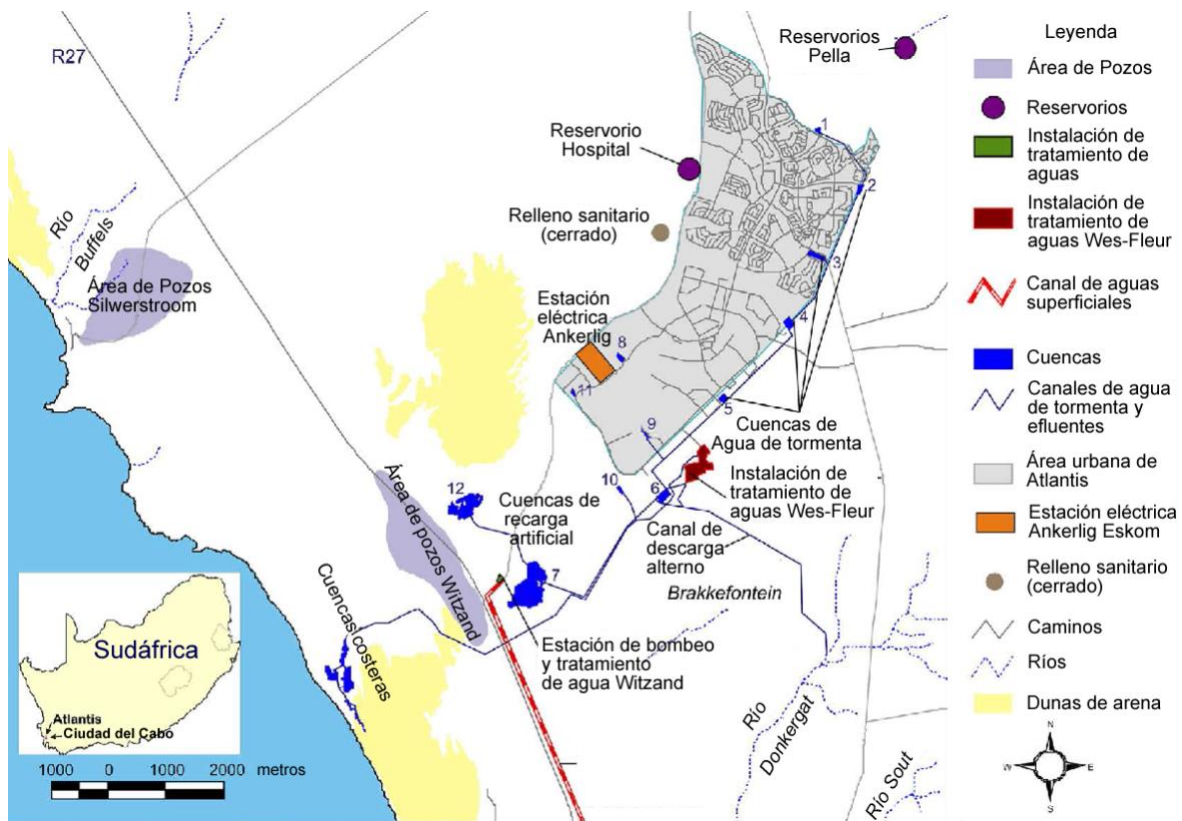


Figura 8 - Ciudad de Atlantis a lo largo de la costa oeste de Sudáfrica (Bugan et al., 2016)

3.2 La Fuente del Agua

No hay ríos importantes fluyendo a través del área de Atlantis. Las únicas fuentes de agua superficial en el área incluyen el río Buffels en Silverstroom y, durante el invierno, los ríos Donkergat y Sout, los cuales fluyen hacia el sur del área de Atlantis (DWAf, 2010). Todos estos son ríos no perennes que se secan durante el verano. Se han utilizado manantiales perennes que alimentan el río Buffels en Silverstroom para suministro de agua desde 1976. Debido a la alta capacidad de infiltración del suelo en Atlantis, hay un flujo superficial mínimo en el área.

En el caso de Atlantis, las aguas de tormenta y aguas residuales domésticas tratadas se convierten en *las fuentes del agua*. La ciudad (17 km²) genera grandes volúmenes de aguas de tormenta debido a la presencia de extensas superficies impermeables. Las cuencas de recarga en Atlantis reciben un promedio de 750 m³/d de aguas de tormenta y aguas residuales domésticas, lo cual equivale aproximadamente a una contribución de 2.7 Mm³/año al suministro de agua de Atlantis. Esto es equivalente al 30 % del suministro de agua del área.

Un total de 12 cuencas de retención capturan aguas de tormenta de las áreas residencial e industrial. Las aguas de tormenta de zonas industriales son separadas del agua de tormenta urbana debido a la posibilidad de encontrar agua con mayor salinidad derivada de las actividades industriales (Tredoux et al., 1999). La combinación de aguas de tormenta del área residencial y del agua residual tratada es dirigida a las cuencas de recarga

artificial como se muestra en la **Figura 8** (DWAF, 2010). El efluente y exceso de aguas de tormenta industrial son dirigidos a cuencas de recarga costeras, y se filtran al océano a través del subsuelo, lo cual previene intrusión salina (Bugan et al., 2016).

3.3 Hidráulica del Acuífero

El Acuífero Atlantis, un sistema costero primario, se compone de sedimentos Cenozoicos con edades del Paleógeno y Neógeno (terciarias) (66 a 2.6 millones de años) y Cuaternarias (2.6 millones de años al presente), superpuestos al basamento rocoso Grupo Malmesbury, el cual consiste en grauvacas y filitas como se muestra en la **Figura 9** (Van Der Merwe, 1983; Rogers, 1980).

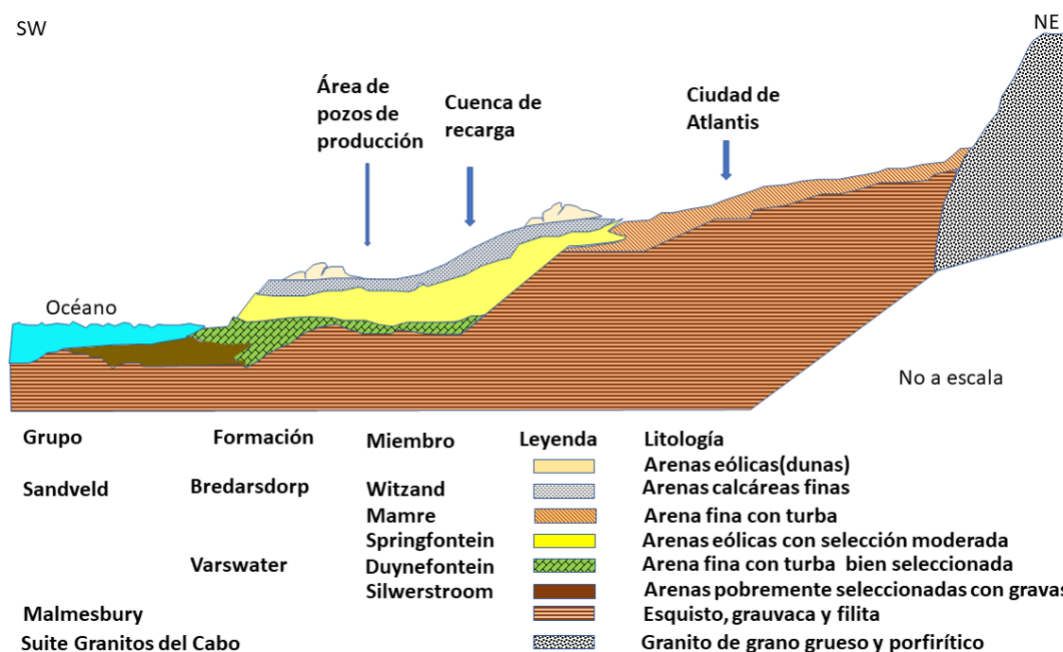


Figura 9 - Estratigrafía del sistema acuífero costero primario en el área de Atlantis (DWAF, 2010).

El acuífero cubre un área de aproximadamente 130 km², extendiéndose tierra adentro desde el océano atlántico hacia la ciudad en el este. El acuífero es delgado, apenas excediendo un espesor de 35 m, tiene una pendiente pronunciada de 160 m el norte descendiendo al nivel del mar en el oeste (Tredoux et al., 2009a).

3.4 Calidad del Agua

3.4.1 Contaminación

Las *fuentes puntuales* de contaminación en un área se relacionan a usos de suelo tales como cementerios, rellenos sanitarios y más recientemente a una central eléctrica que opera con combustible diésel. Las *fuentes no puntuales* incluyen asentamientos humanos informales, constituidos por operaciones agrícolas e industriales de pequeña escala y sin servicios básicos. Los *contaminantes emergentes* fueron encontrados gracias a un estudio

especial realizado en Atlantis, que indicó trazas de compuestos orgánicos y farmacéuticos presentes en el sistema.

3.4.2 Monitoreo y Mejora de la Calidad del Agua

La calidad del agua se mide exhaustivamente, tanto en el acuífero y en el sistema de gestión de agua urbana. La calidad de agua del acuífero es estimada mediante pozos de sondeo en las áreas de pozos que han sido establecidas, así como puntos de monitoreo distribuidos en el área de gestión de agua de Atlantis en un ciclo de cinco semanas. Para el caso del sistema de agua urbana, hay puntos críticos de monitoreo (puntos de control) seleccionados, que toman en cuenta los varios pasos del sistema RGA en el cual pueden ocurrir cambios importantes (Tredoux et al., 2009a). Estos puntos de control crítico son explicados en la sección 3.5. La magnitud completa del área de monitoreo de la calidad del agua se muestra en la **Figura 10**.

La conductividad eléctrica en el área de pozos Witzand se encuentra en un rango entre 40 y 120 mS/m. La parte norte contiene agua bicarbonatada cálcica (Ca-HCO₃), mientras que las partes más al sur presentan agua con contenido rico en cloruro de sodio (Na-Cl). Frecuentemente, el agua extraída de esta área de pozos tiene que pasar por un proceso de ablandamiento para remover su dureza temporal. Varios de los pozos en las partes más al sur del área de pozos han sido dados de baja para evitar captación de aguas con alta salinidad y contenido de sulfatos (Bugan et al., 2016).

La conductividad eléctrica en el área de pozos Silwerstroom por las últimas décadas se ha encontrado en el rango entre 40 y 180 mS/m con un promedio aproximado de 80 mS/m. Esta área de pozos tiene niveles de calcio (Ca) menores comparado al campo Witzand. Solamente la conductividad eléctrica y la concentración de hierro (el cual se encuentra en niveles de 0.1 hasta 0.3 mg/L) se hallan fuera de los estándares de agua potable en Sudáfrica (SANS, 2011; DWAF, 1998), pero estas concentraciones son removidas en el proceso final de ablandamiento.

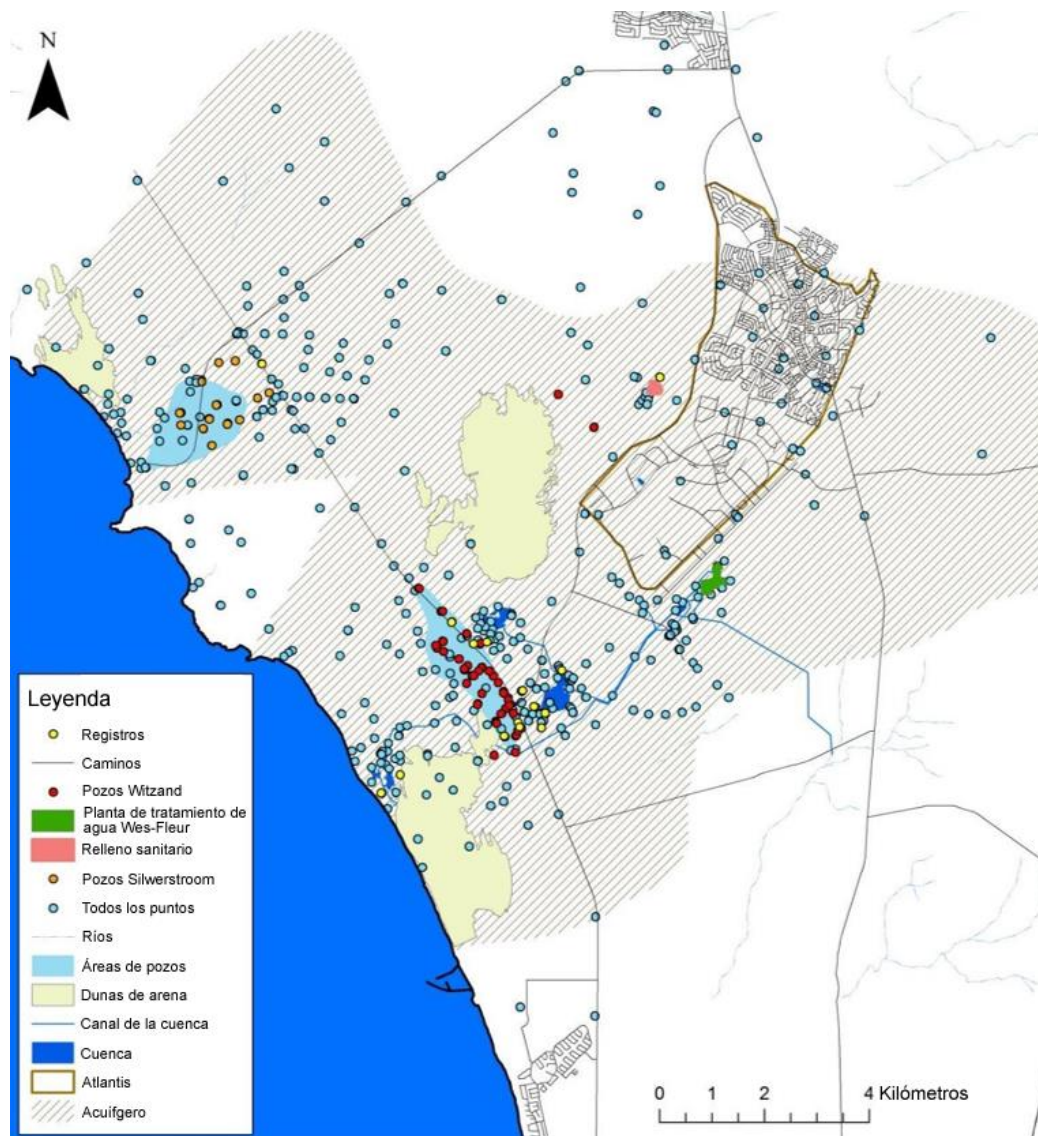


Figura 10 - Ubicación de pozos de monitoreo y producción en todo el sistema de Atlantis (Bugan et al., 2016).

El sistema de monitoreo ha mostrado que el potasio (K) y el nitrato (NO_3^-), los cuales frecuentemente son utilizados como trazadores de aguas residuales, se encuentran de manera elevada en el agua residual. A pesar de ello, todos los parámetros de concentración son reducidos considerablemente conforme el agua avanza por el sistema de gestión de agua. Esto demuestra la eficiencia del suelo como un filtro natural durante la infiltración del agua.

El impacto del sistema de tratamiento en bacterias es de particular importancia para la salud humana. Las aguas de tormenta tienden a tener conteos microbianos más altos que los efluentes de aguas residuales tratadas. Los conteos bacterianos en varios puntos del sistema ilustran la importancia del paso por el subsuelo como una barrera de seguridad en el sistema. (Figura 11). Tredoux y otros (2009a) reportan que no solamente organismos indicadores como la *E. coli* disminuyen substancialmente conforme el agua avanza por el

sistema, pero agentes patógenos, incluyendo virus, siguen un patrón similar de reducción logarítmica, proveyendo los márgenes de seguridad necesarios para el sistema de reciclado.

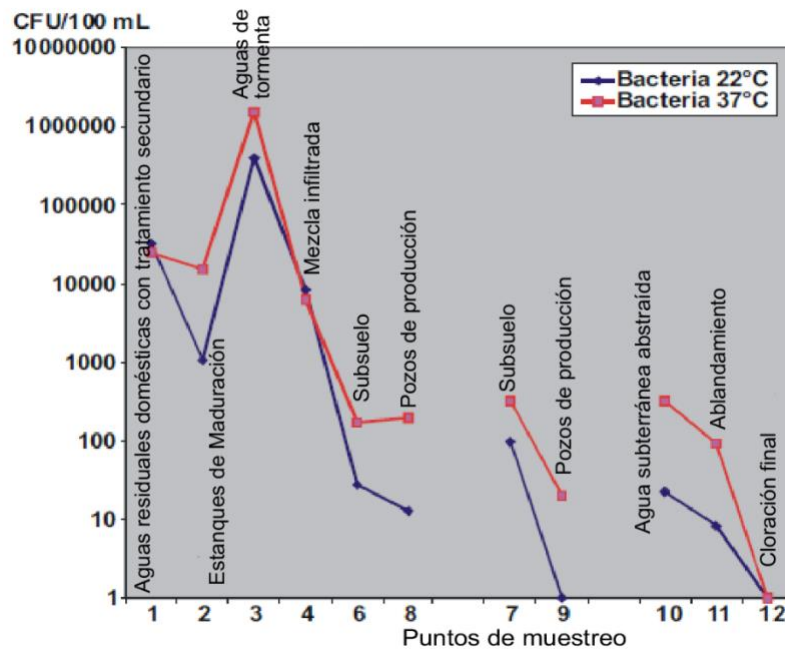


Figura 11 - Remoción bacteriana en el sistema de reciclado de Atlantis (Tredoux et al., 2009a).

Los contaminantes emergentes no son monitoreados constantemente, y ocurren en concentraciones muy bajas. Se observaron reducciones de un orden de magnitud en concentraciones de los parámetros medidos conforme se avanzó desde agua superficial a agua subterránea, y de agua subterránea a agua extraída hasta llegar finalmente al punto de distribución. Aunque se espera cierto grado de degradación o adsorción del material geológico en el subsuelo, parece indicarse que la mayoría de la reducción podría ser adjudicada a la dilución. Los resultados demuestran que el paso del agua por el subsuelo es un método exitoso para reducir el riesgo a la salud para reúso potable (Tredoux et al., 2009a).

La *obstrucción de las perforaciones* ha sido un problema recurrente desde la década de 1990 en las áreas de pozos de Atlantis, lo cual resultó en la disminución del rendimiento. La ocurrencia de obstrucción en los pozos se atribuye a (Bugan et.al., 2016):

- la presencia natural de hierro y manganeso disponibles en el acuífero (Smith, 2006);
- la ocurrencia natural de bacterias en el suelo, las cuales acumulan hierro y manganeso debido a niveles freáticos fluctuantes y concentraciones de oxígeno disuelto;
- construcción de pozos; y,
- el calendario de bombeo (por ejemplo, un bombeo excesivo durante condiciones de sequía).

La remoción de hierro in-situ para prevenir obstrucción por hierro en pozos de producción fue investigada recientemente en el acuífero Atlantis (Robey y Tredoux, 2013). Se generó ozono en el sitio y fue inyectado al acuífero mediante pozos de bombeo puntuales. Los resultados del experimento mostraron que las concentraciones de hierro y manganeso en la fase disuelta se redujeron considerablemente. Una implementación a escala completa de este experimento se está llevando a cabo actualmente en el área. La implementación exitosa de este método podría reducir significativamente el costo de tratamiento de aguas y los costos de mantenimiento de pozos de producción.

3.5 Elementos del Sistema

Los distintos componentes del sistema del sistema de abastecimiento de Atlantis se presentan en la **Figura 12**.

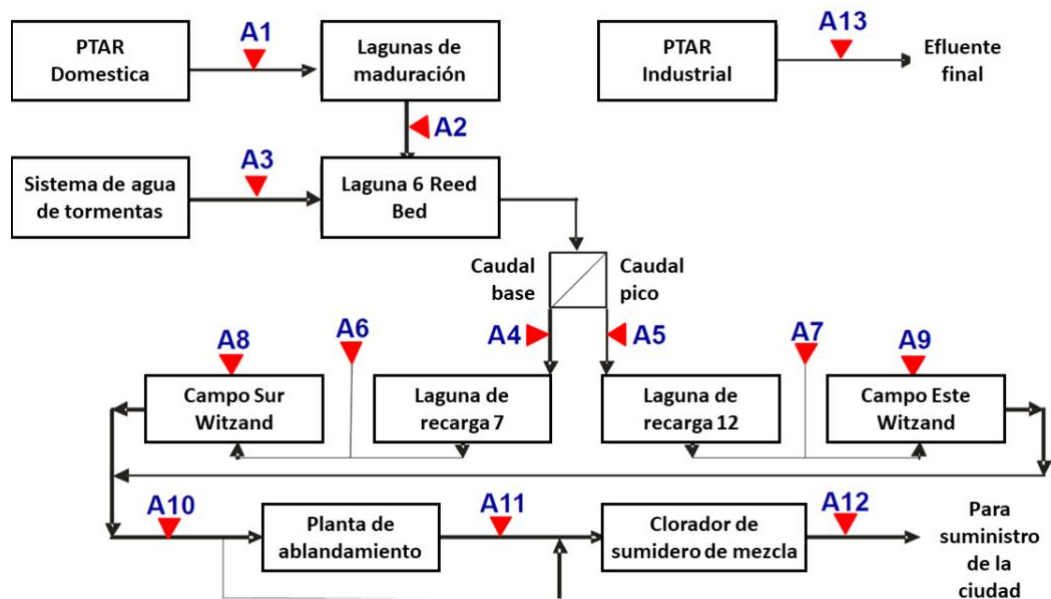


Figura 12 - Sistema de suministro de agua de Atlantis con puntos de control críticos seleccionados para el monitoreo mostrados como A1 a A13 (DWAf, 2010).

Las aguas residuales domésticas e industriales se tratan por separado y solo se reciclan las aguas residuales domésticas. El efluente de los tanques de sedimentación secundarios se purifica en una serie de estanques de maduración. Estas se liberan a una balsa con base de caña o junco en el fondo. La escorrentía de aguas pluviales se recolecta a través de un sistema de recolección de aguas pluviales de 12 cuencas de detención y retención. El flujo máximo y el flujo base en el sistema de aguas pluviales se canalizan a diferentes cuencas de recarga para mantener una buena calidad del agua en áreas seleccionadas del acuífero (Tredoux et al., 2009a). El efluente doméstico tratado de los estanques de maduración se mezcla con la escorrentía de aguas pluviales urbanas de baja salinidad antes de descargarse en las principales cuencas de recarga (Tredoux y Cavé, 1997). Las dos cuencas de recarga se muestran en la **Figura 13**.

El efluente más salino de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales se descarga en cuencas de recarga costeras y se filtra al océano a través del subsuelo (Wright, 1991; Wright y Parsons, 1994). Esto también sirve como una medida de mitigación contra la posible intrusión de agua de mar (**Figura 14**).



Figura 13 - Balsas de infiltración que forman parte integral del sistema de recarga y reciclaje artificial en Atlantis. La Table Mountain de Ciudad del Cabo está al fondo (DWAF, 2010).



Figura 14 - Balsa costera de recarga para disposición de aguas residuales industriales tratadas (DWAF, 2010).

El agua subterránea se extrae en los campos de pozos de Witzand y Silwerstroom. La **Figura 15** muestra la tendencia en la extracción en los campos de pozos respectivos. Las tasas de extracción han disminuido desde que se agregó agua superficial al sistema en 1999. Sin embargo, ha continuado la recarga artificial de aguas residuales domésticas tratadas y aguas pluviales urbanas, lo que ha resultado en niveles elevados de aguas subterráneas,

particularmente en las cercanías y aguas abajo de las cuencas de recarga artificial. Los niveles elevados de agua subterránea tienen posibles consecuencias negativas en términos de atenuación de contaminantes potenciales, debido a la reducción del espesor de la zona no saturada y tiempos de residencia de agua subterránea más cortos. La extracción también se reduce debido a la obstrucción bacteriana de los pozos de producción relacionada con el hierro y la falta de un mantenimiento de rutina efectivo para abordar el problema de la obstrucción (Buga et al., 2016).

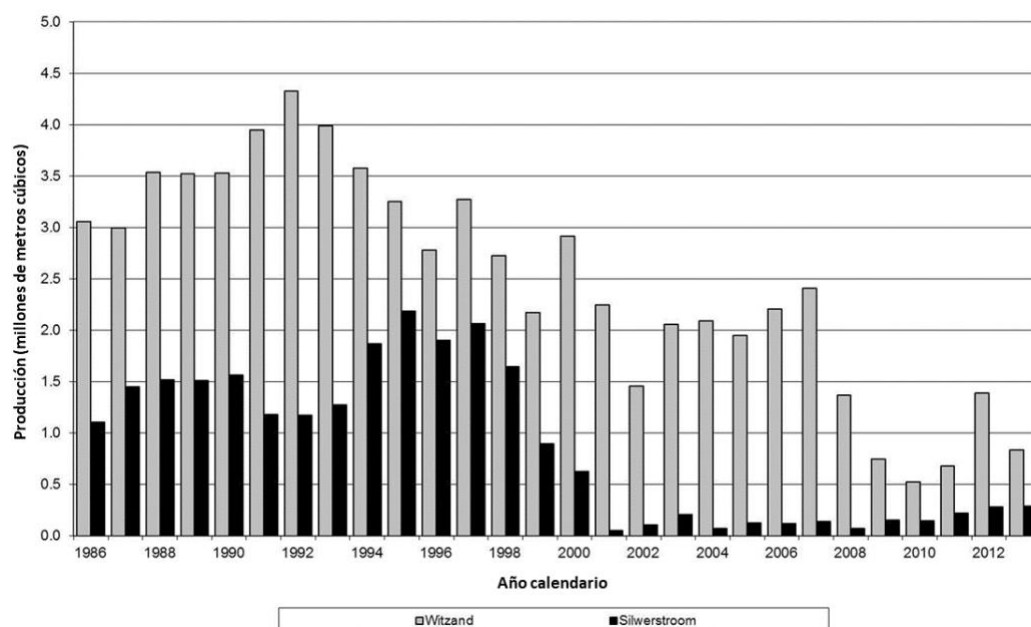


Figura 15 - Tendencia en los volúmenes de producción en los campos de pozos de Witzand y Silwerstroom (Buga et al., 2016).

3.6 Entorno de Gestión de Recursos Hídricos

La naturaleza integrada del sistema y la adaptación local que ha tenido lugar aseguran que el sistema sea localmente viable y aceptable. Las relaciones con los consumidores para el sistema de suministro de agua de Atlantis se mantienen a través de reuniones trimestrales con la industria y la comunidad. Las industrias han ayudado en el desarrollo continuo del esquema. El sistema de suministro de agua de Atlantis proporciona 48 puestos de trabajo en la operación y el mantenimiento del sistema, lo que contribuye aún más a la economía y la comunidad locales.

La sostenibilidad a largo plazo del complejo sistema de suministro de agua a gran escala depende del mantenimiento adecuado de todos los componentes, lo que requiere un enfoque multidisciplinario. Antes de julio de 1997, Atlantis se gestionaba como una ciudad independiente, por lo que la gestión de los componentes clave del plan (suministro y calidad del agua, tratamiento de aguas residuales y gestión de aguas pluviales urbanas) se concentraba localmente, lo que permitía un control estricto. Después de 1997, Atlantis se incorporó al área metropolitana de Ciudad del Cabo, lo que resultó en la redistribución de

funciones entre varios departamentos, como agua a granel, aguas residuales, carreteras y aguas pluviales, parques y bosques. Todos estos departamentos, junto con los consultores designados por la ciudad de Ciudad del Cabo, discuten regularmente temas relacionados con el sistema de suministro de agua de Atlantis para mejorar y optimizar el sistema, su operación y monitoreo. Los consultores pueden variar de vez en cuando. El agua subterránea como fuente de abastecimiento de agua es un concepto relativamente nuevo para la ciudad de Ciudad del Cabo y la “propiedad” aún debe integrarse en todos los niveles administrativos.

El financiamiento temprano para obras de capital y construcción fue relativamente accesible. Sin embargo, la financiación operativa ha disminuido, lo que ha dado lugar a una mayor dificultad para financiar otras obras. Esto tiene un impacto negativo correspondiente en Atlantis y podría obstaculizar las actualizaciones del sistema. La operación del sistema es económica en comparación con las alternativas, es decir, el transporte de agua superficial a 70 km del río Berg o la desalinización. También trata de forma segura las aguas residuales.

3.7 Evaluación y Camino a Seguir

El sistema de suministro de agua de Atlantis es un excelente ejemplo de uso inteligente y eficiente del agua, incluido el reciclaje de agua para servicios de agua potable. También ha aliviado parte de la presión sobre los recursos hídricos superficiales en la región, especialmente con los impactos inminentes del cambio climático y un mayor crecimiento económico/poblacional. La disponibilidad de agua superficial puede eventualmente verse restringida debido al rápido desarrollo de la costa oeste del Cabo y la falta de recursos hídricos locales. Por lo tanto, los recursos de agua subterránea y el sistema de reciclaje de agua asociado seguirán siendo de vital importancia para garantizar el suministro de agua a Atlantis. Sin embargo, esto requiere que el sistema de suministro de agua de Atlantis se gestione de manera eficiente.

La gestión y operación adecuada de los sistemas de RGA es compleja, pero es de suma importancia para garantizar los volúmenes y la calidad de agua requeridos. Los aspectos sugeridos para una mejor gestión y operación del sistema de suministro de agua de Atlantis incluyen los siguientes (Bugan et al., 2016; Tredoux et al., 2009a).

- Se requieren intervenciones para detener la disminución de las tasas de extracción y el aumento de los niveles de agua subterránea (p. ej., desobstruir los pozos perforados existentes o perforar y establecer nuevos pozos de producción). La implementación de tales intervenciones mejoraría en gran medida la seguridad del suministro de agua.
- Restablecimiento de las actividades de monitoreo que han ido disminuyendo desde 2005 debido a que el monitoreo actual solo contempla el cálculo empírico del balance hídrico. Es esencial que se mantenga un programa de monitoreo para todos los componentes del balance hídrico. El plan necesitará personal especializado para el

seguimiento y la evaluación especializados. No puede seguir dependiendo de consultores. Recientemente se han desarrollado una serie de directrices y manuales (Jovanovic et al., 2014) que pueden servir para el desarrollo de capacidades del personal en la gestión y operación del sistema.

- Desarrollo e implementación de un plan de protección de aguas subterráneas debido a que el acuífero no está confinado y es vulnerable a la contaminación.
- Desarrollo e implementación de un plan de gestión de riesgos con monitoreo actualizado para prevenir riesgos por contaminantes nuevos y emergentes.
- Mejora de los procesos de tratamiento de aguas residuales con base en los resultados de los estudios realizados en Atlantis y preparación para el tratamiento potencial de aguas pluviales para garantizar que la calidad del agua siga siendo aceptable.

El éxito general y la operación del sistema de suministro de agua de Atlantis son prometedores en términos del establecimiento de sistemas similares en las áreas áridas y semiáridas de Sudáfrica y todo el continente africano para mitigar el estrés hídrico. Muchas lecciones aprendidas de la experiencia Atlantis pueden transferirse a otros sitios. Sin embargo, cada sitio tendrá que diseñar soluciones únicas de ingeniería y gestión según las fuentes específicas de agua, la demanda de agua y la configuración hidrogeológica.

4 Caso de Estudio: Delta de Omaruru, Costa Oeste, Namibia

4.1 La Necesidad de Recarga Artificial – Preparando el escenario

Namibia es el país más árido al sur del Sahara, con lluvias escasas e impredecibles y ríos perennes solo en sus fronteras. Muchos asentamientos de Namibia están situados en la zona costera del árido desierto de Namib (por ejemplo, Walvis Bay, Swakopmund y Henties Bay) y dependen del agua subterránea almacenada en los acuíferos costeros de los efímeros ríos Kuiseb, Swakop y Omaruru que se originan a más de 300 km tierra adentro. en altitudes cercanas a los 2.000 m y rara vez desembocan en el océano. La **Tabla 3** resume las características más destacadas del sistema del delta de Omaruru.

Tabla 3 - Sistema Omaruru Delta (OmDel).

Nombre del Sistema	Sistema del Delta de Omaruru (OmDel)
Ubicación	Costa oeste de Namibia
Lluvia anual promedio	< 50 mm/año
Fuente del agua	Agua de inundación regulada
Tipo de acuífero	Acuífero aluvial
Uso final del agua	Uso doméstico y minero
Tipo de recarga gestionada	Estanques de infiltración
Volumen promedio actual de agua recargada	7.9 Mm ³ /año
Volumen de agua recuperado	4.6 Mm ³ /año
Año de inicio	1991-1995
Propietario/gestor del sistema	Namibia Water Corporation (NamWater)
Atributos únicos del sistema de RGA	Almacenamiento y liberación lenta de agua de inundación para un incremento significativo de recarga en acuífero aluvial aguas abajo.

A mediados de la década de 1970, la demanda de agua asociada con el rápido crecimiento en asentamientos costeros y una gran mina de uranio aumentó a 8,4 Mm³/año. Esto es de 15 a 20 por ciento más que la recarga explotable anual promedio de los tres acuíferos combinados. La situación se había visto agravada aún más por una serie de años muy secos (Water Scarcity Solutions, 2015). En el campo de pozos existente en el acuífero del delta del río Omaruru (un área con menos de 50 mm/año de precipitación que se extiende 35 km hacia el interior hasta la llanura de Namib), la extracción se había convertido en casi el doble del rendimiento seguro y los niveles de agua subterránea habían descendido decenas de metros (Zeelie, 2004).

Para revertir la tendencia negativa, en 1988 se inició un proyecto de investigación con el objetivo de investigar si el rendimiento sostenible del acuífero podría incrementarse

mediante recarga artificial. El sistema Omdel fue construido posteriormente durante el período de 1991 a 1995. Consiste en una presa con una capacidad de almacenamiento de 41 Mm³ y una serie de cuencas de infiltración en el lecho del río 6 km aguas abajo, donde el cauce actual del río cruza profundos paleocauces (Zeelie, 2004; Murray, 2009; Christelis, 2019).

4.2 La Fuente del Agua

4.2.1 Ríos de Arena

Los ríos no perennes caracterizan la hidrología de Namibia. Debido al clima árido del país, la evaporación potencial es casi seis veces mayor que la precipitación promedio, y solo aproximadamente el 2 por ciento de la lluvia se convierte en escorrentía y el 1 por ciento ingresa al agua subterránea. Crecidas periódicas recargan el cauce de los ríos de arena de ríos efímeros y solo ocasionalmente alcanzan el Atlántico (Heyns et al., 1998). La cuenca del río Omaruru cubre 15.700 km², de los cuales el área montañosa de origen recibe de 200 a 450 mm/año de lluvia. La mayoría de las inundaciones se originan en las montañas. Las aguas de la inundación recargan el canal del río de arena (**Figura 16**) a medida que avanzan río abajo y finalmente llegan al océano si la lluvia continúa durante el tiempo suficiente. También se produce un flujo mucho más lento como flujo de agua subterránea en el acuífero del río de arena (Stengel, 1966). Un desafío importante son las inundaciones muy poco frecuentes en la parte inferior de la cuenca. En un período de 22 años desde 1994 (cuando se completó el sistema) hasta 2016, hubo seis períodos con inundaciones en la cuenca inferior y solo tres de estos con un impacto significativo en la recarga del acuífero.



Figura 16 - Río efímero Omaruru (Baumeler, 2018) [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

El río Omaruru, como todos los ríos que fluyen hacia el oeste, lleva una gran carga de sedimentos. Investigaciones anteriores habían indicado que la recarga natural en el sistema estaba disminuyendo debido al sedimento que sellaba el lecho del río. Como resultado, la mayor parte del agua fluía sobre el limo y hacia el mar. Por lo tanto, se propuso

que las aguas de la inundación se contuvieran durante un tiempo en un dique de contención, lo que permitiría que el sedimento se asentara. Luego, el agua limpia podría liberarse en las áreas de infiltración, asegurando así que la mayor parte del agua de la inundación llegue a los acuíferos. Esto requirió una aplicación cuidadosa de las reglas operativas (Water Scarcity Solutions, 2015) de la siguiente manera:

- se libera agua cuando los sólidos en suspensión son inferiores a 20 mg/L;
- se mantiene la carga hidrostática máxima en todos los lechos de infiltración;
- los lechos de infiltración se limpian de sedimentos dos veces al año; y,
- los niveles de agua en los pozos de observación de la cuenca de infiltración se monitorean continuamente.

4.3 Hidráulica del Acuífero

El acuífero del delta consiste en paleocanales profundamente incisos llenos de sedimentos, debajo del cauce actual del río, con una capacidad total de almacenamiento de 150 Mm³ (Figura 17). El campo de pozos Omdel de 33 perforaciones se desarrolló aquí en la década de 1970 para aumentar los suministros costeros. Los pozos de producción explotan el aluvión de arena y grava de 70 a 110 m de espesor (Christelis y Struckmeier, 2001; Geyh y Ploethner, 1995).

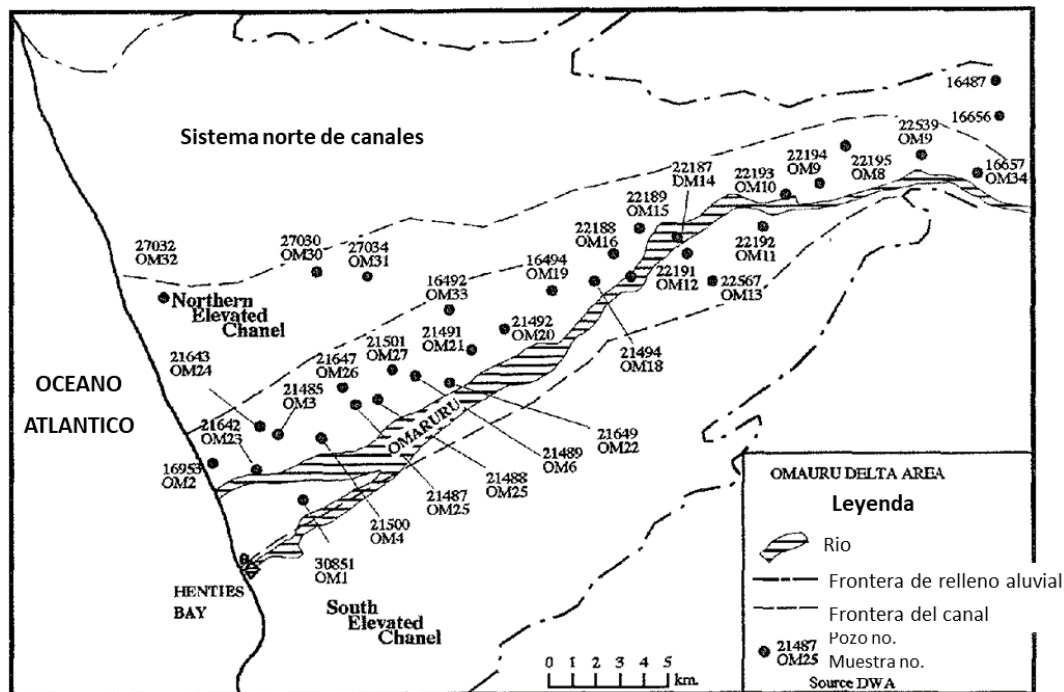


Figura 17 - Acuífero Omdel con el canal principal y canales laterales (Geyh and Ploethner, 1995).

4.4 Calidad del Agua

El acuífero del canal principal contiene agua subterránea de dulce a ligeramente salobre, recargada por el flujo de paso y el flujo de inundación superficial. En los canales

menos profundos, que flanquean el canal principal por ambos lados, predomina el agua subterránea salobre (Christelis y Struckmeier, 2001; Geyh y Ploethner, 1995). Las mediciones de conductividad eléctrica del agua de inundaciones y acuíferos recolectadas en 1997 ilustran la importancia de la recarga regular de inundaciones (**Tabla 4**).

Tabla 4 - Conductividad Eléctrica 1997 (mS/m) (Murray, 2009).

Agua de la Presa Omdel	~57
Sitio de Recarga I (6 km aguas-abajo)	~110
Agua extraída del acuífero	~190

4.5 Elementos del Sistema

Los elementos clave del sistema (recarga y extracción) se ilustran en la **Figura 18**. Es útil tener en cuenta los siguientes puntos al ver la **Figura 18** (Water Scarcity Solutions, 2015):

- la presa y el almacenamiento asociado en el que se puede permitir que se asiente el sedimento de las aguas de la inundación;
- la presa está construida sin un muro de cimentación que se extienda hasta el lecho rocoso, lo que permite el paso del agua subterránea;
- una tubería de descarga de varios niveles para permitir la transferencia de agua clara a los lechos de infiltración;
- dos grandes áreas de infiltración aguas abajo de la presa; y
- remoción de sedimentos alrededor de la torre de extracción (**Figura 18b**).

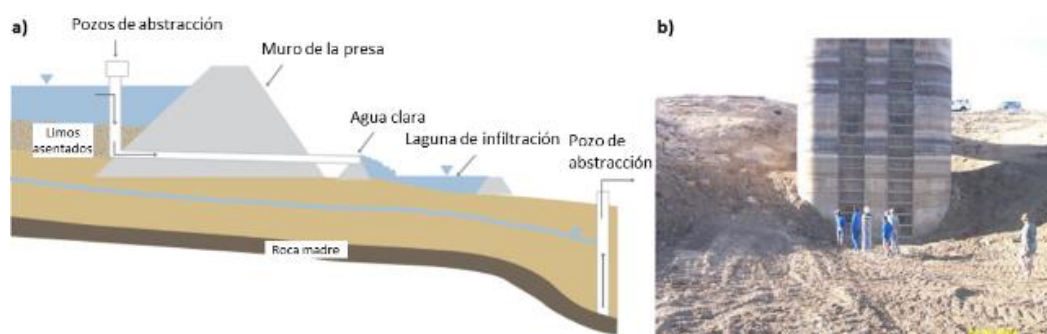


Figura 18 - Sistema de Omdel: a) esquema del proceso de recarga y extracción (Water Scarcity Solutions, 2015); y b) foto de remoción de sedimentos alrededor de la torre de extracción (Mostert y Matengu, 2019).

Cuando la presa se llena de agua, se deja reposar durante 9 semanas para que se asiente el sedimento. Luego, el agua limpia de la superficie es extraída por una torre de captación y fluye a través de una tubería debajo de la pared hacia cuatro estanques de infiltración (**Figura 19**). Estos se operan en un ciclo de rutina de infiltración, secado, raspado y relleno (Zeelie, 2004).

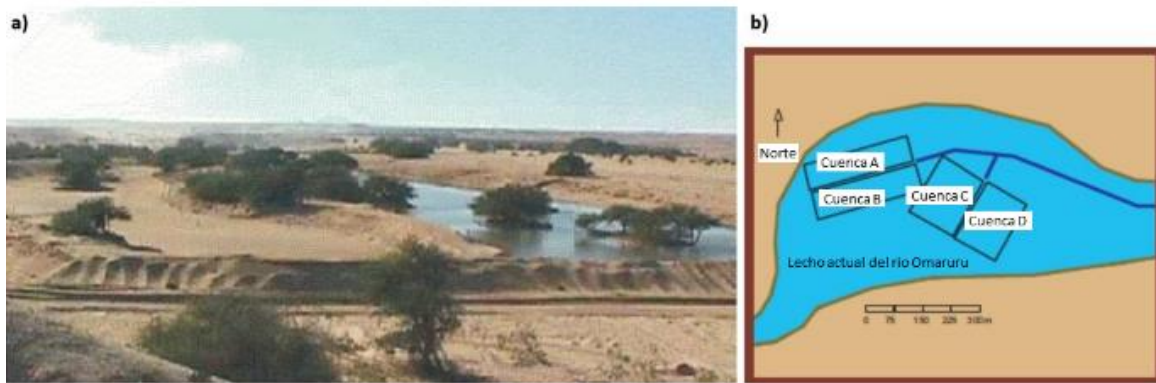


Figura 19 - a) Fotografía de dos cuencas de infiltración Omdel. b) Cuencas del mapa o del Omdel. (Zeelie, 2004).

Durante las inundaciones, la recarga artificial osciló entre el 52 y el 89 por ciento del flujo de agua superficial. A pesar de las inundaciones poco frecuentes, la infiltración a través de las cuencas aumentó la recarga anual de 5,8 a 7,9 Mm³/año y el rendimiento sostenible estimado aumentó de 2,8 a 4,6 Mm³/año (Mostert y Matengu, 2019). El costo de capital del proyecto fue de US\$ 16,8 millones, resultando en un costo unitario de agua muy favorable de US\$ 0,25/m³ (Water Scarcity Solutions, 2015).

Debido a las presiones de la demanda y la incertidumbre sobre el rendimiento sostenible, el acuífero se había operado con una extracción promedio de 6,3 Mm³/año desde la implementación de la recarga artificial. Esto resultó en una sobreexplotación, como se refleja en la disminución de los niveles de agua del acuífero. El gran almacenamiento del acuífero sostuvo el sistema y para un mejor acceso al almacenamiento disponible, se perforaron 17 pozos de producción adicionales durante este período.

4.6 Entorno de la Gestión de los Recursos Hídricos

4.6.1 Abastecimiento de Agua Enfoque Institucional

Namibia tiene un enfoque institucional de suministro de agua único. Para suministros más pequeños, se pide a las comunidades que se apropien de su infraestructura local financiando y realizando el mantenimiento de rutina con el apoyo de un oficial de extensión de agua rural. Para la mayoría de los centros urbanos con más de 2000 habitantes, una empresa estatal llamada Namibia Water Corporation (NamWater) asume algunas de las responsabilidades del Departamento Nacional de Asuntos Hídricos. NamWater extrae agua de los recursos subterráneos y superficiales a través de pozos y represas. El agua se vende a granel a las autoridades locales, como los municipios, que luego abastecen a los residentes. La comercialización del suministro de agua a granel mejoró la gestión al eliminar gradualmente los subsidios estatales e instituir la recuperación total de costos y la generación de fondos de inversión, así como una planificación flexible de las operaciones internas (financieras, de personal, técnicas) y externas (mercado libre) (GWP, 2009).

4.7 Evaluación y Camino a Seguir

Como resultado de casi duplicar el rendimiento sostenible del sistema Omdel por medio de RGA, se retrasó la construcción de un importante proyecto de capital, una planta desalinizadora de agua de mar (Water Scarcity Solutions, 2015).

La tasa de sedimentación del embalse es una preocupación importante. La remoción de sedimentos del embalse durante la estación seca no es económicamente viable, por lo que es importante reducir la tasa de sedimentación a través de prácticas mejoradas de manejo de cuencas. El pastoreo rotativo y la reducción de ganado durante los períodos secos pueden ser fundamentales para reducir la degradación de la tierra (Amwele et al., 2004).

En un país tan árido como Namibia, es imperativo buscar mecanismos innovadores para conservar el agua. El uso de agua subterránea representa el 38 por ciento de todo el uso de agua y el 60 por ciento de todo el uso urbano. Las principales minas en la región costera han dependido completamente del agua subterránea, aunque las nuevas plantas de desalinización han reducido la dependencia (Earthwise contributors, 2019). Los elementos de la gestión de la demanda de agua, por ejemplo, el uso en conjunto del agua y el uso de fuentes no convencionales, son desarrollados, implementados y bien aceptados por los tomadores de decisiones en Namibia. La gestión mejorada junto con la comercialización del suministro de agua a granel probablemente le está dando a Namibia una ventaja en este sentido. La planificación del plan del delta del Omaruru se benefició tanto de la investigación como de la experiencia práctica relacionada con el almacenamiento de agua en la arena que se obtuvo durante muchos años en Namibia. Para un servicio de agua sostenible en este entorno desafiante, la importancia de la capacidad técnica adecuada dentro del gobierno y el sector privado, además de la comprensión teórica de la gestión integrada de los recursos hídricos, no se puede dejar de enfatizar (GWP, 2009).

5 Caso de Estudio: Langebaan, Costa Oeste, Sudáfrica

5.1 La Necesidad de Recarga Artificial – Preparando el escenario

Langebaan se encuentra aproximadamente a 100 km al norte de Ciudad del Cabo, a lo largo de la costa oeste de Sudáfrica. El río Berg es el río perenne dominante en la región y desemboca en el océano Atlántico en dirección noroeste. El clima mediterráneo de la región (DWAF, 2008) tiene veranos cálidos y secos e inviernos fríos y húmedos, con una precipitación media anual de 310 a 400 mm. Las lluvias generalmente ocurren entre los meses de mayo a agosto. En la **Tabla 5** se proporciona un resumen del sistema Langebaan.

Tabla 5 - Sistema Langebaan.

Nombre del Sistema	Langebaan
Ubicación	Costa Oeste del Cabo, Sudáfrica
Lluvia anual promedio	310-400 mm/año
Fuente del agua	Agua de río en exceso y aguas residuales con tratamiento secundario
Tipo de acuífero	Acuífero sedimentario estratificado, libre y confinado, más acuífero en roca.
Uso final del agua	Uso industrial y doméstico
Tipo de recarga gestionada	Propuesto para ser una combinación de campos de infiltración y pozos de inyección.
Volumen promedio actual de agua recargada	Fase de prueba - 14 Mm ³ /año previsto
Volumen de agua recuperado	Aun en fase de prueba
Año de inicio	Todavía no ha comenzado – en prueba desde 2008/2009
Propietario/gestor del sistema	Ayuntamiento del Distrito de la Costa Oeste
Atributos únicos del sistema de RGA	Acuífero primario y secundario; la participación de un gran grupo de partes interesadas es esencial

5.1.1 La Planificación de los Recursos del Agua lleva a la RGA.

Las ciudades a lo largo de la costa oeste de Sudáfrica han luchado contra la escasez de agua debido a las condiciones climáticas de sequía extrema desde 2014. La estrategia regional de suministro de agua del Departamento Nacional de Asuntos Hídricos y Saneamiento preveía una reducción en la dependencia del agua superficial a través de la provisión de 14 Mm³ /año al sistema de abastecimiento de agua de los acuíferos locales.

El trabajo inicial (2008/2009) en esta área para probar la viabilidad de RGA por inyección fue financiado por el Departamento de Asuntos Hídricos y Saneamiento (entonces Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales). El trabajo de investigación reciente está financiado por la Comisión de Investigación del Agua y la implementación

está financiada por el municipio de Saldanha Bay. Este estudio de caso se basa en los informes del equipo del proyecto WRC.

La decisión de usar RGA se basó en estudios periódicos del sistema acuífero de Langebaan Road y los acuíferos costeros adyacentes en la costa oeste realizados por el Servicio Geológico y el Departamento de Asuntos Hídricos. Como resultado de esta obra, en Septiembre de 1976 se declaró el Área de Control de Aguas Subterráneas del Gobierno de Saldanha para proteger este recurso estratégico para el futuro uso urbano e industrial. Una investigación de 2008/2009 realizada por el CSIR (Consejo para la Investigación Científica e Industrial), realizada para el entonces Departamento de Asuntos Hídricos y Silvicultura, propuso buscar RGA en el campo de pozos ya establecido en Langebaan Road como parte de un conjunto de medidas adecuadas y apropiados esquemas de aumento del suministro de agua para la subregión basados en principios de sostenibilidad para la costa oeste (Seyler et al., 2016; Tredoux y Engelbrecht, 2009).

El campo de pozos de Langebaan Road ya se había iniciado para uno de los municipios locales, Saldanha Bay, a principios de la década de 1990. Cuenta con cuatro pozos de producción, autorizados para extraer 1,46 Mm³/año (4000 m³/d) según lo indicado por la Municipalidad Distrital de la Costa Oeste (2005). Los 14 Mm³/año planeados se cubrirían con el Sistema Acuífero de Langebaan Road, operado en conjunto con RGA y con el desarrollo de un campo de pozos en el Sistema Acuífero Elandsfontyn aún no explotado (**Figura 20**), según lo informado por el Ayuntamiento del Distrito de la Costa Oeste (2009). La estrategia proponía que para 2021 el exceso de escorrentía invernal del río Berg se almacenaría en el acuífero en los meses de invierno y se utilizaría en los meses de verano cuando la demanda de agua es mayor (DWS, 2016; Seyler et al., 2008).

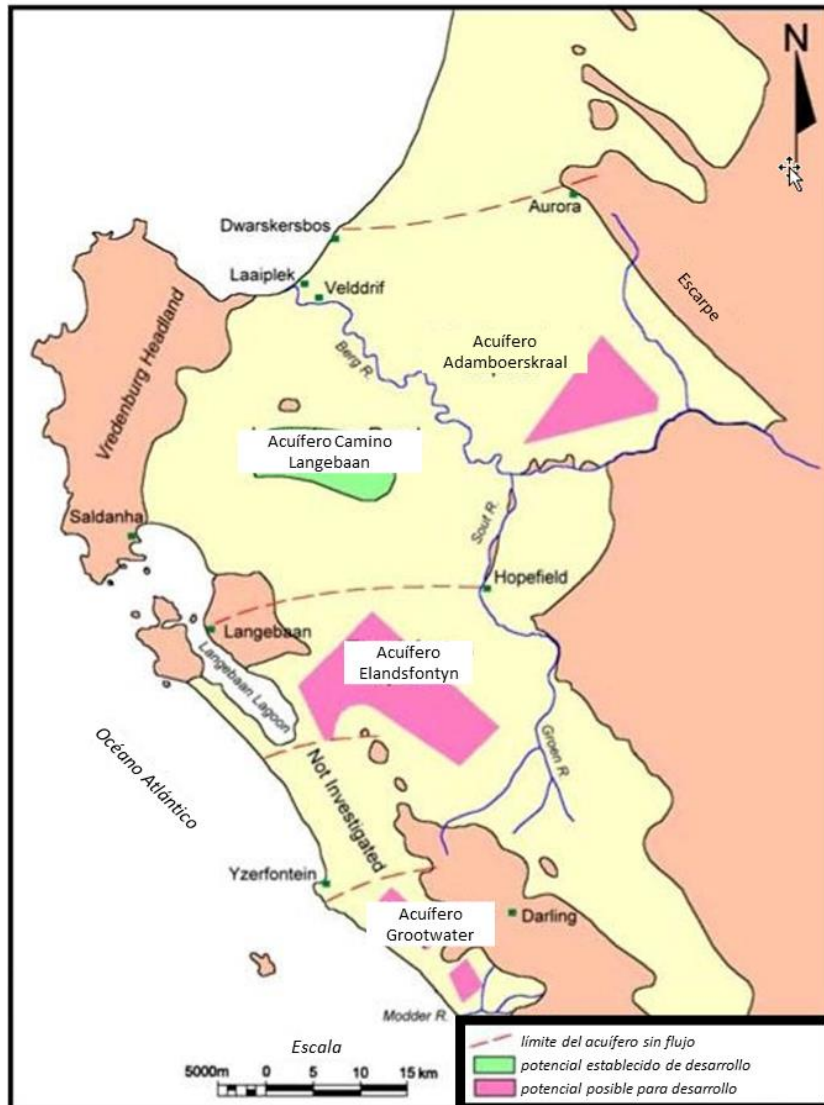


Figura 20 - Costa Oeste del Cabo, Sudáfrica, incluidos los sistemas acuíferos de Langebaan Road y Elandsfontyn (Du Plessis, 2009).

5.2 La Fuente del Agua

Las posibles fuentes de agua para el esquema fueron los volúmenes excesivos del río Berg durante la temporada de invierno y las aguas residuales con tratamiento secundario. Antes de la inyección/infiltración, se realizaron modelos y/o pruebas en la mezcla de aguas para determinar si era probable que se formaran precipitados minerales. El agua de origen de las aguas residuales requiere pruebas adicionales para compuestos orgánicos y productos farmacéuticos, que se sabe que ocurren en el área. Debido a que la composición del agua de la fuente puede variar significativamente de vez en cuando, sería necesario un monitoreo regular. También sería necesario evaluar si la interacción agua/roca altera la composición del agua infiltrada/inyectada dentro del acuífero y si el agua extraída requeriría tratamiento.

5.3 Hidráulica del Acuífero

La topografía está dominada por la geología subyacente (Seyler, et al., 2016), con dunas de arena a lo largo de las áreas costeras que alcanzan elevaciones de hasta 100 m, llanuras arenosas relativamente planas en la mayor parte del área interior, especialmente en la llanura aluvial del río Berg y plutones de granito intrusivo que forman colinas que alcanzan elevaciones de hasta 500 m en el área. Los usos predominantes de la tierra en el área de estudio son las tierras cultivadas (tierras secas), los matorrales y los fynbos bajos y altos (un bioma de la región costera del sur de Sudáfrica, caracterizado por una riqueza diversa de especies de plantas endémicas).

El área está compuesta por dos paleocanales: el paleocanal del norte de Langebaan y el paleocanal del sur de Elandsfontein (Woodford y Fortuin, 2003). Estos paleocanales coinciden con espesas secuencias sedimentarias portadoras de agua. Los sedimentos alcanzan un espesor de casi 80 m y se caracterizan por permeabilidades variables y capas semiconfinadas de turba y arcilla (Timmerman, 1985). Una arcilla de varios metros de espesor, que se extiende sobre una gran parte del área, separa efectivamente los sedimentos en un acuífero confinado y no confinado (Timmerman, 1988). Significativamente, la distribución de arcilla es discontinua y, en particular, al oeste de Hopefield, existe una "ventana de arcilla faltante". Las fracturas en el lecho rocoso de Malmesbury Shale o Cape Granite producen agua y, por lo tanto, el lecho rocoso en sí también se considera un acuífero (Seyler, 2016). La **Figura 21** presenta un modelo conceptual de este entorno acuífero desarrollado por Tredoux y Engelbrecht (2009), modificado por Jovanovic y otros (2019).

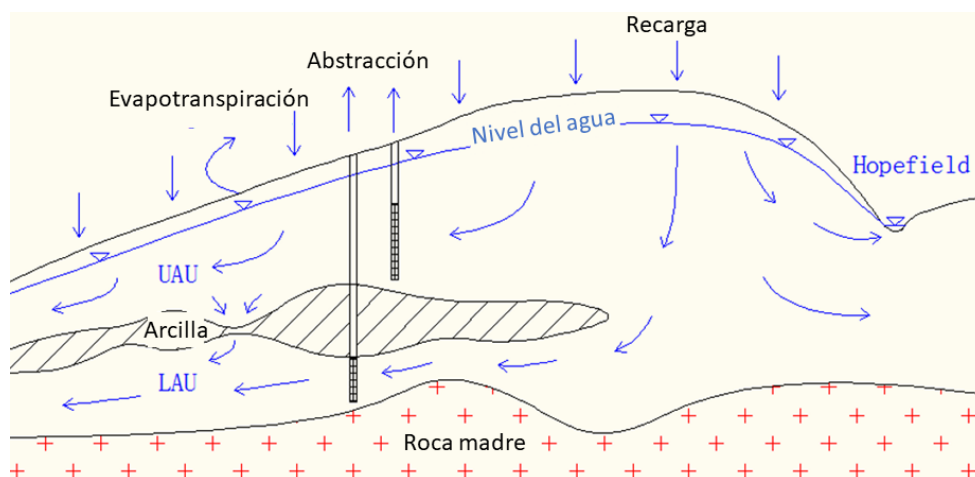


Figura 21 - Modelo conceptual de capas litológicas mostrando unidades de acuífero superior e inferior y arcilla discontinua (Jovanovic et al., 2019).

5.4 Calidad del Agua

Los tipos de agua dominantes en los acuíferos costeros son NaCl y CaHCO₃ (**Figura 22**). Hay una marcada diferencia en la salinidad entre las unidades del acuífero superior e inferior. En la unidad del acuífero inferior, la conductividad eléctrica suele ser inferior a

120 mS/m, mientras que en la unidad del acuífero superior suele ser > 250 mS/m y, a menudo, supera los 500 mS/m cerca del río Berg y la bahía de Saldanha.

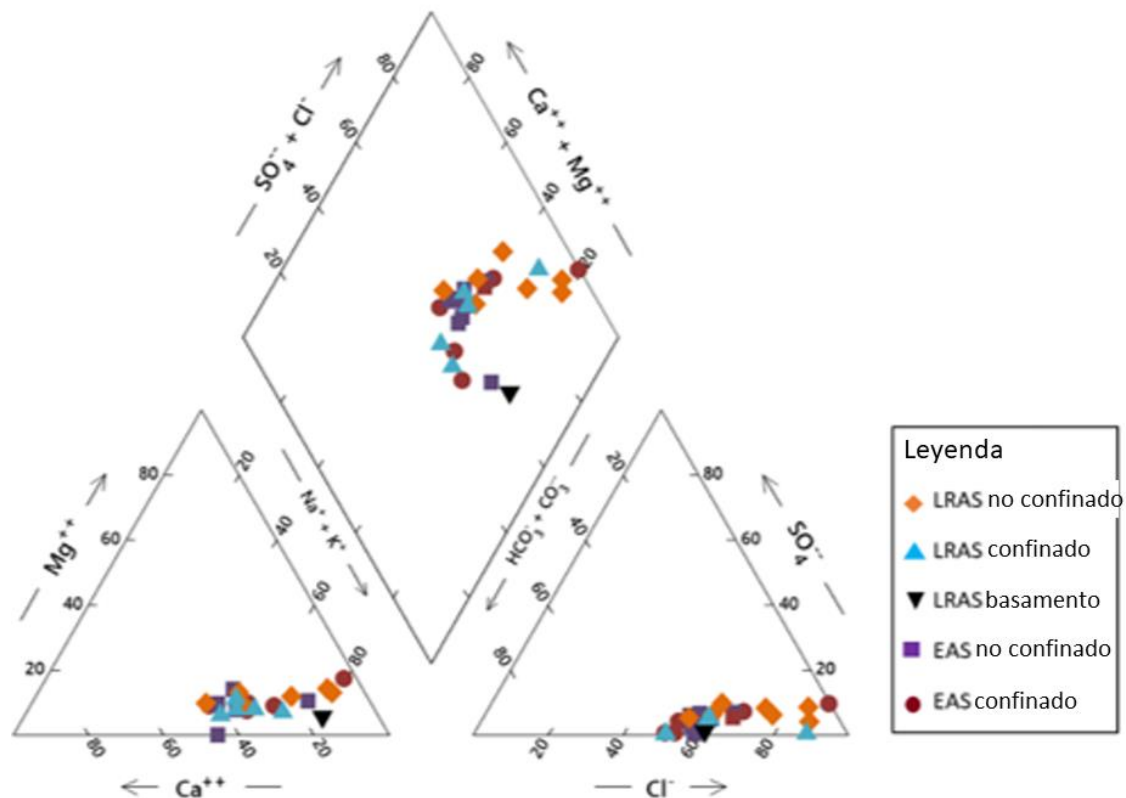


Figura 22 - Diagrama de piper trilineal para muestras de agua de la costa oeste recolectadas en 2017/2018. LRAS es el Sistema Acuífero Regional de Langebaan y EAS es el Sistema Acuífero Regional de Elandsfontyn (Jovanovic et al., 2018).

5.5 Elementos del Sistema

El esquema contiene dos campos de pozos, Langebaan Road y Elandsfontyn (**Figura 20**), ya conectados a la tubería de suministro de agua municipal. Con base en el modelado y las observaciones de campo, se construyeron pozos que forman parte de la extensión del campo de pozos de Langebaan para ser utilizados tanto para la extracción como para la inyección. El método de inyección de pozo (**Figura 23**) ya había sido probado en este acuífero, porque una parte clave del acuífero está confinada (Tredoux y Engelbrecht, 2009). El campo de pozos de Elandsfontyn es un campo de pozos nuevo y se requerirán pruebas de infiltración, ya que la infiltración puede ser más adecuada para esta área.



Figura 23 - Prueba de inyección de pozo en el acuífero de Langebaan Road (Weekend Cape Argus – 7.12.08).

Con base en los datos de un programa regional de monitoreo del nivel y la calidad del agua administrado por el Departamento Nacional de Agua y Saneamiento, se desarrolló un modelo para el área para ayudar a seleccionar técnicas y ubicaciones de RGA adecuadas. Se utilizó como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para interactuar con las partes interesadas sobre el progreso de la investigación y el potencial de implementación. Se presentaron a las partes interesadas cuatro escenarios, que involucraban una combinación de cuencas de inyección e infiltración (**Figura 24**).

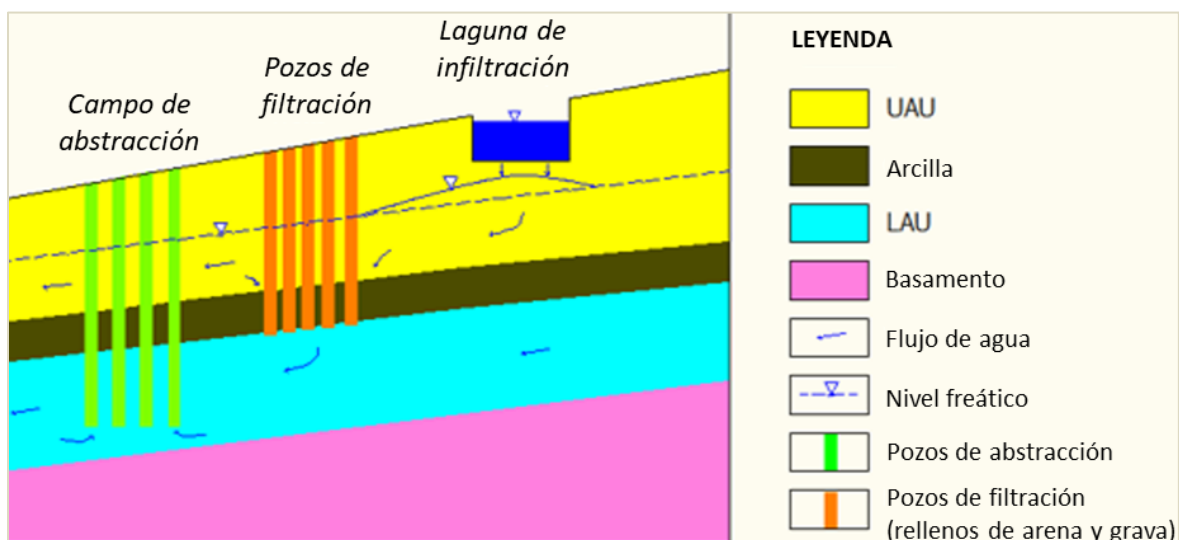


Figura 24 - Escenario para RGA que involucra cuencas de infiltración, pozos de fuga para facilitar el movimiento de agua desde las unidades de acuífero superior (UAU) a la inferior (LAU) y pozos de extracción en la LAU para la Costa Oeste del Cabo (Jovanovic et al., 2019).

5.5.1 Selección de los Sitios de Recarga

La investigación en el área indicó que los buenos datos hidrogeológicos combinados con un enfoque científico multidisciplinario para interpretar los datos son esenciales como precursores de la implementación real de RGA. Las pruebas de inyección anteriores (2008) dieron como resultado el desbordamiento de los pozos aguas abajo, por lo que no pudieron mantener el agua almacenada bajo tierra como se esperaba inicialmente. Mediante el uso de un enfoque de dos pasos que combina el análisis basado en GIS para una perspectiva espacial general con el modelado del flujo de agua subterránea, se demostró que solo un área relativamente pequeña del acuífero podría beneficiarse de la recarga del campo de pozos actual (Zhang et al., 2019).

Las principales recomendaciones de la nueva fase de investigación incluyen las siguientes (Jovanovic et al., 2019):

- es necesario fortalecer el monitoreo (incluidos los niveles y la química del agua) alrededor del área de la “ventana de arcilla faltante”, como se analiza en la Sección 5.3, “Hidráulica del acuífero”, ya que es el área de recarga natural de los acuíferos de Langebaan y Elandsfontyn;
- se necesitan perforaciones profundas en el área de la “ventana de arcilla faltante” para mejorar la comprensión de la distribución estratigráfica de la capa de arcilla y la conductividad hidráulica real alrededor de esta ventana, y la conectividad entre los acuíferos de Langebaan y Elandsfontyn;
- Es necesario completar un análisis más detallado de los registros de nivel de agua disponibles existentes para comprender mejor la conectividad hidráulica entre los dos acuíferos; y,
- monitoreo de niveles de agua, química del agua, potencial de obstrucción, así como pruebas de inyección para obtener los parámetros necesarios para la implementación de RGA.

5.6 Entorno de la Gestión de los Recursos Hídricos

Los municipios locales y distritales de la Costa Oeste del Cabo están trabajando juntos para explorar y estudiar el sistema de aguas subterráneas, comprenderlo e implementar con éxito esquemas sostenibles de suministro de agua. El enfoque adoptado en este proyecto de investigación e implementación de RGA se puede describir mejor como uno inclusivo que integra los elementos sociales y científicos de los recursos hídricos del sistema/región, en esencia, un enfoque integrado de gestión de los recursos hídricos.

5.6.1 Logrando la Participación de las Partes Interesadas

Incluso antes de considerar una RGA, el desarrollo del campo de pozos de Langebaan Road había demostrado que la participación estructurada en la gestión de estos recursos de aguas subterráneas locales era de importancia crítica y que el éxito no podía lograrse sin la cooperación entre todas las partes, en particular los diversos departamentos

gubernamentales. Todas estas partes interesadas participan de alguna manera en la toma de decisiones con respecto a la prueba, implementación y monitoreo de la RGA en las áreas de Langebaan y Elandsfontein. Un comité de monitoreo independiente se consideró de suma importancia para garantizar la gestión exitosa de un recurso de agua subterránea sostenible (du Plessis, 2009).

La participación de las partes interesadas complementó el componente de hidrociencias de la implementación. Para lograr el compromiso, se desarrolló un mapa de partes interesadas para identificar los vínculos entre las partes interesadas, obtener sus aportes al proyecto e involucrarlos aún más para identificar las dinámicas políticas, sociales, culturales y económicas emergentes relacionadas con el esquema de RGA. La variedad de partes interesadas (**Tabla 6**) identificadas de esta manera puede brindar una idea de la complejidad de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Tabla 6 - Partes Interesadas en el Sistema de Langebaan scheme.

Gobierno	Departamento Nacional de Obras Públicas; Departamento Nacional de Agua, Saneamiento y Asentamientos Humanos; Departamento Nacional de Medio Ambiente, Silvicultura y Pesca; SANParques; Fuerza de Defensa Nacional SA; Cabo Naturaleza; Departamento de Asuntos Ambientales y Planificación del Desarrollo de Western Cape; Departamento de Agricultura del Cabo Occidental; Oficina Regional de Agua, Saneamiento y Asentamientos Humanos de Western Cape; turismo de la costa oeste; Municipio del Distrito de la Costa Oeste; municipio local de Swartland; municipio local del río Berg; Municipio Local de la Bahía de Saldanha
Sociedad Civil y ONG's	Biosfera de la Costa Oeste; Foro de Calidad del Agua de la Bahía de Saldanha; Foro de Calidad del Agua de la Bahía de St Helena; el Parque de Fósiles de la Costa Oeste; Sociedad Botánica de la Costa Oeste; Birdlife SA
Investigación y Desarrollo	CSIR; Universidad del Cabo Occidental; Ancla Consultores Ambientales
Usuarios del Agua	Comités de distrito; Asociaciones de Agricultores en Hopefield y Vredendal; la Sociedad de Acuicultura en Langebaan; propietarios de tierras y propietarios de fincas; la Proto Asociación de Gestión de Cuencas de Berg-Olifants; juntas de riego de los ríos Berg y Wilge; minas; otros usuarios industriales; pequeños agricultores
Medios	Periódicos Swartland y Weslander

5.7 Evaluación y Camino a Seguir

Los municipios locales y distritales, junto con consultores locales y universidades, actualmente están realizando investigaciones y ejecutando escenarios. Lo más probable es que la gestión del esquema se lleve a cabo de la misma manera, con la municipalidad de Saldanha Bay y la Municipalidad del Distrito de la Costa Oeste asumiendo la propiedad del esquema y trabajando con instituciones locales y consultores con experiencia para monitorear y guiar la eficiencia y sostenibilidad del esquema. Aunque aún no se ha implementado, el enfoque adoptado con el desarrollo de la RGA en la Costa Oeste del Cabo ya puede brindar lecciones.

5.7.1 Un Enfoque de Implementación por Etapas

El área requiere un enfoque por etapas para la implementación de RGA que incluya lo siguiente:

- es necesario establecer el comportamiento de los campos de pozos de extracción recién perforados antes de probar las opciones de recarga artificial;
- se pueden comenzar a probar diferentes opciones después de que se hayan realizado las pruebas químicas del agua para evaluar la mezcla de las fuentes de agua subterránea y la composición final del agua;
- evaluar la idoneidad del área que ha sido identificada como un sitio potencial para la recarga artificial y considerar alternativas si es necesario;
- evaluar si las estimaciones preliminares de los principales requisitos de infraestructura son precisas y mejorar las estimaciones según sea necesario;
- realizar pruebas de infiltración antes de la construcción de la cuenca;
- evaluar si es necesario el tratamiento del agua final y diseñar el tratamiento si es necesario; y,
- supervisar los cambios en el pH, el potencial redox, la temperatura y las concentraciones de iones relevantes a lo largo del tiempo como señales de advertencia tempranas de obstrucción.

6 Caso de Estudio: Windhoek, Namibia

6.1 La Necesidad de una Recarga Artificial – Preparado el Escenario

Este caso de estudio se centra en la situación de los recursos hídricos en países áridos como Namibia, que se están acercando o han agotado los recursos hídricos convencionales. En estos casos, no hay más opción que utilizar y mejorar los recursos locales de agua subterránea. Los acuíferos de roca dura (una característica de la hidrogeología de África) y sus problemas relacionados con RGA proporcionan un enfoque adicional. En la **Tabla 7** se proporciona un resumen del sistema en Windhoek.

Tabla 7 - Sistema RGA de Windhoek.

Nombre del sistema	Sistema RGA de Windhoek
Localización	Ciudad de Windhoek, Namibia
Precipitación media anual	360 mm/año
Fuente de agua	Embalses de agua superficial
Tipo de acuífero	Cuarcita fracturada
Uso final del agua	Uso doméstico e industrial
Tipo de Gestión de Recarga de Acuífero	Inyección de pozo
Volumen medio actual de agua recargada	12 Mm ³ /año
Volumen de agua recuperada	19 Mm ³ /año durante la extracción por sequía
Año de inicio	2006
Propietario/administrador del sistema	Ciudad de Windhoek junto con Namibia Water Corporation (NamWater)
Atributos únicos del sistema RGA	Inyección de pozos profundos a gran escala en un acuífero de roca dura; almacenamiento de acuífero utilizado como ‘depósito de agua’, cubriendo hasta 3 años de suministro de agua de la ciudad durante ciclo de sequía.

Namibia está ubicada a lo largo de la árida costa suroeste de África. La capital, Windhoek (población 326,000 en 2011), está situada en una región semiárida del altiplano central del país (**Figura 25**). La precipitación media anual en Windhoek es 360 mm y la evaporación promedio es 2170 mm/año. Los sistemas fluviales que se originan en las cordilleras Auas y Eros drenan lejos de la ciudad en todas las direcciones. Como resultado, los recursos hídricos superficiales son muy limitados y la mayor parte del suministro de agua de la ciudad se obtiene de embalses ubicados a decenas o cientos de kilómetros de la ciudad. Las grandes fluctuaciones de las precipitaciones anuales empeoran la situación (Kirchner and van Wyk, 2001; Murray, 2017).

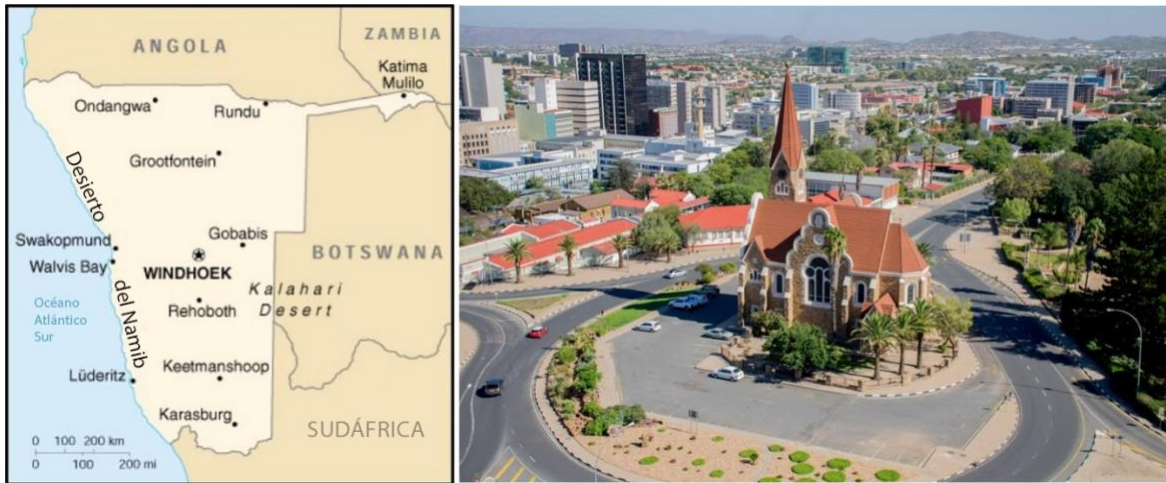


Figura 25 - El centro de la ciudad Windhoek y las montañas al fondo (Pixabay [↗](#)).

Windhoek debe su existencia a la presencia de manantiales, que proporcionaron un amplio suministro de agua cuando el área fue colonizada por primera vez alrededor de 1840. La mayoría de las fuentes termales emergieron de fallas profundas en cuarcitas que forman el acuífero principal. La ciudad continuó dependiendo del agua subterránea y en 1911 se inició el desarrollo de pozos. En 1933 se adicionó una pequeña presa de almacenamiento superficial. Como resultado del uso excesivo del acuífero, se agregó otra presa de almacenamiento superficial, ubicada más lejos. Entre los años 1966 y 1969, el uso del acuífero había aumentado a 2.5 veces la recarga natural promedio estimada de 1.7 Mm³/año, por lo que el desarrollo de fuentes de agua suplementarias se volvió urgente (Murray, 2017; Kirchner and van Wyk, 2001).

6.1.1 Opciones de Aumento en un País con Escasez de Agua

En 1974 un nuevo plan maestro de agua incluía un Colector de Agua Nacional del Este (Eastern National Water Carrier en inglés) para suministrar agua a las áreas centrales desde el Rio Okavango, a unos 750 kilómetros al norte. La construcción de colector comenzó a finales de la década de 1970 en varias fases. Primero, se construyeron 94 kilómetros de tubería desde la presa Von-Bach en Okahandja hasta la presa Omatoko. Desde allí se construyó un canal abierto de aproximadamente 300 km hasta Grootfontein y se bombeó agua subterránea de la mina Berg Aukas al canal. La fase final del Colector de Agua Nacional del Este, que conecta Grootfontein con el río Okavango River cerca de Rundu, nunca se construyó. Sin embargo, la información más reciente indica que debido a la actual sequía, una tubería desde Rundu a Grootfontein, se está considerando de nuevo para aumentar el suministro de agua a las áreas centrales de Namibia (Weidlich, 2019).

Para el año 2000, la demanda de agua era de 20 Mm³/año y la mayor parte del agua de la ciudad provenía del sistema de suministro de agua superficial que constaba de tres presas interconectadas como se analiza en la Sección 3 “La Fuente de Agua”. La contribución de los campos de pozos fue alrededor del 10 por ciento del suministro total de agua de la ciudad y otro 10 por ciento provenía de la recuperación de aguas residuales.

En 1968, los titulares de los periódicos sudafricanos decían: “Windhoek bebe aguas residuales.” Tras los estudios piloto de principios de la década de 1960s sobre la reutilización directa de aguas residuales, se construyó una planta completa en 1968. En 2001, se construyó la Nueva Planta de Reutilización de Goreangab con capacidad de 7.7 Mm³/año, que fue una de las más grandes de su tipo en el mundo en esa época. Windhoek se había convertido en una de las primeras ciudades del mundo en introducir el reciclaje directo de efluentes para beber (du Pisanie, 2007).

Una importante medida de gestión de la demanda de agua ha sido el uso de aguas residuales para el riego restringido de campos deportivos, parques y cementerios de la ciudad. Desde 2002, la Nueva Planta de Reutilización de Goreangab suministra agua de mejor calidad para riego sin restricciones. En 2002 se produjeron aproximadamente 1.4 Mm³ para riego y se espera que el suministro de este sistema aumente aún más. (van Rensburg, 2006).

Aun así, Windhoek estaba agotando rápidamente los recursos hídricos disponibles y la atención se centró en RGA. De 1997 a 1998, se realizaron cuatro pruebas de inyección en el Acuífero de Windhoek y un estudio de viabilidad económica realizado por la ciudad indicó que la recarga artificial era la opción más viable para aumentar el suministro. En 2002, se llevó a cabo la construcción de la primera etapa del sistema. Este incluyó seis pozos de inyección con una capacidad de recarga combinada de 10,000 m³/día (Murray et al., 2018).

La inyección real comenzó en 2006 y continuó hasta 2012 cuando el área de recarga identificada no pudo recibir más agua. El éxito del sistema llevó a dos fases de expansión y una tercera planificada para 2017. Esto incluyó la perforación de nuevos pozos profundos de hasta 500 m de profundidad con fines de extracción. El objetivo es utilizar la mayor cantidad posible de almacenamiento del acuífero (como depósito de agua), ya que esto mejorará significativamente la seguridad del suministro de agua de la ciudad (Murray, 2017; Murray et al., 2018).

El costo de todo el sistema RGA (a partir de 2016) se estima en US\$ 52.4 millones, incluyendo la ubicación de los pozos, la perforación y las pruebas, la instalación de bombas de pozos, las estaciones de bombeo de suministro a granel, las tuberías y la infraestructura de suministro de energía. La ciudad de Windhoek ha gastado más de US\$ 8.4 millones en el sistema, y está buscando financiar US\$ 9.6 millones adicionales que deberán obtener externamente (Murray, 2017).

6.1.2 La Oportunidad de RGA

Una comparación de costos de 2013 realizada por el ingeniero de la ciudad de Windhoek (**Figura 26**) muestra que las alternativas disponibles – el acuífero Tsumeb (450 km al norte) y el oleoducto del río Okavango (700 km al norte) – son 1.9 y 2.7 veces más costosas que la opción RGA. RGA es 1.8 veces más costosa que reciclar las aguas residuales de Windhoek para convertirlas en agua potable. El ingeniero de la ciudad

finalizo la presentación sobre la Gestión de Recarga del Acuífero de Windhoek con una cita (Peters, 2014):

“Nos enfrentamos a una serie de grandes oportunidades brillantemente disfrazadas de situaciones imposibles” (adaptado de Charles Swindoll).

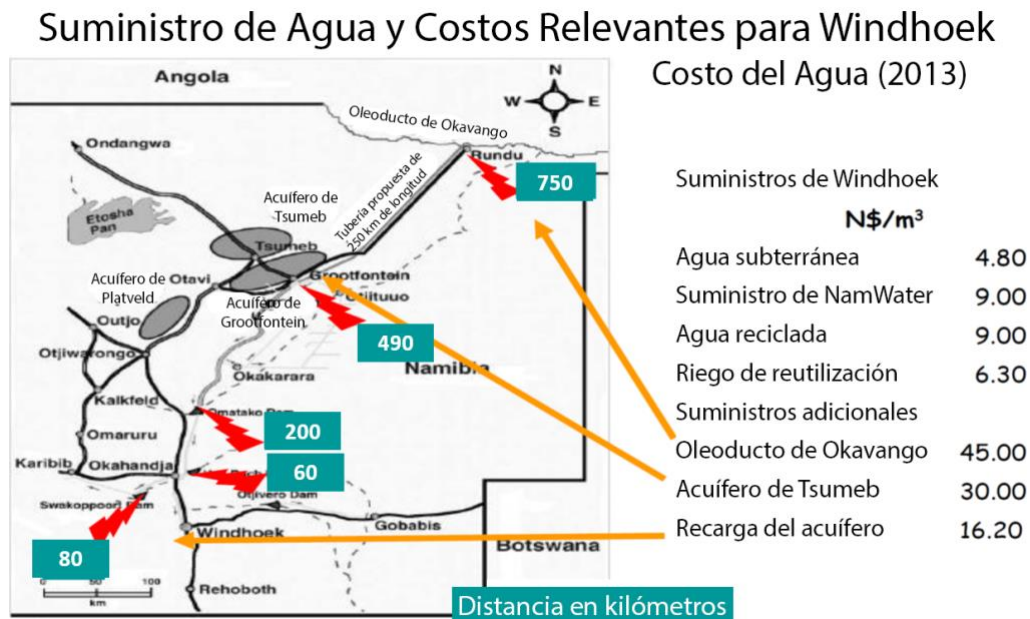


Figura 26 - Ubicaciones del suministro de agua de Windhoek y una comparación de costos reciente (Peters, 2014).

6.2 Hidráulica del Acuífero

El acuífero de Windhoek se encuentra al sur de la ciudad, extendiéndose hacia el norte desde las montañas Auas de 20 a 25 km hasta el centro de la ciudad. Para que RGA tenga éxito, se necesita un acuífero que permita un fácil acceso a una capacidad relativamente grande.

6.2.1 Condiciones Favorables en Acuíferos de Roca Dura

Mientras que la roca que conforma el acuífero de Windhoek consiste principalmente en cuarcita sin porosidad primaria, la porosidad secundaria está presente en el acuífero por varias razones. Las formaciones geológicas en el área se plegaron en el proceso de orogénesis y se sometieron a una serie de episodios de fallas que incluyen empujes y fisuras. Los horizontes de cuarcita y esquisto con fallas transversales y fracturas prevalecen en todo el acuífero. La cuarcita, al ser frágil, está muy fracturada debido al plegamiento y las fallas y ha desarrollado una porosidad secundaria. El esquisto, por otro lado, es dúctil y no tiene una permeabilidad secundaria bien desarrollada. Por lo tanto, la cuarcita fracturada tiene una mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen comparada con un volumen igual de esquisto fracturado. (Murray & Redox, 2002; Redox et al., 2009).

Los valores de transmisividad obtenidos de los pozos de sondeo de mayor rendimiento oscilan entre 100 y 1000 m²/d para el componente de flujo de fractura de tiempo temprano de las pruebas de bombeo de caudal constante; las transmisividades tardías, que reflejan la permeabilidad de la red de microfracturas, oscilan entre 50 y 350 m²/d (Murray, 2002). Una prueba de rastreo entre dos pozos ubicados aproximadamente 800 m de distancia a lo largo de una zona de falla de alta permeabilidad estableció una velocidad de flujo sorprendentemente rápida de 216 m/hora, lo que sugiere una baja porosidad efectiva. Los coeficientes de almacenamiento reflejan la naturaleza confinada del acuífero: con cuarcitas puras del orden de 0.009 a 0.010, cuarcitas micáceas que van desde 0.005 a 0.008 y esquistos con un valor de aproximadamente 0.001 (Murray, 2002).

Hidrogeológicamente, el acuífero se puede dividir en tres unidades principales de permeabilidad decreciente: cuarcita, cuarcita micácea y esquisto. La dirección de flujo de agua subterránea dominante es hacia el norte desde las cuarcitas de las montañas al sur de la ciudad hacia la ciudad que está situada sobre esquistos (**Figura 27**). El flujo sigue caminos preferenciales a lo largo de numerosas fallas y zonas de fractura que atraviesan el área. El acuífero está delimitado por formaciones impermeables por todos los lados. (Tredoux et al., 2009c; Murray, 2017).

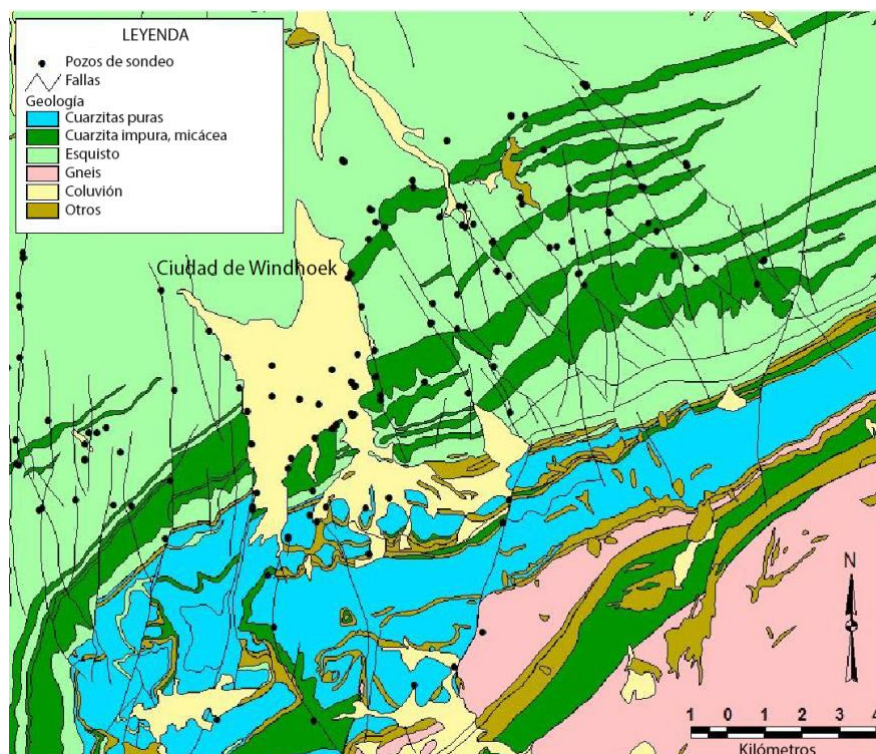
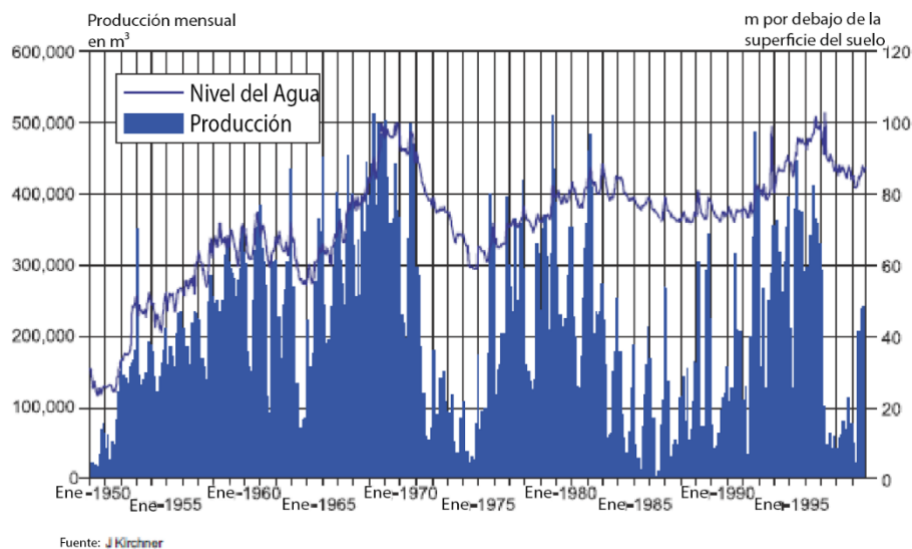


Figura 27 - Geología simplificada del acuífero de Windhoek (Murray, 2002).

6.2.2 Sobreexplotación del Almacenamiento del Acuífero

Desde el inicio de la extracción a gran escala del acuífero de Windhoek en la década de 1950, en particular durante periodos prolongados de sequía, los niveles de agua se han reducido decenas de metros. Incluso después de cinco años de periodo de descanso (por ejemplo, de 1970 a 1975), los niveles de agua no volvieron a sus niveles originales (**Figura 28**). El acuífero efectivamente había sido sobreexplotado o ‘minado’. Durante algunos periodos de alta extracción, los niveles de agua casi volverían a los niveles previos a la extracción más de una década después del evento, pero luego se producirían periodos de mayor demanda. En 2002, el volumen de agua extraído del almacenamiento desde 1950 se estimó en 28 Mm³. Este almacenamiento disponible presento una gran oportunidad para la recarga artificial. (Murray et al., 2018).



Fuente: J Kirchner
Figura 28 - Tasas de producción y niveles de agua en el acuífero de Windhoek (Kirchner and van Wyk, 2001).

6.3 La Fuente del Agua

La fuente de agua para inyectar en el acuífero de Windhoek (**Figura 29**) es agua de la presa tratada más aguas residuales recicladas.



Figura 29 - Sitio del pozo de inyección indicando la Fuente de agua (Murray, 2017).

La principal Fuente de suministro de agua de Windhoek es el Colector de Agua Nacional del Este, una tubería que conecta la presa Omatako en el norte y la presa Swakoppoort en el oeste con la presa Von Bach ubicada en el área central (**Figura 30**).

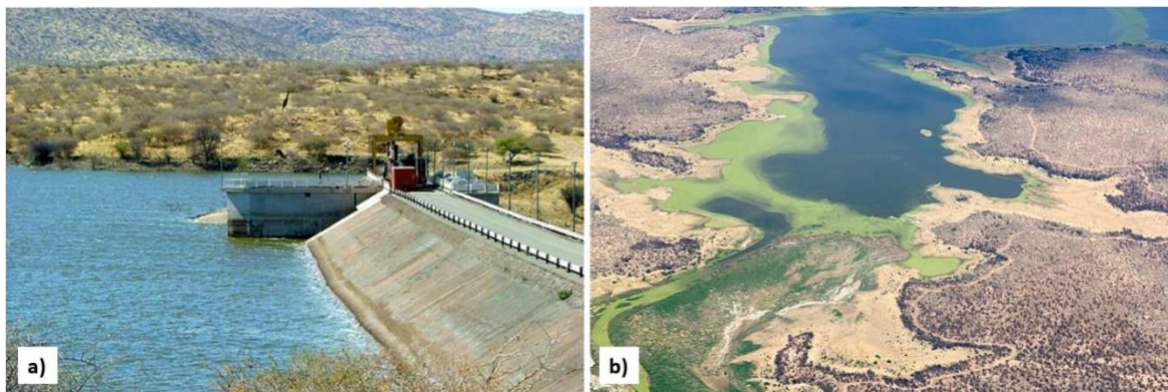


Figura 30 - a) Presa Von Bach, Foto de Menges, 2020 en [The Namibian](#). b) Presa [Swakoppoort](#), Foto de Baumeler, 2017.

En 2005, la demanda de 21 Mm³/año fue cubierta por: 1 Mm³ de pozos, 5 Mm³ de la Nueva Planta de Reutilización de Agua de Goreangab (**Figura 31**), y 15 Mm³ de agua superficial en embalses (van Rensburg, 2006). El proceso de recuperación está basado en el concepto de barreras de tratamiento múltiple para reducir los riesgos asociados y mejorar la calidad del agua. Este incluye preozonación, coagulación mejorada/flotación por aire disuelto/filtración rápida en arena, y ozonización posterior, carbón activado biológico y granular, filtración/adsorción, ultrafiltración, y cloración (van Rensburg, 2006; du Pisanie, 2007).



Figura 31 - Nueva Planta de Recuperación de Agua de Goreangab (van Rensburg, 2006).

6.4 Calidad del Agua

Si bien la calidad de agua de la Planta de Tratamiento de Agua de la presa Von Bach tiene baja salinidad (como lo indica la conductividad eléctrica) y constituyentes inorgánicos, la concentración de carbono orgánico disuelto es muy alta. Por lo tanto, es esencial un tratamiento adicional. El agua superficial/embalsada se mezcla con agua reciclada en una porción de 3:1 y se trata adicionalmente mediante filtración de carbón activado granular y cloración (**Figura 32**) para reducir la concentración de carbón orgánico disuelto y minimizar potencial crecimiento de bacterias en el acuífero. (Tredoux et al., 2009c; Murray et al., 2018).



Figura 32 - Tratamiento final de la Fuente agua (Murray, 2017).

6.4.1 Principios Guía para la Calidad del Agua Inyectada Directamente en el Acuífero

Como el agua de recarga se inyecta directamente en el acuífero sin filtrarse a través de la zona no saturada, se concluyó que la calidad de agua de inyección debe cumplir con los requisitos de agua potable. Se establecieron los siguientes principios guía para inyectar recarga (Tredoux et al., 2009c):

- ningún impacto ambiental negativo;
- uso sostenible del agua del acuífero de Windhoek para fines de agua potable, preferiblemente sin tratamiento o como máximo un tratamiento limitado, como estabilización y desinfección;
- el agua de recarga debe cumplir con los estándares modernos de agua potable;
- ningún riesgo adicional de salud para los residentes de Windhoek en comparación con las fuentes utilizadas en 2004;
- no deberían surgir problemas técnicos debido a la calidad del agua de inyección, como obstrucciones, corrosión y/o demanda de un tratamiento extenso antes de la distribución; y,
- aceptar un deterioro de ciertos parámetros de calidad del agua en el acuífero, siempre que la calidad de agua después de ser extraída cumpla con las pautas aceptables de calidad del agua.
- Los aspectos de la calidad del acuífero que influyeron en la decisión sobre el pretratamiento del agua inyectada se abordan brevemente a continuación. (Tredoux et al., 2009c).
- *Salinidad:* En la mayor parte del acuífero se encuentra agua de baja salinidad. El agua subterránea en las cuarcitas de la Formación Auas generalmente tiene una concentración muy baja de cloruro de 4 a 10 mg/L, aumentando hasta un máximo de ~60 mg/L en el agua caliente de circulación profunda que sale en el centro de la ciudad, lo que refleja el largo periodo de residencia en profundidad.
- *Sulfatos:* A través del acuífero que encuentran altas concentraciones de sulfatos debido al sulfato de hierro en forma de pirita en las rocas huésped del Acuífero de Windhoek. El oxígeno disuelto que ingresa al acuífero con el agua de lluvia durante la recarga natural oxida de sulfuro a sulfato. De esta forma, se genera sulfatos en el acuífero hasta que se agota el oxígeno disuelto. En condiciones naturales, el agua subterránea alcanza fácilmente concentraciones de sulfato de 200 a 300 mg/L. En áreas donde el suelo ha sido alterado, como en áreas residenciales, las concentraciones de sulfato aumentan a medida que más pirita se expone al oxígeno que ingresa al acuífero con el agua de lluvia.
- *Hierro y manganeso:* El hierro es omnipresente en las aguas subterráneas en el acuífero de Windhoek. De manera similar, el manganeso está presente en el acuífero, que también es movilizado por cambios en el potencial redox (óxido-reducción) en el acuífero. Como resultado, la obstrucción del pozo es una posibilidad. El seguimiento

de las diferentes especies de hierro será importante para comprender mejor el potencial de obstrucción.

- *Arsénico*: Las interacciones fluido-roca en algunos sistemas RGA han liberado arsénico y metales en las aguas recargadas causando un deterioro inaceptable en la calidad del agua. Las concentraciones de arsénico en el acuífero de Windhoek son generalmente muy bajas y cercanas al límite de detección de 0.005 mg/L. La concentración más alta de 0.013 mg/L ocurre en aguas subterráneas asociadas con fallas mineralizadas en los esquistos en la parte más al norte del acuífero en una zona de temperaturas significativamente más altas. El depósito de agua está localizado lejos de esas áreas esquistosas de baja permeabilidad con concentraciones de arsénico ligeramente elevadas. Por lo tanto, se considera muy poco probable que se excedan los niveles de referencia de arsénico debido a las operaciones del RGA, y el monitoreo continuo lo confirma.
- *Temperaturas del agua*: Es poco probable la inquietud acerca del potencial de obstáculo debido a las diferencias de temperatura entre el agua inyectada y el agua del acuífero sea un problema significativo. Los pozos de inyección están ubicados en las cuarcitas puras y micáceas donde las temperaturas oscilan entre 25 y 30 °C, similar a las temperaturas de la inyección. (Murray et al., 2018).
- *Carbono orgánico disuelto*: La concentración de carbono orgánico disuelto (COD) en el acuífero es muy baja, con valores generalmente <1 mg/L, excepto en áreas contaminadas como el vertedero de desechos y pozos poco profundos en el esquistos (Murray, 2002).

6.4.2 Preocupaciones Especiales sobre la Calidad del Agua Asociadas con la Inyección de Pozos

A partir de los datos disponibles, parecería que los cambios en el potencial de oxidación-reducción en el subsuelo podrían ser el factor principal que afecta el entorno hidroquímico del acuífero de Windhoek. Los cambios importantes en la salinidad y el sulfato se asociaron con las pruebas de inyección a escala piloto, pero dichos cambios se deben a variaciones en el régimen de extracción debido a las fluctuaciones del nivel de agua en el acuífero. La intensidad de los efectos dependerá de la técnica de recarga, el método y el régimen de extracción. La inyección a través de un pozo profundo será la técnica preferida, ya que la cascada del agua a través de la zona no saturada exacerbará cualquier reacción adversa, como la oxidación de la pirita. (Tredoux et al., 2009).

La gestión de la calidad de agua de inyección de acuerdo con los criterios establecidos debe mantener la alta calidad de agua almacenada en el acuífero. Hasta la fecha, el agua reciclada ha tenido una salinidad promedio de 91 mS/m o 610 mg/L SDT y un promedio de carbono orgánico disuelto de 1.1 mg/L (Murray, 2017). El modelado de transporte de masas se considera esencial para determinar el impacto a largo plazo del agua inyectada en la calidad del agua del acuífero. (Tredoux et al., 2009).

Deberá prestarse especial atención a la protección del acuífero contra todas las formas de contaminación. La amenaza se ilustra a través del sitio de eliminación de desechos de Kupferberg en la parte suroeste del acuífero. Esta zona tiene concentraciones elevadas de cloruro, sulfato, compuestos orgánicos y hierro. Una vez que la recarga artificial esté en pleno funcionamiento, el nivel de agua aumentará y la necesidad de protección seguirá aumentando (Tredoux et al., 2009, Mapani, 2005).

6.5 Elementos del Sistema

La inyección de pozos es la técnica preferida para aplicar la recarga del acuífero gestionada en Windhoek. Con el fin de establecer la factibilidad de recargar este complejo Sistema acuífero, se estudió en detalle para determinar las características y límites del flujo. Se llevaron a cabo cuatro pruebas de inyección en pozos, tanto en cuarcitas puras como micáceas entre 1997 y 1999. A pesar de las diferentes características hidráulicas entre las dos formaciones de cuarcitas que están influenciadas tanto por las rutas de flujo preferencial como por las barreras de flujo, en total se recargaron con éxito 0.5 Mm³ (Murray et al., 2018).

El éxito de las pruebas de inyección mostró que la RGA tenía el potencial de optimizar los recursos disponibles en el área al inyectar los excesos de agua de los tres embalses superficiales en el acuífero para su uso en tiempo de escasez. Las pruebas de inyección y los datos históricos del nivel del agua mostraron que la recarga artificial debe enfocarse en las áreas de pozos existentes (las cuarcitas micáceas) y la principal área natural de recarga y área de almacenamiento (las cuarcitas puras). Esto utilizaría tanto espacio de almacenamiento disponible del acuífero como sea posible, como se muestra en la **Figura 33** (Murray, 2017).

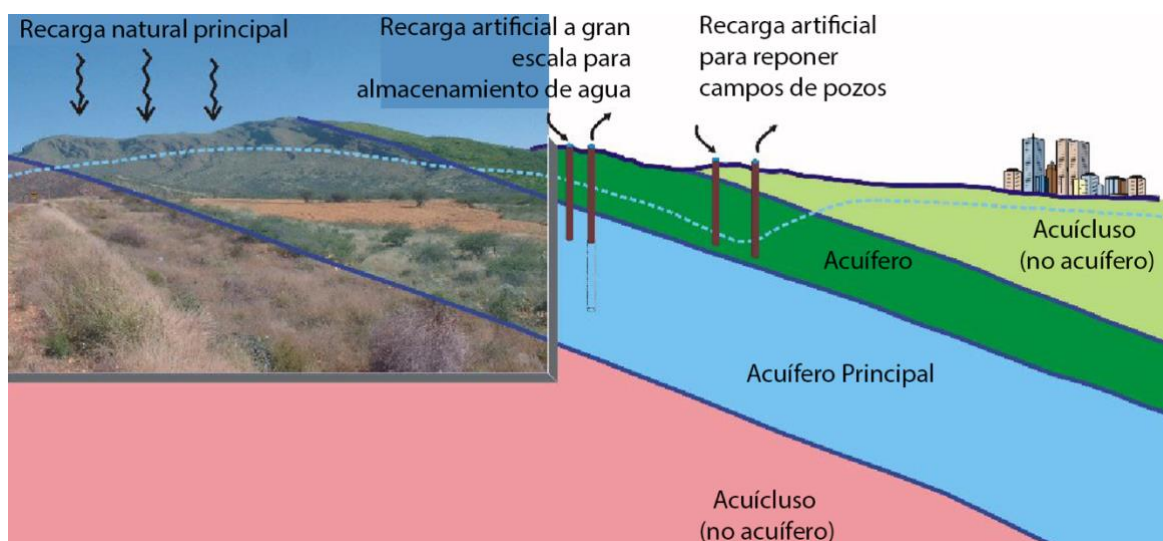


Figura 33 - Esquema de las principales litologías y áreas de inyección (Murray, 2017).

La RGA se desarrolló en etapas. La inyección de pozos comenzó en 2006 y continuó hasta 2012 cuando el área objetivo de recarga no pudo recibir más agua. La primera etapa incluyó seis pozos de inyección con una capacidad de recarga combinada 10,000 m³/día. El éxito del sistema se llevó a dos fases de expansión con una tercera planificada para 2017.

La primera fase de expansión resultó en la perforación de 10 pozos de recarga adicionales con una capacidad de inyección combinada de 16,000 m³/día, lo cual equivale al 40 por ciento de las necesidades anuales de agua de la ciudad, en comparación con el 10 por ciento logrado mediante el sistema de extracción de pozos anterior. Para permitir la extracción de esta agua cuando sea necesario, se perforaron 10 pozos “profundos” de extracción con una capacidad de recuperación de 18,000 m³/día. La segunda fase de perforación se complementará en junio de 2017. Se han perforado once de los 12 pozos “profundos” de extracción y sus capacidades de extracción varían hasta 3,600 m³/día (Murray et al., 2018).

6.5.1 Beneficios del Sistema RGA de Windhoek

El ingeniero de la ciudad de Windhoek describió los beneficios del sistema durante una entrevista en 2004 (van Rensburg, 2006):

- Reducirá las pérdidas por evaporación al depositar agua bajo la tierra en los años en que hay un excedente de escorrentía hacia las presas de almacenamiento de superficie que de otro modo se habrían evaporado, aumentando efectivamente el rendimiento de los embalses;
- Se estima que con el uso de pozos profundos (400 a 500 m de profundidad) en el acuífero de Windhoek habrá un “depósito” de al menos 100 Mm³ disponible para extracción en años de escasez de agua que se pueden reponer nuevamente en años de abundancia; y,
- Tener un gran depósito de agua disponible en el punto de consumo permite satisfacer la demanda pico del acuífero, por lo tanto, los sistemas de suministro a granel de gran capacidad de NamWater, que atraviesan cientos de kilómetros, no tendrán que diseñarse para abastecer la demanda máxima, sino solo la demanda promedio, lo que producirá un ahorro sustancial de costos.

La planificación e implementación continúan. La mayor estimación del depósito de agua es 90 Mm³ o aproximadamente tres veces el uso de agua actual anual. En esta etapa, los pozos existentes no pueden acceder a toda el agua y se están perforando nuevos pozos profundos. Se establecieron los siguientes objetivos:

aumentar la recarga a 12 Mm³/año para el 2019;
 equipar pozos para la extracción por sequía de 19 Mm³/año a partir de 2019; y,
 aumentar la capacidad del almacenamiento de depósito de agua de 41 Mm³ a 71 Mm³/año después de finalizadas las perforaciones y estructuras de 2018 a 2019 (Murray, 2017).

6.6 Entorno de la Gestión de los Recursos Hídricos

Windhoek es una ciudad que no tiene el lujo de tener cuerpos de agua dulce permanentes en las proximidades. En consecuencia, se ha comprometido con la integración de todas las dimensiones de la gestión integrada de los recursos hídricos para asegurar el suministro de agua a la ciudad (van Rensburg, 2006). En particular, la ciudad introdujo la gestión de la demanda de agua en 1992, mientras que las autoridades del agua anteriores habían seguido una política de suministro ilimitado de agua a bajo costo para el consumidor. La estrategia de gestión de la demanda se concentra en cambiar los hábitos de los consumidores aumentando conciencia pública sobre la importancia del ahorro de agua e implementando un sistema de tarifas que aumente considerablemente los costos en el aumento del consumo de agua. Otras medidas incluyen la reducción del tamaño de las parcelas residenciales, la implementación de legislación para abordar la conservación del agua en Windhoek, y mejorar las medidas técnicas y de mantenimiento para reducir las fugas. La evidencia del éxito de la gestión de la demanda de agua es la notable reducción en el consumo de agua a finales de la década de 1990. En 1997, el uso total de agua fue equivalente al de 1990, a pesar de un aumento del 45 por ciento de la población (Kirchner y van Wyk, 2001; van Rensburg, 2006).

La dependencia de las fuentes locales de aguas subterráneas tiene una historia en Namibia y ha ayudado enormemente a hacer realidad el complejo sistema RGA. El uso conjunto ya se practicaba antes de RGA, después de que se añadieran los almacenamientos de agua superficial mucho menos fiables. Las presas se usaron durante periodos de abundancia y el acuífero durante las sequías. También existía la oportunidad de invertir regularmente en la perforación y expansión del campo de pozos durante periodos de abundancia (Kirchner, 1981). El almacenamiento de agua superficial bajo tierra podría verse como un siguiente paso lógico.

6.6.1 Modelo de Financiamiento para el sistema RGA

Financiar la operación del sistema RGA, para el cual no había precedentes, planteó nuevos desafíos y se desarrolló un modelo único:

- la Fuente de agua, obtenida principalmente del sistema de suministro de tres presas, se compra a la autoridad de suministro NamWater y se vende al municipio para su almacenamiento en el acuífero municipal;
- la ciudad de Windhoek paga a NamWater los costos operativos de la recarga de agua para que NamWater recupere los costos de la recarga de agua, pero no obtiene ganancias del agua que vende al municipio para almacenarla en el acuífero de Windhoek;
- solo se obtiene una ganancia cuando se considera que el agua recargada artificialmente está siendo suministrada por la ciudad de Windhoek a los consumidores, momento en el cual la ciudad paga a NamWater un valor adicional por cada metro cúbico de agua que la ciudad suministra del acuífero de Windhoek;

- la evaluación de si la ciudad está suministrando agua recargada artificialmente se evalúa anualmente y se vuelve aplicable solo si se extrae más agua del acuífero en un año determinado que la tasa de recarga natural promedio del acuífero, el “rendimiento seguro” acordado de 1.73 Mm³/año;
- el plan beneficia tanto a las organizaciones como a los consumidores, ya que mejora la seguridad del suministro durante prologados periodos de sequía y proporciona ingresos a NamWater durante las sequías (cuando venden menos agua); y,
- se puede argumentar que el agua de bajo valor, que se habría evaporado de las presas de origen, ahora se almacena en el acuífero para su uso en épocas de escasez de agua, transformándola de agua de bajo valor en agua de alto valor en el momento del suministro a los consumidores (Murray et al., 2018).

6.7 Evaluación y Camino a Seguir

Desde 2013, la demanda de agua en el Área Central de Namibia estaba muy por encima del rendimiento seguro del 95 por ciento de los recursos disponibles. Se espera que solo la demanda de agua para la ciudad de Windhoek casi se duplique para 2050. En 2014 una Evaluación de Impacto Ambiental reconoció los impactos socioeconómicos positivos del sistema RGA en la creación de una fuente de agua sostenible para el Área Central de Namibia. RGA se considera un componente esencial para asegurar el futuro de la población en el área central y jugará un papel clave en el sostenimiento del desarrollo y la salud socioeconómica (Murray, 2017).

En la reciente sequía (2015 a 2016), las aguas de pozo junto con una estricta gestión de la demanda proporcionaron seguridad hídrica a Windhoek. Esto fue posible porque el acuífero había sido reabastecido vía pozo de inyección antes de la sequía. Cuando esté completamente desarrollado, se espera que depósito de agua de la ciudad pueda brindar seguridad durante tres años como único recurso hídrico durante las condiciones de sequía.

El acuífero de Windhoek es especialmente vulnerable a lo largo de las cuarcitas de las Montañas Auas y a lo largo de la ladera de las montañas, que se encuentran en el borde sur de la cuenca de Windhoek. Se expresaron preocupaciones sobre la amplia gama de amenazas al acuífero, por ejemplo, rotura de tuberías de alcantarillado y fugas de tanques sépticos, estaciones de servicio, vertederos y cementerios. Es probable que los asentamientos no planificados se conviertan en importantes fuentes de contaminación en el futuro. Por lo tanto, se necesita un cuidado especial para preservar completamente la fuente de agua estratégicamente para el futuro (Mapani, 2005). La ciudad de Windhoek parece estar plenamente comprometida y ha abordado el tema de la planificación urbana desde el principio. Todas las áreas de desarrollo futuro al sur del desarrollo existente se identificaron como áreas con un potencial de contaminación alto a muy alto y, como tales, se consideraron “zonas sin desarrollo”. Otras varias zonas ya desarrolladas tienen usos restringidos y prohibidos. En algunos casos, la ciudad no tuvo más remedio que reubicar

industrias con un alto potencial contaminante. El compromiso de la ciudad se destaca por el hecho de que dos hidrogeólogos fueron designados para abordar específicamente la protección del Acuífero de Windhoek (van Rensburg, 2006; du Pisanie, 2007).

7 Caso de Estudio: Kharkams, Interior Semiárido, Sudáfrica

7.1 La Necesidad de Recarga Artificial – Preparando el Escenario

Kharkams es un pequeño pueblo con una población de 1700 personas, en la región semiárida de Namaqualand en Sudáfrica. Namaqualand recibe precipitaciones invernales, en promedio menos de 200 mm. No hay ríos perennes en la zona y el agua se obtiene de fuentes subterráneas. Durante la corta primavera en esta región, entre agosto y septiembre, unas gotas de lluvia transforman el paisaje árido con vastas extensiones de flores silvestres de todas las formas y colores, creando alfombras de color naranja y amarillo brillantes como se muestra en la **Figura 34** (Travel Guide, 2020). En la **Tabla 8** se proporciona un resumen del sistema de Kharkams.



Figura 34 - Flores silvestres en Namaqualand (Travel Guide, 2020)

Tabla 8 - Sistema Kharkams.

Nombre del Sistema	Kharkams
Ubicación	Pueblo en Namaqualand, Sudáfrica
Precipitación media anual	< 200 mm
Fuente de agua	Agua de inundación (irregular)
Tipo de acuífero	Acuífero de roca dura (granitos y gneis)
Uso final del agua	Uso doméstico
Tipo de recarga gestionada de acuíferos	Inyección de pozo
Volumen medio actual de agua recargada	Tasa de inyección máxima de 1 L/s
Volumen de agua recuperado	0.005 Mm ³ /año
Año de inicio	1995
Propietario/gestión del sistema	Municipio local de Kamiesberg
Atributos únicos de este sistema RGA	Única fuente en área remota árida; tecnología barata y sencilla

7.2 La Fuente de Agua

La fuente de agua es de un río efímero local. Aunque no hay flujo visible en el río durante la mayor parte del tiempo, sí experimenta inundaciones de vez en cuando. Debido a que tales inundaciones llevan una carga significativa de sedimentos, es necesario filtrar los detritos y la arcilla antes de inyectarlos en un pozo.

7.2.1 Suministro de Agua a Pequeña Escala en una Zona Semiárida

El pueblo depende únicamente del agua subterránea, extraída de los tres pozos de extracción del municipio. La recarga natural de agua subterránea es muy baja y, como resultado de la extracción desde mediados de la década de 1990, los niveles de agua subterránea habían caído decenas de metros y la calidad del agua (salinidad) se había deteriorado significativamente. El objetivo de la recarga artificial es revertir esta tendencia negativa reponiendo rápidamente el acuífero cuando la escorrentía del río está disponible. Esta acción aumenta significativamente los rendimientos del pozo y mejora la calidad del agua. Las personas que viven en esta zona árida y remota dependen del funcionamiento de este sistema.

Una de las funciones de gestión clave de cualquier sistema RGA es evitar la obstrucción, cuyo potencial es especialmente alto en los sistemas de inyección de pozo. Los sistemas en los acuíferos primarios, aquellos compuestos por arena no consolidada no son tan susceptibles a este problema porque normalmente dependen de la infiltración para obtener la recarga del acuífero. El sistema en Kharkams incluye un filtro de arena que se construye en el lecho del río. La mayor parte del agua, cuando está disponible, fluye por encima del filtro y pasa por él, pero parte del agua se infiltra en el filtro de arena y fluye hacia los pozos de inyección (Murray, 2004).

7.3 Hidráulica de los Acuíferos

Namaqualand se caracteriza por una geología de roca dura. El acuífero de Kharkams está formado por granitos y gneises cortados por fallas importantes en las que se encuentran perforaciones de alto rendimiento.

7.4 Calidad del Agua

La calidad del agua subterránea se caracteriza por salinidades relativamente altas (~ 250 mS/m) y altos niveles de fluoruro (~ 3 mg/L). La calidad del agua cambia de agua relativamente dulce cerca de la superficie a agua más antigua y estancada en profundidad.

7.5 Elementos del Sistema

La recarga artificial comenzó en el sitio en 1995 y, basándose en la experiencia inicial, el equipo de CSIR realizó algunas modificaciones en el diseño. En línea con la pequeña demanda, el sistema solo tiene una tasa de inyección máxima de 1 L/s. Los elementos del sistema básico se ilustran en las **Figura 35** y **Figura 36**.

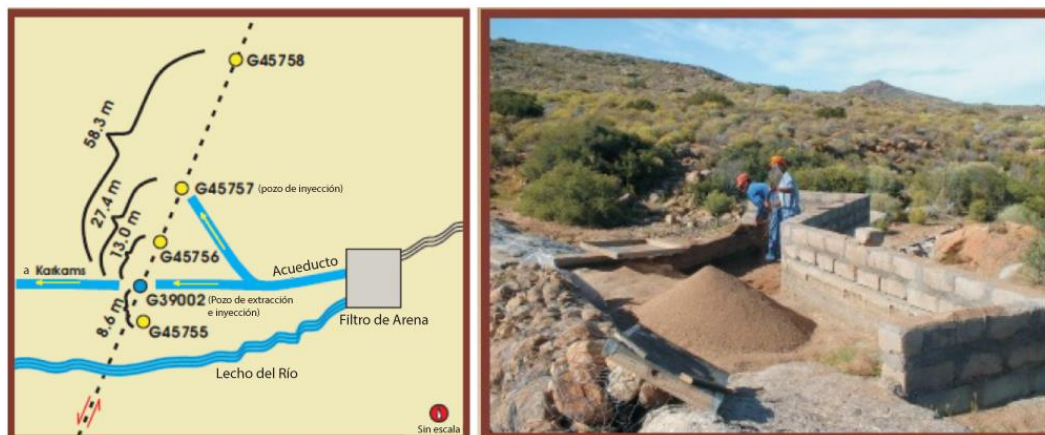


Figura 35 - Disposición del sistema con filtro de arena – la arena de río se tamiza para el filtro (Murray, 2004)



Figura 36 - Filtro de arena con pozo de inyección y extracción (casa de bombas) al fondo (Murray, 2008).

Tres corridas de inyección controladas de 1999 a 2001 tuvieron el efecto de revertir la tendencia de descenso del nivel del agua. Durante la prueba más larga, que duró 138 días, se inyectaron 6.567 m³. Esto es más del doble del rendimiento anual sostenible del pozo (2.400 m³ / año).

La calidad del agua mejoró significativamente después de inyectar el agua limpia filtrada del río. Con tres años consecutivos de recarga artificial, los valores de conductividad eléctrica disminuyeron de más de 250 mS/m antes de la inyección a menos de 100 mS/m después de la inyección, como se muestra en la **Figura 37** (Murray, 2004).

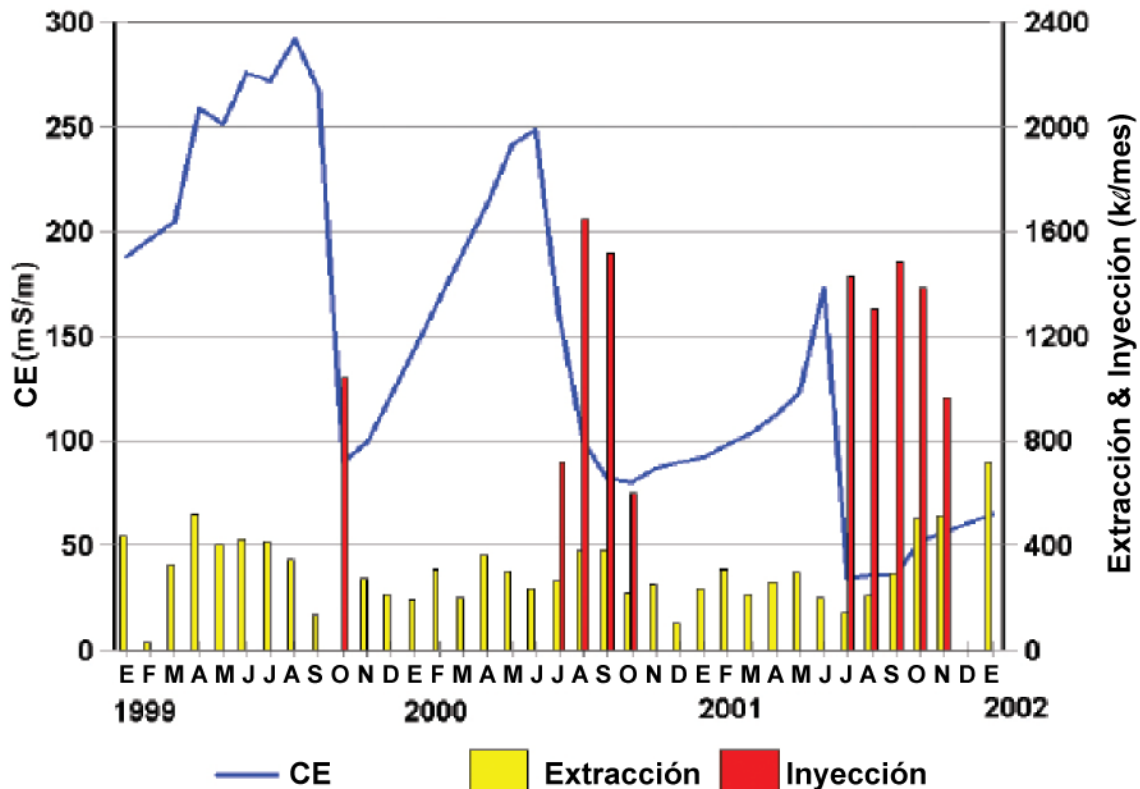


Figura 37 - Calidad del agua en el pozo de extracción de Kharkams (Water Wheel, 2003).

Aunque el sistema es pequeño y relativamente simple, se requiere un mantenimiento básico, de lo contrario la eficiencia disminuirá. En el caso de Kharkams, el único mantenimiento requerido durante la operación es la remoción semanal del sedimento fino que se deposita en el filtro ya que ralentiza la infiltración.

7.6 Entorno de Gestión de Recursos Hídricos

El municipio local de Kamiesberg ofrece servicios a 16 pequeñas ciudades y pueblos, incluido Kharkams; y proporcionó los tres pozos de extracción. El Departamento Nacional de Asuntos Hídricos y Forestales ha brindado un gran apoyo a la RGA y perforó cuatro pozos de monitoreo, uno de los cuales se convirtió en el nuevo pozo de inyección.

7.7 Evaluación y camino a seguir

Esta zona semiárida sustenta principalmente la crianza de ovejas y cabras y está escasamente poblada. El sistema satisface las necesidades de la comunidad y demuestra el valor de la recarga artificial oportunista en áreas semiáridas, incluso si solo se practica a pequeña escala.

El sistema es ingenioso en su simplicidad. *“Todo lo que implica es tomar parte del caudal del río cuando llueve, drenarlo a través de un filtro de arena en el lecho del río y luego introducirlo por gravedad en un pozo”,* dice el Dr. Murray. *“No hay costos de bombeo, y los costos de mantenimiento, simplemente remover los detritos y la arcilla del filtro de arena entre corridas de inyección, son insignificantes. Es casi una locura no hacerlo, porque es muy barato y sencillo”.*

Puede ser barato y simple, pero la recarga es potencialmente suficiente para duplicar el rendimiento sostenible del pozo. Una ventaja adicional es que mejora significativamente la calidad del agua.

El sistema recibió elogios tanto a nivel local como al más alto nivel internacional:

- Dr. Ricky Murray, Líder de RGA en Sudáfrica y alrededores: "El agua subterránea en Namaqualand es generalmente bastante salina y la inyección de agua dulce la diluye. Recibimos comentarios de los residentes de Kharkams de que ésta es la mejor agua que han tenido".
- El Dr. Peter Dillon, Presidente de la Comisión de Recarga Gestionada de Acuíferos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos: consideró que el sistema de Kharkams era un "éxito rotundo". "Esta es una tecnología de bajo costo y será de gran valor para lograr el plan de Sudáfrica para mejorar el suministro de agua a las comunidades rurales y remotas". (Water Wheel, 2003).

8 Caso de Estudio: Plettenberg Bay, Cabo del Sur, Sudáfrica

8.1 La necesidad de la recarga artificial - Preparando el escenario

La Bahía de Plettenberg (Plettenberg Bay) es un popular destino turístico en la ruta de los jardines de la costa sur del Cabo (**Figura 38**). Tiene una población local de 29.000 habitantes (censo de 2011), pero hay una gran afluencia de turistas y una gran proporción de segundas residencias que se utilizan exclusivamente durante los periodos pico vacacionales en torno a diciembre. Se caracteriza por un clima templado marítimo extremadamente suave, con pocas precipitaciones o temperaturas extremas. La precipitación media es de 945 mm/año (Wikipedia, 2016). Los periodos pasados de suministro inadecuado en las ciudades de la costa sur del Cabo deben ser considerados como institucionales más que hidrológicos. En la **Tabla 9** se ofrece un resumen del sistema de Plettenberg.



Figura 38 - [Bahía de Plettenberg](#).

Tabla 9 - Sistema de la Bahía de Plettenberg.

Nombre de Régimen	Plettenberg Bay
Ubicación	Plettenberg Bay, Cabo Sur, Sudáfrica
Precipitación media anual	945 mm/año
Fuente de agua	Agua de río
Tipo de acuífero	Acuífero de Roca dura (arenitas de cuarzo)
Uso final del agua	Uso doméstico
Tipo de manejo de recarga del acuífero	Inyección de pozo
Volumen medio actual de agua recargada	Viabilidad: tasa de inyección > 10 L / s
0,4 Mm³ / año (más de 3 meses)	
Volumen de agua recuperada	0,8 Mm ³ / año (durante 5 meses pico)
Año de inicio	Todavía no (prefactibilidad en 2007)

La bahía de Plettenberg tiene una gran demanda de agua en verano y un exceso de agua en invierno, lo que lo convierte en un buen candidato potencial para la recarga artificial. El principal objetivo de recarga artificial en este caso sería el de permitir un mayor rendimiento de un acuífero durante los periodos de máxima demanda, lo que no sería posible de otro modo. En 2007 se llevó a cabo una evaluación de la recarga artificial (Murray, 2007) con la idea de inyectar agua del río Keurbooms, que desemboca en la bahía, en un acuífero ya explotado por el municipio de Bitou, la autoridad local responsable dentro del municipio del distrito de Eden (**Figura 39**).



Figura 39 - Municipio del distrito de Eden, Cabo Occidental, incluidos los municipios locales de Bitou y Knysna (EMG, 2011).

A pesar de un excelente estudio de prefactibilidad del RGA al que contribuyeron varias partes, su implementación no se llevó a cabo, sino más de diez años después. Debido a que en el municipio vecino de Knysna no se ha tenido en cuenta el RGA y por las implicaciones que tiene para toda la región costera, se incluye el estudio de caso de

Plettenberg Bay. Se espera que la discusión del marco de gobernanza de los recursos hídricos existente contribuya a comprender mejor la evaluación de los cuellos de botella restantes que fueron discutidos en la Sección 9.2 “Implementación de la estrategia de recarga artificial”.

8.2 La Fuente del Agua

El suministro de agua y la recarga artificial se llevarán a cabo dentro del sistema de suministro de agua que combina la ciudad de Plettenberg Bay y su municipio, Kwanokathula. En la actualidad, la ciudad depende de agua superficial del río Keurbooms para la mayoría de sus necesidades de suministro de agua doméstica. La calidad del agua en el río Keurbooms es generalmente muy buena. Durante los períodos de baja demanda, el agua cruda pasa por alto la planta de tratamiento y es canalizada hacia la presa Roodefontein, donde se puede recuperar cuando sea necesario. Sin embargo, la salinidad del agua de la presa Roodefontein es alta, y esto hace que sea necesario mezclarlo con el agua "pura" del río Keurbooms antes del suministro. Además de los recursos hídricos superficiales, hay una fuente de agua subterránea en el área de Kwanokathula que se utiliza únicamente en el municipio. El rendimiento promedio combinado de los pozos de Kwanokathula no es suficiente para satisfacer la demanda total de Kwanokathula, y el resto se extrae del río Keurbooms a través de las obras de tratamiento de agua.

8.3 Hidraulica de Acuíferos

Debajo del municipio de Kwanokathula se encuentra la Formación Península, una unidad de cuarcita del Grupo Table Mountain (**Figura 40**) que se presenta como una banda de uno a dos kilómetros de ancho, aproximadamente de este a oeste.

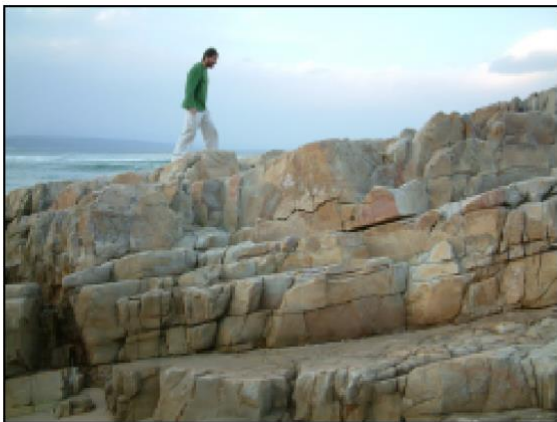


Figura 40 - Cuarcita de la Formación Península diaclasada y fracturada en la Bahía de Plettenberg (Murray 2007).

8.3.1 Consideraciones de RGA en un acuífero fracturado

Los acuíferos del Grupo Table Mountain han sido explotados por sus aguas subterráneas de alta calidad durante décadas por agricultores, pequeños propietarios y otros usuarios privados. El Grupo Table Mountain está formado principalmente por cuarzo-arenitas, con lutitas y limolitas de poco espesor subordinadas. Fueron intensamente deformadas y engrosadas por la Orogenia del Cabo del Permo-Triásico, dando lugar a pliegues a menudo volcados, y a un fuerte clivaje de fracturas. La porosidad y la permeabilidad primarias en las cuarzo-arenitas son insignificantes, y tanto el almacenamiento como la transmisión de las aguas subterráneas se realizan a través de fracturas, planos de falla y otras características secundarias (Pietersen y Parsons, 2001). Los rendimientos de las perforaciones en estas rocas pueden superar los 30 L/s. Las problemáticas clave relacionadas con el posible RGA en este acuífero incluyen (Murray y Ravenscroft, 2010):

- ¿Es el acuífero suficientemente permeable para aceptar agua de recarga?
- ¿Cuál es la capacidad de almacenamiento del acuífero?
- ¿Será recuperable el agua recargada? O más bien dicho, ¿el agua recargada permanecerá almacenada hasta que se necesite?

Los trabajos de previos de factibilidad aportaron algunas ideas importantes sobre estas cuestiones. La prueba de inyección (**Figura 41**) indicó que el acuífero es muy permeable. Tiene una capacidad de almacenamiento muy elevada y puede aceptar fácilmente el agua de inyección a una velocidad superior a 10 L / s, con un flujo de agua que se aleja rápidamente del punto de inyección. La interpretación inicial del nivel de agua subterránea indica que el almacenamiento del acuífero no debería funcionar por encima de una cota de 60 m para minimizar la posibilidad de pérdidas de agua. Esto debe ser confirmado en un estudio más detallado del sistema de flujo. Teniendo en cuenta las dimensiones del acuífero y un coeficiente de almacenamiento conservador del 0,3 por ciento, se estimó que, para alcanzar un objetivo de recarga artificial de 400 millones de litros, se necesitarían unos 30 m de espesor vertical del acuífero, como se muestra en la **Tabla 10** (Murray y Ravenscroft, 2010).



Figura 41 - Pozo de producción convertido para realizar una prueba de inyección (Murray y Ravenscroft, 2010).

Los límites del acuífero de Kwanokathula son las lutitas de Cedarberg al norte y las rocas del Cretácico, incluyendo los conglomerados de Enon al sur (incluyendo una posible falla). Se considera ilimitado a efectos prácticos al este (donde subyace al océano) y al oeste, donde continúa por muchos kilómetros. En la **Figura 42** se muestra una sección transversal norte-sur del acuífero.

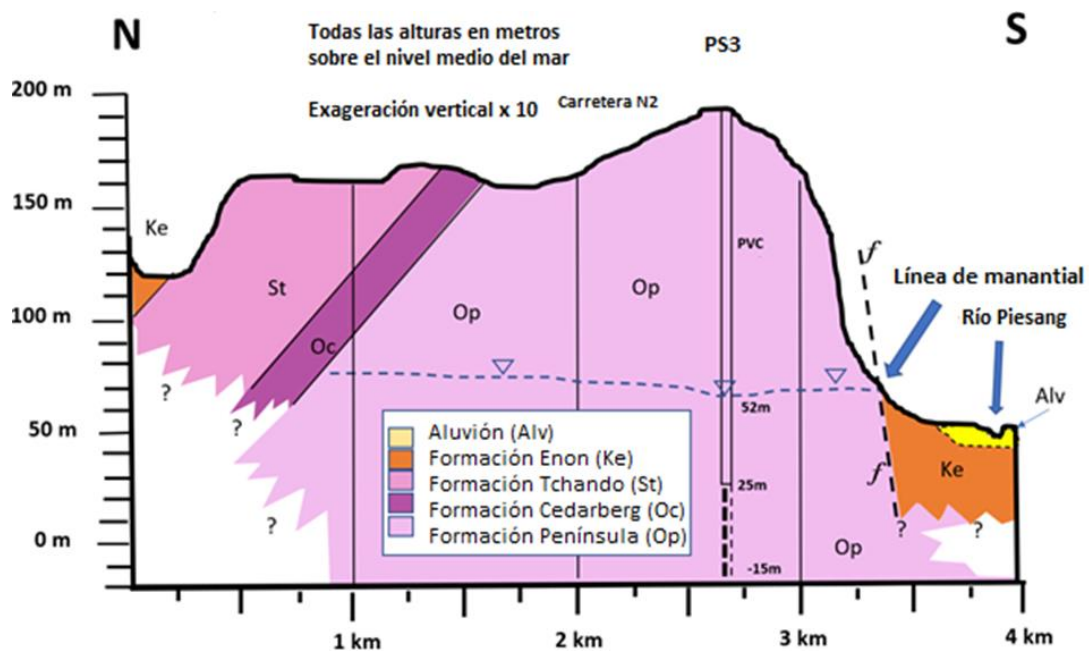


Figura 42 - Sección transversal hidrogeológica norte-sur del Acuífero Kwanokathula (Murray, 2007).

Tabla 10 - Resumen de las propiedades del acuífero Kwanokathula (Murray, 2007).

Área total de acuífero	22 Km ²
Transmisividad	70 m/d
Coefficiente de Almacenamiento	0.5%
Gradiente hidráulico	1:150 (0.007), aproximadamente de oeste a este
Recarga	7% precipitación total
Espesor Promedio	70 m

8.4 Calidad del Agua

La calidad química del agua del río Keurbooms es muy alta. El agua fluye sobre las areniscas relativamente inertes del Grupo Table Mountain. Esto contrasta con la calidad del agua de la presa Roodefontein, que es significativamente más salina y se encuentra en los conglomerados salinos de Enon.

8.4.1 Hierro Disuelto y Obstrucción de Pozos

Los problemas relacionados con el hierro son comunes en los acuíferos del Grupo Table Mountain, específicamente en los pozos que apuntan a los grupos Peninsula y Nardouw en el Cabo Oriental (Smith, 2006). Se sabe que hay hierro en algunos de los pozos del acuífero de Kwanokathula. Estos deben evitarse como un lugar de recarga si es posible. Una opción puede ser fijar el hierro en estos lugares inyectando agua oxigenada en esta zona.

La opción preferida para la RGA es usar agua tratada del río Keurbooms (Murray, 2007) porque las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) y hierro en el agua no tratada podrían fomentar la obstrucción de los pozos y el taponamiento de las fracturas del acuífero alrededor de los pozos de inyección. La aireación y la filtración generalmente eliminarán parte del hierro disuelto. El tratamiento también elimina el oxígeno disuelto, lo que mejora la probabilidad de éxito de la recarga artificial, particularmente si las reacciones microbianas contribuyen a la oxidación del hierro en el acuífero. Otro beneficio del tratamiento es que el agua se desinfecta por cloración. También se recomendó que los pozos de producción se bombearan a una tasa continua más baja en lugar de intermitentemente a una tasa más alta. Esto evita los problemas de oxidación y precipitación de hierro en el acuífero y en el revestimiento de acero del pozo asociados con el aumento y descenso repetidos del nivel del agua, lo que permite que el agua del acuífero fluya de regreso a estas zonas (Tredoux, 2007).

8.5 Elementos del Sistema

El uso de agua subterránea actualmente autorizado de 11,5 L/s (alrededor de 1000 m³/día) del Acuífero Kwanokathula podría potencialmente triplicarse a alrededor de 3000 m³/día a través de la RGA. El acuífero necesitaría contener el agua recargada desde el

invierno, cuando se recarga, hasta el verano, cuando el agua se vuelve a extraer durante la temporada alta. La demanda pico de verano para Plettenberg Bay es de 12 a 13 millones de litros/día y la semana pico de Navidad-Año Nuevo es de 17 a 18 millones de litros/día. Los elementos del sistema de abastecimiento de agua se muestran en la **Figura 43**. El estudio de prefactibilidad de la RGA indicó cómo se podría ampliar el sistema (**Figura 44**).

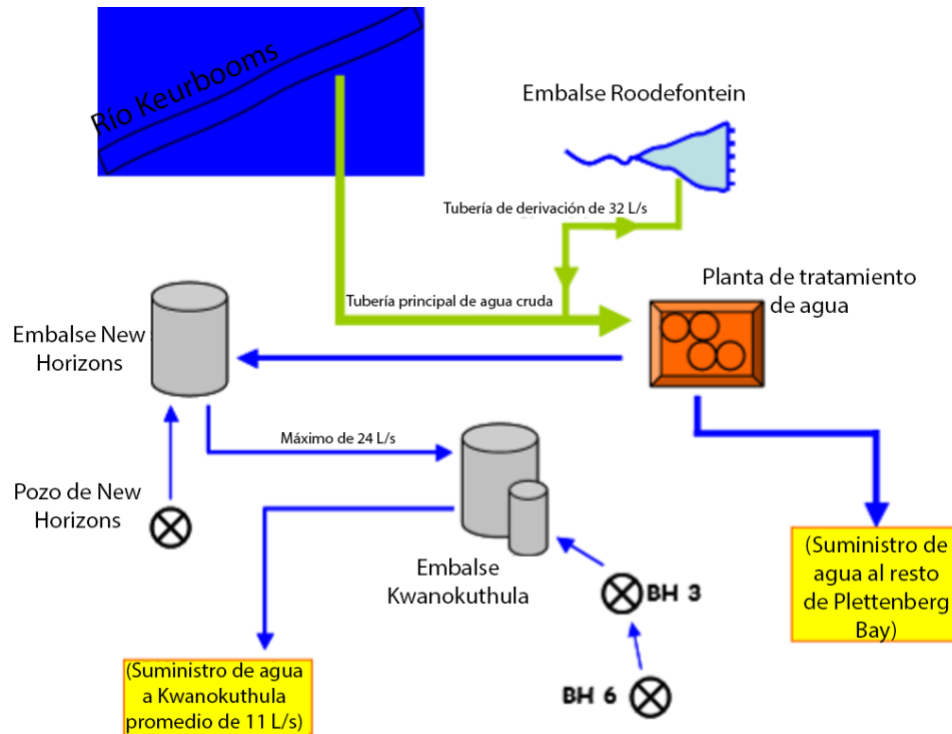


Figura 43 - Diagrama esquemático de los arreglos existentes para el suministro de agua para el Greater Plettenberg Bay (Murray, 2007).

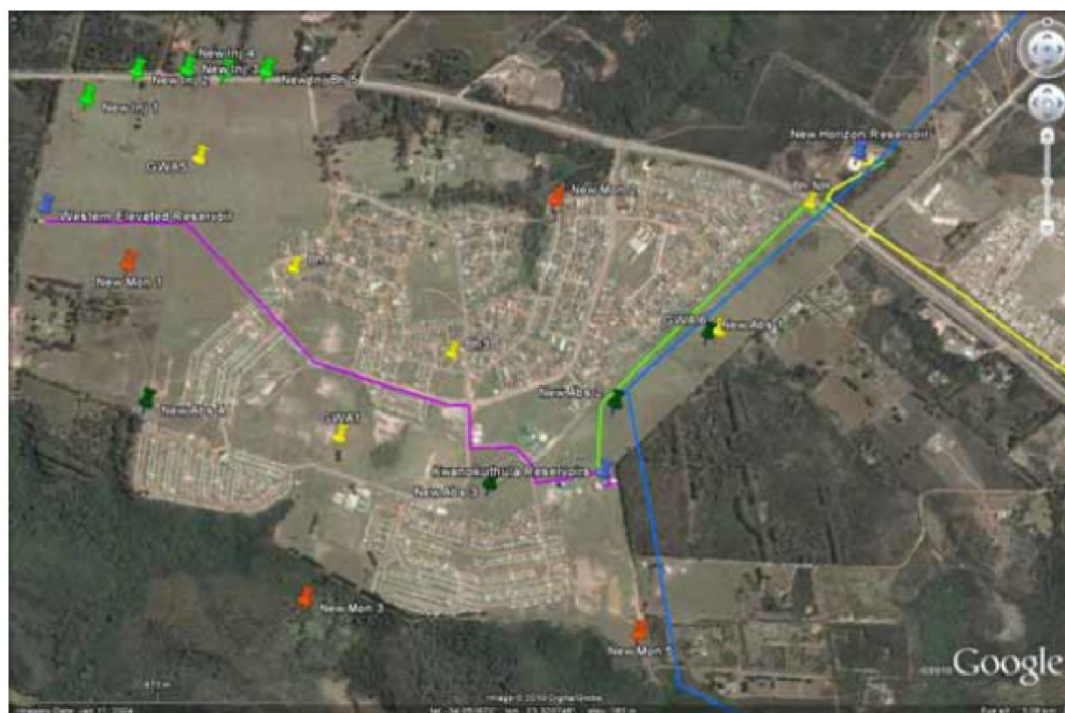


Figura 44 - Pozos existentes y planificados de Kwanokathula (Murray y Ravenscroft, 2010). Abstracción existente = amarillo; abstracción planificada = verde oscuro; inyección planificada = verde brillante; seguimiento planificado = naranja.

El estudio también indicó cómo se podría satisfacer la demanda pico mediante la incorporación de la RGA en el sistema de suministro de Plettenberg Bay (Tabla 11). La inyección se realizaría de julio a septiembre y la extracción de noviembre a marzo, con periodos de descanso intermedios.

Tabla 11 - Suministro existente y propuesto de suministro de agua para Plettenberg Bay (after Murray and Ravenscroft, 2010).

Suministro de Agua	Fuente	Comentario	(ml/día)
Suministro existente	Agua superficial (sequía)	8.6 millones litros/día (normal)	6.9
	Pozos existentes	(presa de almacenamiento fuera del canal)	3.4
	Presa de Roodefontein		2.8
Suministro existente	Desalinización (en construcción – Nov. 2010)	(durante los períodos de máxima demanda)	2.0
Suministro propuesto	Recarga artificial	(durante los 5 meses de máxima demanda)	2.3
Total			17.4

8.5.1 Costo de la RGA en Comparación con Desalinización

El costo estimado de la opción propuesta es de aproximadamente US\$ 1,8 millones. Se propuso que el proyecto se implementara en fases con la primera fase prevista para completarse en 2013. El costo de capital de RGA es aproximadamente un tercio del costo actual de las plantas de desalinización, que servirían para una aplicación similar de ser utilizadas solo durante el pico de demanda. También se espera que los costos

operativos de la recarga artificial sean considerablemente menores que los de la desalinización (Murray y Ravenscroft, 2010).

8.6 Entorno de la Gestión de Recursos Hídricos

En Sudáfrica, los actores clave en la gestión y el suministro de recursos hídricos deben trabajar juntos. A nivel nacional, el Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales es el custodio y regulador general de los recursos hídricos. A nivel regional, las Agencias de Gestión de Cuencas (CMA, siglas en inglés) asumen la gestión delegada en nombre del gobierno nacional a nivel regional (cuencas) y colocan la gestión de los recursos hídricos en unidades más manejables. La implementación de CMA ha sido un desafío y hasta ahora solo ha ocurrido en unas pocas partes del país porque las cuencas no son unidades políticas naturales.

Desde el año 2000, los municipios han recibido nuevas responsabilidades como proveedores de servicios de agua y autoridades de servicios de agua. Por ejemplo, el municipio local de Bitou, se encuentra dentro del municipio del distrito de Eden, pero es tanto el proveedor de servicios de agua como la autoridad de servicios de agua para el área de Greater Plettenberg Bay. Se espera que los municipios informen y sean apoyados por las CMA. La **Figura 45** resume el nuevo marco de gestión de recursos hídricos.

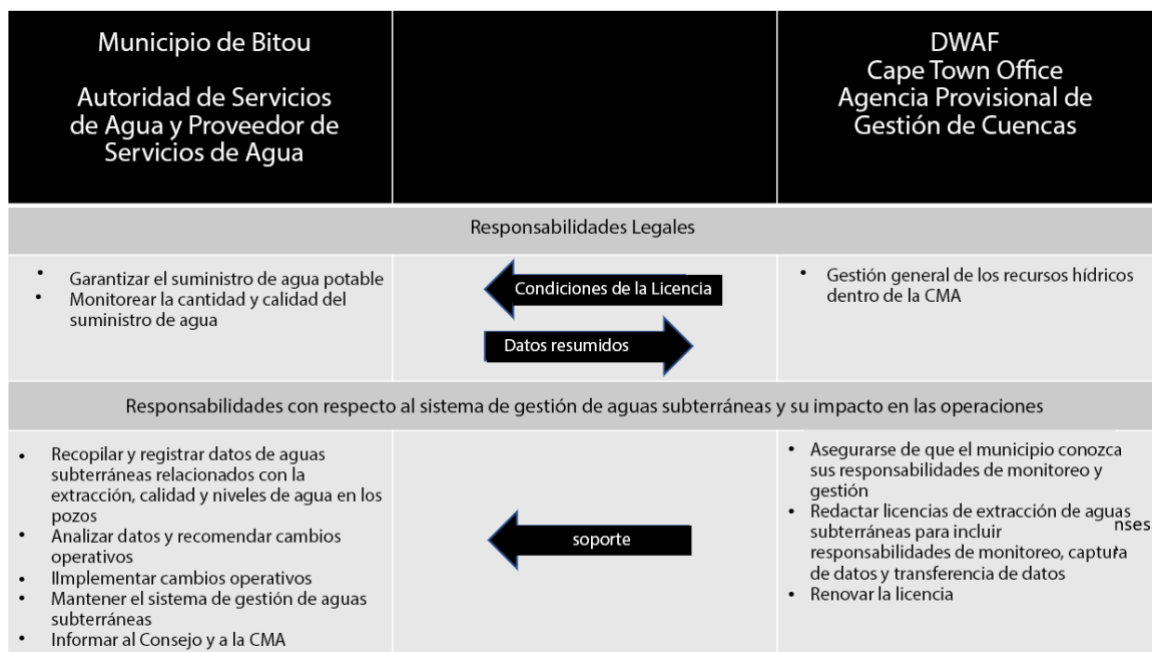


Figura 45 - Marco institucional para la gestión de aguas (subterráneas) (Murray, 2007).

8.7 Evaluación y Camino a Seguir

A pesar de una búsqueda intensiva en Internet, no se pudo encontrar información sobre la implementación de la propuesta RGA de 2007. La información sobre el despliegue del aumento del suministro de agua desde 2007 se ha recopilado del último estudio

científico y varias fuentes de noticias locales, como se muestra en la **Tabla 12**. (News24, 2009; Murray y Ravenscroft, 2010; EMG, 2011; Holloway et al., 2012; Municipio de Bitou, 2017 y 2019).

Tabla 12 - Falta de enfoque de planificación e implementación de recursos de aguas subterráneas por parte de los municipios.

2007	RGA: estudio de prefactibilidad realizado. La capacidad de inyección del pozo se evaluó en 2010.
2009	<p>En enero, el río Karatara se seca, lo que deja a Sedgefield sin agua en la temporada alta de vacaciones. Para abril, los municipios locales de Mossel Bay, George, Knysna y Bitou introducen restricciones de agua; represas principales al 60 por ciento; precipitaciones más bajas en 132 años. Para junio, los informes de situación sobre la disponibilidad de agua y la capacidad de almacenamiento de la Municipalidad del Distrito de Eden revelan que las municipalidades están al borde de la crisis, ya que ninguna municipalidad tiene suficiente agua almacenada y no se pronostican lluvias para el futuro cercano; presas principales al 45 por ciento. Para agosto, primera reunión de gestión de desastres, convocada por la Municipalidad del Distrito de Eden; presas principales al 30 por ciento. Para septiembre, el Departamento Nacional de Asuntos Hídricos establece una meta de reducción del consumo del 40 por ciento para los municipios afectados. Para noviembre, los municipios distritales y locales son declarados áreas de desastre y reciben dinero de ayuda para desastres y comienzan a implementar proyectos de suministro de agua de emergencia.</p> <p>Un total de US\$ 70 millones de la respuesta gubernamental a la sequía se destinó a mejorar la infraestructura de suministro de agua urbana, de los cuales el Tesoro Nacional proporcionó el 58 por ciento, complementado con otras fuentes y cofinanciamiento municipal. La mayoría de los proyectos adicionales de suministro de agua no entraron en funcionamiento hasta finales de 2010-2011, después de que terminara la sequía. Para el municipio de Bitou, esto incluía una planta desalinizadora de 2 millones de litros/día (Figura 46).</p>
2009 - 2011	<p>La Provincia Occidental del Cabo fue declarada zona nacional de sequía. El municipio de Bitou volvió a recibir fondos de socorro en casos de sequía del Centro Nacional de Gestión de Desastres por valor de 1,6 millones de dólares estadounidenses y otros 0,25 millones de dólares estadounidenses del Gobierno Provincial de Western Cape. De este dinero, el agua subterránea también recibió una pequeña porción para 2 pozos perforados y equipados en KwaNokuthula para el suministro de Plettenberg Bay. Esto debe compararse con el costo de capital estimado de US\$ 0,8 millones para todo el sistema de RGA, que aún no había sido financiado. Bitou encargó más estudios sobre la resiliencia del agua y una menor dependencia de las aguas superficiales; La presa Wadrift, una presa fuera del canal, llena del río Keurbooms en épocas de alto caudal, está prevista para 2022.</p>
2017	

**Figura 46** - Planta desalinizadora de Plettenberg Bay– junto al icónico Beacon Isle Hotel de la ciudad (Veolia, 2019).

Un descuido similar del agua subterránea y RGA ocurrió a partir de 2009 en el municipio vecino de Knysna (**Figura 39**) en su suministro de agua a Sedgefield. Se había

propuesto la tecnología de recarga de la infiltración de dunas y se había realizado un estudio teórico. La RGA habría proporcionado una depuración natural de las aguas residuales del pueblo costero que estaba creando un problema al descargar parcialmente en el área ambientalmente sensible de Groenvlei, como se muestra en la **Figura 47** (Murray y Ravenscroft, 2010). Al igual que en Bitou, los fondos de alivio de la sequía se gastaron en una planta desalinizadora. Y, en lugar de implementar elementos clave de las propuestas de RGA de 2009, surgieron nuevos planes para construir una segunda planta desalinizadora. Debido a los problemas con la eliminación de salmuera, es probable que se deba ubicar una segunda planta a unos pocos kilómetros de distancia. Como una solución muy poco probable, también se discutió una transferencia de agua entre cuencas a gran escala y muy costosa desde el río Keurbooms, que es la principal fuente de agua para Plettenberg Bay (Raynor, 2014).



Figura 47 - Trabajos de la planta Sedgefield de tratamiento de residuos en las dunas de arena, con Groenvlei en el primer plano (Murray and Ravenscroft, 2010).

Esta situación es preocupante porque el proyecto de RGA de Sedgefield fue visto como el precursor en el uso conjunto del agua en el sur del Cabo, allanando el camino para que Mossel Bay, George, Knynsa y Plettenberg Bay reevalúen sus fuentes de agua disponibles. *“Agua Nueva ahora es obligatoria en las carteras de agua de los municipios para limitar el riesgo de falla total del suministro de agua, en caso de que los ríos se sequen”* (IMESA, 2010).

Los municipios de Knysna y Bitou son conocidos por sus excelentes servicios. Fueron elogiados por haber salvado la situación a través de reducciones impresionantes en la demanda de agua municipal (41 por ciento) durante el período crítico de sequía. Los esfuerzos de los ingenieros municipales también fueron elogiados por asegurar una expansión temporal notablemente rápida de los suministros de agua locales. Por otro lado, una evaluación de la respuesta a la sequía durante el período de 2009 a 2011 destacó brechas graves (Holloway et al., 2012), que incluyen:

- discernimiento limitado del inicio de la sequía y la inminente escasez de agua;
- falta de planes de contingencia para manejar la escasez de agua urbana en áreas expuestas a precipitaciones irregulares; y,
- deficiencias graves en el sector del agua, incluida la infraestructura municipal de distribución de agua envejecida, pérdidas de agua no contabilizadas y capacidad limitada de gestión del agua.

Ante todo, los municipios son instituciones políticas y no científicas. Pueden distribuir agua, pero no planificar, financiar, desarrollar y operar los recursos hídricos, y mucho menos hacerlo por los recursos de aguas subterráneas poco conocidos. No se espera que esto cambie sin una regulación detallada de la gestión de los recursos hídricos locales por parte del gobierno nacional junto con la orientación y supervisión de las CMA's, que aún no funcionan.

9 RGA como Parte del Desarrollo Sustentable del Recurso de Aguas Subterráneas

9.1 Algunas Experiencias con Factores de Éxito de RGA

En general, ha habido una implementación muy limitada de RGA en Sudáfrica y en la región más amplia de África del Sur. Sin embargo, la experiencia de implementación indica un buen historial en general con los problemas técnicos requeridos para una implementación exitosa de RGA. Este éxito puede medirse contra un conjunto de criterios de éxito desarrollados en 2007, como se muestra en la **Tabla 13** (Murray, 2007). La relevancia de estos factores de éxito se ilustró en los diversos estudios de caso.

Tabla 13 - Diez preguntas a considerar para asegurar la implementación exitosa de RGA (Murray, 2007).

Aspecto de RGA	Preguntas por considerar
1. Necesidad de un sistema de recarga artificial	¿Es realmente necesaria la recarga artificial? ¿No podría aumentar su rendimiento de agua subterránea expandiendo el campo de pozos o administrando mejor el campo de pozos existente?
2. Fuente de agua	¿Cuál es el volumen de agua disponible para la recarga y cuándo está disponible?
3. Hidráulica del acuífero	¿El acuífero recibirá y mantendrá el agua almacenada?
4. Calidad del agua	¿Es la calidad del agua de origen adecuada para la recarga artificial?
5. Asuntos de ingeniería	¿Cómo se tratará y transferirá el agua al acuífero?
6. Asuntos ambientales	¿Cuáles son los posibles beneficios, riesgos y limitaciones ambientales?
7. Asuntos legales y regulatorios	¿Qué tipo de autorización se requiere?
8. Economía	¿Cuánto costará el plan y cuál es el costo de agua suministrada por m ³ ?
9. Administración y capacidad técnica	¿Se dispone de las habilidades necesarias para operar el plan?
10. Arreglos institucionales	¿Quién será responsable de suministrar la fuente de agua y asegurar que su calidad sea adecuada? ¿Hay otros usuarios del acuífero? ¿Quién regular el uso del plan?

9.1.1 Asuntos Técnicos Necesarios para una Implementación Exitosa de RGA

- *Motivación:* La necesidad de presentar un caso detallado para la recarga artificial es crucial. La implementación implica el desarrollo de una costosa infraestructura en un entorno no científico y las implicaciones del desarrollo deben ser plenamente comprendidas. Los estudios de caso de Windhoek y Plettenberg Bay lo ilustran.
- *Hidrogeología:* El estudio de caso de Langebaan Road, que utiliza la inyección, demuestra la importancia de realizar un estudio exhaustivo de la geología, el flujo de aguas subterráneas, la recarga y la descarga. En este caso, parte del agua inyectada se filtró fuera de la zona de captación prevista y se perdió en pozos que se convirtieron en

artesianos lejos del lugar de inyección, porque no se había comprendido bien la geología subyacente.

- *Calidad del Agua:* Todos los casos de estudio ilustran la necesidad de aclarar el carácter del agua de origen y, en particular, la gran variedad de problemas de calidad del agua en la combinación agua fuente/acuífero. En el caso de estudio Atlantis, se destacó la importancia de evaluar la calidad del agua en los pozos de producción en términos de obstrucción provocada por las propiedades inherentes del agua y la geología. Un caso de estudio sobre la aplicación piloto en Calvinia, en el Cabo Norte, condujo al descubrimiento de minerales que contenían arsénico en la brecha, enfatizando la importancia de considerar la mezcla de agua de origen y agua subterránea, así como las interacciones entre el agua y la roca.
- *Capacidad:* La mayoría de los casos ilustran la importancia de determinar la capacidad técnica adicional necesaria para llevar a cabo con éxito la RGA. Un caso de estudio de almacenamiento de aguas en presas de arena en el Cabo Norte encontró que el fracaso del plan se debió a una capacidad técnica inadecuada del municipio. El caso de estudio de Plettenberg Bay y la situación de la vecina Sedgefield ilustran la falta de planificación para RGA debido a la falta de capacidad técnica. El caso de Langebaan Road enfatiza la importancia de que todas las partes interesadas se involucren – y lo que es más importante, de su aceptación y apropiación –, y demuestra cómo se logró su participación.

9.2 Despliegue de la estrategia de recarga artificial

En 2007 se elaboró una estrategia de recarga artificial (RA) para Sudáfrica, que incluía un enfoque en las cuestiones más amplias de la implementación. El marco de la estrategia de RA con su visión, temas y objetivos de gestión se muestra en el **Tabla 14** (DWAF, 2007).

Tabla 14 - Recarga Artificial: Visión, Temas y Objetivos de Gestión Objectives (DWAf, 2007).

Visión	
Utilizar el almacenamiento natural en el subsuelo como parte de la gestión integrada de los recursos hídricos siempre que sea tecnológica, económica, ambiental y socialmente factible	
Temas de recarga artificial	Objetivos de Gestión
1 Tema de Conocimiento	Crear conciencia y proporcionar educación sobre la recarga artificial
2 Tema de legislación y regulación	Permitir que las instituciones de gestión de aguas y servicios hídricos adopten y regulen la recarga artificial como parte de IWRM
3 Tema de Planificación	Facilitar el uso de la recarga artificial para lograr un uso y una gestión de los recursos hídricos sostenibles, eficientes y rentables
4 Tema de Implementación	Apoyar a las instituciones de gestión de aguas y servicios hídricos en la implementación de la recarga artificial
5 Tema de Gestión	Optimizar la gestión de los sistemas de recarga artificial
6 Tema de Investigación	Desarrollar un cuerpo de conocimientos que apoye la implementación y operación eficiente y efectiva de los sistemas de recarga artificial
7 Tema de Implementación de Estrategia	Implementar y actualizar la estrategia de recarga artificial

Como se ha indicado anteriormente, está claro que los conocimientos y los aspectos técnicos de la RGA (a grandes rasgos, los temas 1, 5, 6 y 7 de la **Tabla 14**) no son el cuello de botella de la aplicación. Más bien, el cuello de botella es la lentitud del desarrollo institucional para la utilización y gestión sostenibles de los recursos hídricos subterráneos (a grandes rasgos, los temas 2, 3 y 4 de la **Tabla 14**). Esto se destaca más adelante con especial referencia a la Estrategia Nacional de Aguas Subterráneas (Departamento de Agua y Saneamiento, 2017).

Los grandes cambios políticos de 1994 en Sudáfrica dieron lugar a una completa transformación del sector del agua en términos de política, legislación e instituciones. Según la nueva Ley Nacional del Agua de 1998, las aguas subterráneas habían pasado de tener un estatus legal de "agua privada", en la que había poco interés nacional, a ser un "recurso importante". En términos de importancia nacional, las aguas subterráneas se convirtieron en el recurso que permitió proporcionar un servicio básico de agua a más del 60% de las comunidades que nunca antes habían sido atendidas en cuestión de 15 a 20 años. Sin embargo, a pesar de su elevado perfil, las aguas subterráneas han carecido de un desarrollo institucional adecuado, ya que sus características únicas no han sido abordadas hasta ahora en las regulaciones e instituciones apropiadas dentro del enfoque general de gestión integrada de los recursos hídricos que surgió de la nueva política y legislación.

Uno de los principales objetivos de la Ley de 1998 era lograr el establecimiento de instituciones adecuadas para la gestión apropiada y participativa de los recursos hídricos

(un requisito del tema 4 del Cuadro 14). Esto es especialmente importante en el caso de los recursos hídricos subterráneos muy localizados que no pueden gestionarse físicamente de forma centralizada. La ley prevé tres niveles de gestión, a saber, el gobierno nacional, 19 agencias de gestión de cuencas (ahora consolidadas en nueve) a nivel de gestión regional y asociaciones de usuarios del agua que actúan de forma cooperativa a nivel local.

Por razones políticas, con la llegada del gobierno municipal integral y la introducción del gobierno local en las antigua Patria negra en el año 2000, la responsabilidad de la gestión de miles de planes de aguas subterráneas se transfirió del Departamento Nacional de Asuntos Hídricos y de las estructuras de gestión comunitaria a las nuevas administraciones municipales. Desde entonces, ha habido muchos informes sobre fallos en los sistemas, empezando por el muy publicitado desastre de Dinokana en 2004 (fallo repentino del suministro de aguas subterráneas de un excelente acuífero dolomítico tras una falta total de control del nivel de las aguas subterráneas).

A pesar de su mayor visibilidad sobre el papel, la experiencia sobre el terreno indica que muchos municipios sólo recurren a las aguas subterráneas como último recurso o en caso de emergencia. Las aguas subterráneas se perciben como una fuente poco fiable y difícil de gestionar. Según el Departamento de Asuntos Hídricos, "más del 70% de los municipios no quieren soluciones localizadas y prefieren planes regionales". La Subvención para Infraestructuras Regionales a Gran Escala pone la financiación bajo el control de los municipios, lo que a menudo se traduce en un completo abandono de las fuentes locales de agua subterránea. En algunos casos, se aplican opciones muy costosas, como la desalinización, como soluciones a corto o medio plazo, sin que las aguas subterráneas reciban una consideración temprana y seria (por ejemplo, en las ciudades costeras de Sedgefield y Plettenberg Bay, en el Cabo Occidental).

Los especialistas en aguas subterráneas deben mantener una defensa permanente del recurso para el que poseen los conocimientos técnicos, pero sólo pueden llevarla a cabo hasta cierto punto. Las partes interesadas en un Diálogo Nacional en 2018 estuvieron todas de acuerdo en que el desarrollo de las aguas subterráneas y el marco de gestión allí presentado (Riemann et al., 2011) podrían convertirse en el marco general dentro del cual se podrían desenvolver las acciones conjuntas en los diferentes niveles de gestión. Sin embargo, las diferentes instituciones para los distintos niveles de gestión de los recursos hídricos que forman la base de este marco o bien no existen todavía o no están funcionando con respecto a los recursos hídricos subterráneos.

Resulta especialmente preocupante la debilidad de la función de gestión de las aguas subterráneas en el Gobierno Nacional en un momento en el que hay que crear una nueva capacidad en materia de aguas subterráneas a nivel regional (es decir, en las nuevas Agencias de Gestión de Cuencas) y a nivel de los municipios de distrito y locales, así como de las instituciones de gestión local. Sin un defensor de las aguas subterráneas y una capacidad crítica de especialistas en aguas subterráneas en el gobierno nacional, el país no

podrá avanzar significativamente hacia una buena gobernanza de las aguas subterráneas. Este requisito crítico fue claramente identificado en la Estrategia Nacional de Aguas Subterráneas de 2017. También ha afectado al despliegue nacional de la estrategia RGA, cuya última actualización del sitio web se realizó en 2011.

En cuanto a la legislación (tema 2 del cuadro 14), un avance importante en el nuevo entorno de gestión de los recursos hídricos es que todos los usos del agua, incluidos el uso de las aguas subterráneas y el RGA, tienen que estar registrados y autorizados en términos de la Ley Nacional del Agua de 1998. En el año 2000 se llevó a cabo una campaña de registro de los usos de las aguas subterráneas, lo que supuso la primera evaluación nacional de dichos usos. El mecanismo más importante para que las aguas subterráneas sean plenamente operativas en el marco de la Ley Nacional del Agua de 1998 es el mecanismo de autorización del uso del agua. En general, un uso del agua debe estar autorizado (a menos que figure como uso de la lista 1 en la Ley), como uso legal registrado existente o estar permitido en virtud de una autorización general. La autorización ofrece al gobierno la oportunidad de establecer requisitos y orientaciones de gestión específicos. Esta medida de gestión crítica ha tardado en tener un impacto real, porque todo el enfoque se ha orientado a las aguas superficiales y no atiende a las características y requisitos de gestión únicos de las aguas subterráneas.

En cuanto a la planificación (tema 3), la planificación nacional del agua ha avanzado en la incorporación de las aguas subterráneas. Un paso importante fue que las aguas subterráneas pasaran a formar parte de un programa nacional para desarrollar estrategias de conciliación del agua para las Áreas de Gestión del Agua, ciudades y pueblos de todo el país, a partir de 2008. Estos estudios proporcionan el potencial de uso de las aguas subterráneas en cada municipio a escala local e identifican los posibles acuíferos objetivo en los alrededores. Asimismo, se han elaborado diversas directrices que abordan aspectos del desarrollo y la gestión sostenibles de los recursos hídricos subterráneos. Una importante directriz de apoyo ha sido una evaluación mediante SIG de las zonas de todo el país en las que la recarga artificial puede ser factible y una lista de posibles zonas en las que la recarga artificial puede ayudar a mitigar los problemas de recursos hídricos (DWAF, 2009). Aunque la planificación está bien establecida a nivel nacional, todavía (en 2021) no hay planes de gestión de cuencas (estrategias a nivel regional), tal como se prevé en la Ley Nacional del Agua de 1998. A nivel municipal, cada municipio designado como Autoridad de Servicios de Agua, debe desarrollar un Plan de Desarrollo de Servicios de Agua y también debe tener en cuenta la sostenibilidad del suministro de agua. Este nivel sigue adoleciendo de una grave falta de capacidad técnica.

Un fallo clave es la falta de seguimiento y evaluación de los recursos de aguas subterráneas más allá del nivel nacional. Esta carencia frena la mayor parte de la planificación para la aplicación a nivel local. A nivel local se carece incluso de los datos más básicos sobre el nivel del agua, lo que impide evaluar si la RGA puede ser una opción

viable. Esto está relacionado con la falta de capacidad y recursos para la gestión de las aguas subterráneas en los niveles inferiores.

Namibia, donde se han presentado como estudios de caso los planes OmDel y Windhoek RGA, tiene un entorno institucional más estable. Desde 1997, el desarrollo de los recursos hídricos y su gestión corren a cargo de la Namibia Water Corporation (NamWater), una empresa estatal que vende agua a granel a las autoridades locales. En el caso de Windhoek, la ciudad (municipio) también disponía de sus propios pozos y tenía muchos años de experiencia en el desarrollo y la explotación del campo de pozos del acuífero de Windhoek. En ambos casos, la atención prestada al seguimiento y a la investigación sirvió de base a la decisión de seguir invirtiendo en la RGA, lo que permitió una planificación adecuada y la comparación de costes con otras alternativas.

El estudio de caso de Plettenberg Bay pone de manifiesto una combinación de varios de los fallos institucionales de la gobernanza de las aguas subterráneas mencionados anteriormente. La falta de progreso en la aplicación de la RGA en Cape Flats, a pesar de su evidente necesidad y de la continua promoción de la RGA y del desarrollo de conocimientos y tecnología durante más de 40 años, ilustra aún más (como se analiza en el apartado 9.3) la importancia de un entorno de gestión de los recursos hídricos en el que el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos esté plenamente integrado e institucionalizado.

9.3 Deficiencias Institucionales: El caso del acuífero de Cape Flats

Ciudad del Cabo es una ciudad costera en rápido crecimiento, con más de 4 millones de habitantes en la región del Cabo Occidental de la República de Sudáfrica. La ciudad recibe aproximadamente el 98,5% de su suministro de agua de los recursos hídricos superficiales. La mayor parte de las precipitaciones en el Cabo Occidental caen durante los meses de invierno (de mayo a septiembre), por lo que la escorrentía generada durante este periodo debe almacenarse para satisfacer la demanda de agua de la ciudad durante todo el año, en particular durante los picos de demanda en el caluroso y seco verano. Para almacenar la escorrentía invernal, se utiliza una red de presas mayores y menores que forman el Sistema de Abastecimiento de Agua del Cabo Occidental.

El proyecto del acuífero de Cape Flats fue iniciado en 1966 por la Administración Provincial del Cabo, motivado por la previsión de escasez de agua para el área metropolitana de Ciudad del Cabo y sus alrededores. El acuífero de Cape Flats se compone de depósitos sedimentarios fluviales, marinos y eólicos, es predominantemente no confinado y alcanza espesores de hasta 55 m, como se muestra en la **Figura 48**. Entre 1973 y 1979, la Comisión de Investigación sobre el Agua financió el proyecto y amplió su alcance para dar cabida a diversos aspectos multidisciplinarios (por ejemplo, la viabilidad de almacenar agua del río Eerste en los depósitos de arena adyacentes a la costa de False Bay y, en particular, el papel que podría desempeñar el acuífero en términos de recuperación,

infiltración, almacenamiento y extracción de efluentes cloacales depurados). Para ello, serían viables las cuencas de infiltración o los pozos de inyección. En 1980 se había desarrollado un modelo numérico del acuífero que podía utilizarse para delimitar el potencial de Cape Flats e investigar escenarios de desarrollo de las aguas subterráneas. Se expresó la preocupación de que las zonas más adecuadas para la recarga y la extracción se estaban utilizando cada vez más para proyectos de viviendas de alta densidad (Tredoux et al., 1980).

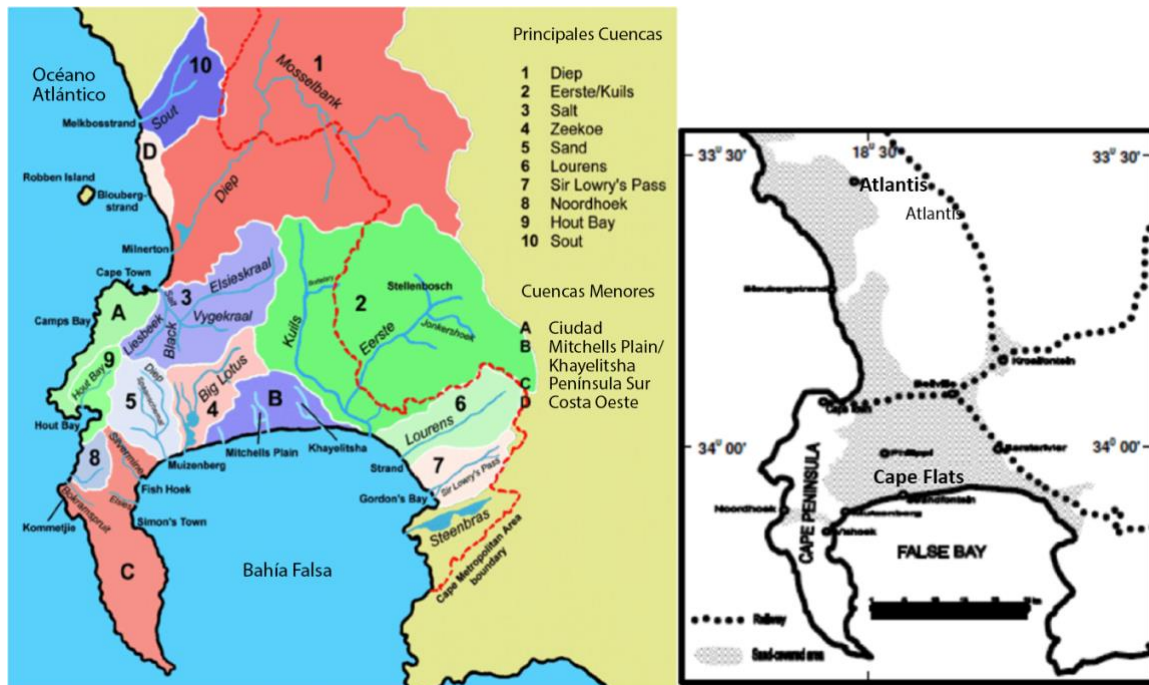


Figura 48 - El área metropolitana del Cabo, con importantes captaciones y asentamientos sobre las arenas de Cape Flats (Adelana et al., 2014).

El grupo de trabajo de dicho proyecto propuso que el desarrollo de las aguas subterráneas comenzara en 1981. Sin embargo, el Ayuntamiento de Ciudad del Cabo, la autoridad local responsable del suministro de agua en la metrópolis, decidió no desarrollar el acuífero de Cape Flats. Se sabía que el Ayuntamiento prefería el agua superficial de alta calidad de las cuencas montañosas del Cabo Occidental a sus propios recursos de agua subterránea, de peor calidad. Otro plan, una gran presa en el río Berg, fue finalmente aprobado por el Gabinete sudafricano en 2002, tras una considerable oposición del sector medioambiental y de las partes interesadas y afectadas, que priorizaron las opciones de conciliación de la demanda y el suministro de agua.

En 1996, el Departamento nacional de Asuntos Hídricos y Silvicultura, a través de su Análisis de Sistemas del Cabo Occidental, estableció un nuevo objetivo para que el plan de Cape Flats estuviera operativo en 2005. En él se constataba que el acuífero de Cape Flats seguía siendo un recurso viable, ya que podían extraerse del orden de 15 a 20 Mm³ anuales a un costo unitario muy favorable de 0,03 US\$/m³ (Wright y Conrad, 1995). Una vez más, no hubo respuesta por parte de la Ciudad del Cabo. En 2005, otros estudios revelaron que

los recursos de aguas subterráneas de Cape Flats se habían deteriorado en las últimas décadas y ahora no eran potables en algunas zonas, con diversos grados de contaminación. El deterioro se debía a una combinación de pesticidas y fertilizantes procedentes de prácticas agrícolas, plantas de tratamiento de aguas residuales, numerosos vertederos, asentamientos informales, canales sin revestimiento o con fugas y tuberías de alcantarillado con fugas. La eliminación de las dunas de arena y la invasión del desarrollo urbano, en particular de los asentamientos informales, en las zonas bajas de los humedales habían provocado inundaciones todos los inviernos, ahora potenciadas por la recarga urbana y el elevado nivel de las aguas subterráneas. Además, las floraciones periódicas de fitoplancton a lo largo de la costa de False Bay habían empeorado, afectando a los ecosistemas marinos y de playa (Adelana y Xu, 2006; Hay, et al., 2015; Mauck, 2017).

Un estudio de seguimiento encargado por el Departamento de Asuntos Hídricos para desarrollar un enfoque de gestión de acuíferos urbanos para la ciudad de Ciudad del Cabo recomendó un conjunto de soluciones múltiples que podrían funcionar simultáneamente. A corto plazo, las aguas subterráneas no potables deberían suministrarse a usuarios de pequeña escala para el riego, como escuelas, campos deportivos, parques y jardines comunitarios. Aunque esto proporcionaría algún beneficio del acuífero, la solución inmediata era reducir y limitar sistemáticamente la contaminación del acuífero. La biorremediación se consideró como un método potencial para remediar el acuífero, utilizando para ello humedales y vleis (pantanos) naturales o artificiales. El suministro a gran escala a mediano plazo podría lograrse combinando la recarga artificial y la extracción. Un beneficio adicional de la recarga artificial y la captación sería la remediación del acuífero. Al recargar el acuífero con agua de buena calidad, ésta circularía, diluyendo y limpiando en última instancia las aguas subterráneas contaminadas del acuífero (Hay et al., 2015).

Las medidas prácticas del Ayuntamiento de Ciudad del Cabo sólo se produjeron después de que esta ciudad experimentara una sequía especialmente grave entre 2017 y 2018 (la peor en más de 100 años) tras varios años de escasas precipitaciones. Para gestionar la sequía, la ciudad dio prioridad a la reducción de la demanda de agua y luego racionó el agua restante almacenada en el sistema de suministro. Introdujo restricciones de agua cada vez más estrictas a medida que la escasez de agua se agudizaba progresivamente. Al mismo tiempo, se evaluaron las contingencias de aumento del suministro de agua: una combinación de extracción de aguas subterráneas, reutilización del agua y desalinización. Se mencionó especialmente la necesidad de recargar el acuífero de Cape Flats con aguas residuales y pluviales tratadas. La reciente Estrategia del Agua de la ciudad pretende adoptar un enfoque más holístico de la gestión del agua y establece cinco compromisos, a saber (Ciudad del Cabo, 2019):

1. acceso seguro al agua y al saneamiento
2. uso inteligente;

3. agua suficiente y fiable procedente de diversas fuentes
4. beneficios compartidos de los recursos hídricos regionales; y
5. una ciudad sensible al agua.

En el punto 3 de la estrategia, la ciudad se compromete a aumentar el suministro disponible en aproximadamente 300 millones de litros/día durante los próximos diez años a partir de aguas subterráneas, reutilización de agua y agua desalinizada, todo ello con el objetivo de aumentar la resiliencia de forma rentable y oportuna y reducir sustancialmente la probabilidad de que se produzcan graves restricciones de agua en el futuro (Ciudad del Cabo, 2019). Esto requerirá la diversificación de las fuentes de agua y una comprensión mucho mejor del sistema, incluidos los aspectos ambientales, físicos, sociales, financieros, económicos y políticos, y un nuevo enfoque para gestionar el sistema más allá de centrarse en la infraestructura (Parks et al., 2019; Ziervogel, 2019).

9.3.1 RGA y la creciente urbanización

En cuanto al punto 5 de la estrategia, la Ciudad del Cabo (2019) declaró que:

“facilitará activamente la transformación de Ciudad del Cabo a lo largo del tiempo en una ciudad sensible al agua que haga un uso óptimo de las aguas pluviales y de las vías fluviales urbanas para el control de inundaciones, la recarga de acuíferos, la reutilización del agua y la recreación, y que se base en sólidos principios ecológicos. Esto se hará a través de nuevos incentivos y mecanismos reguladores, así como a través de la forma en que la ciudad invierte en nuevas infraestructuras.”

Con la intensificación del uso de la tierra y el aumento de la urbanización, los conocimientos y los requisitos institucionales para la RGA han vuelto a aumentar considerablemente. Es oportuno que la Comisión de Investigación del Agua de Sudáfrica, defensora de los recursos hídricos subterráneos y de la recarga artificial durante tantos años, haya asumido el reto con un nuevo proyecto muy relevante: "Desarrollo y Gestión de las Aguas Subterráneas Urbanas", que permite comprender mejor los procesos de las aguas subterráneas en este entorno y que se incluyan plenamente en el "Diseño Urbano Sensible al Agua" (Seyler et al., 2019).

En términos de implementación, la ciudad está actualmente en posesión de licencias en términos de la Ley Nacional del Agua de 1998 tanto para la extracción de aguas subterráneas como para la práctica de la RGA. Actualmente se está revisando un protocolo de monitoreo para un sistema de RGA. Durante 2018, se perforaron 159 pozos de sondaje en el acuífero de Cape Flats con un rendimiento total de 41 millones de litros/día. Ya se está construyendo la infraestructura para el tratamiento del agua del sistema de RGA en forma de dos plantas de ósmosis inversa, así como las tuberías hasta los lugares de inyección. La ciudad también ha estudiado la implantación de la RGA en el entorno rocoso

predominantemente fracturado del acuífero del grupo Table Mountain (Lasher-Scheepers, 2020).

Si bien la Comisión de Investigación del Agua ha buscado activamente el desarrollo de conocimientos y tecnologías de RGA para el acuífero de Cape Flats hace más de 40 años, es la cuestión más amplia del desarrollo sostenible de los recursos de aguas subterráneas la que todavía no ha sido abordada plenamente por el gobierno nacional de Sudáfrica. Si se hubiera desarrollado sistemáticamente la normativa de la Ley Nacional del Agua de 1998 para gestionar los aspectos singulares de los recursos hídricos subterráneos, los sistemas acuíferos importantes y vulnerables, como el de Cape Flats, se habrían identificado en una fase temprana. En ese momento, se podrían haber tomado medidas proactivas para su protección y desarrollo y se podrían haber creado instituciones adecuadas para su desarrollo y gestión local.

10 Conclusión

Se han logrado excelentes avances en todos los aspectos relacionados con el conocimiento y la promoción de la recarga artificial en Sudáfrica. Esto ha sido impulsado por la Comisión de Investigación del Agua con sus programas de investigación y desarrollo durante casi 50 años. Se creó una gran oportunidad cuando el Departamento de Asuntos Hídricos y Silvicultura, con el apoyo de la Comisión de Investigación del Agua, elaboró una detallada Estrategia de Recarga Artificial para *"utilizar el almacenamiento natural subterráneo como parte de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en cualquier lugar tecnológico, económico, ambiental y socialmente factible"*.

El obstáculo para un despliegue sistemático de esta tecnología ha sido la falta de desarrollo institucional para la utilización y gestión sostenible de los recursos de agua subterránea en Sudáfrica – a nivel local (ciudad), soporte a nivel regional y a nivel de políticas nacionales.

10.1 El camino a seguir hacia una Buena gobernanza de las aguas subterráneas

El camino a seguir para este obstáculo globalmente problemático se expresa mejor en una importante iniciativa mundial reciente: "Gobernanza de las aguas subterráneas: un marco global para la acción" (de Chaisemartin et al., 2017). Su visión subraya el importante papel de las aguas subterráneas en el mundo, la dependencia de los seres humanos y los ecosistemas sobre ellas y la existencia de importantes amenazas sobre los recursos subterráneos. Todos estos factores exigen una buena gobernanza de las aguas subterráneas, guiada, en particular., por los siguientes principios de trabajo:

- El agua subterránea no debe manejarse de forma aislada, sino en conjunto, según corresponda, con otras fuentes de agua para mejorar la seguridad hídrica y la salud de los ecosistemas;
- La calidad de las aguas subterráneas y la cantidad de recursos deben administrarse conjuntamente y, por lo tanto, la gestión de las aguas subterráneas debe armonizarse con la gestión de la tierra;
- La gobernanza eficaz de las aguas subterráneas requiere la gobernanza conjunta del espacio subterráneo;
- Se requiere la integración vertical entre los niveles de gestión de recursos, nacional y local, en la elaboración e implementación de planes de gestión y protección de aguas subterráneas; y,
- Debe establecerse una coordinación con las macropolíticas de otros sectores, como la agricultura, la energía, la salud, el desarrollo urbano e industrial y el medio ambiente.

La necesidad de una buena gobernanza del agua subterránea es particularmente importante en las áreas urbanas debido a la presión ejercida sobre los recursos hídricos por

tasas de crecimiento de la población y de urbanización sin precedentes, lo que resulta en una “*crisis generalizada de la gobernanza del agua urbana, particularmente en los países en desarrollo*” (Howard, 2015).

Los especialistas en aguas subterráneas no necesitan sentarse con los brazos cruzados porque el tema institucional del agua subterránea puede parecer fuera de su competencia y responsabilidad. La Estrategia Nacional de Aguas Subterráneas (Departamento de Agua y Saneamiento, 2017) hace hincapié en los caminos a seguir en este sentido, en los que las personas y la profesión en su conjunto pueden desempeñar un papel fundamental.

Se han citado sabias palabras en la introducción de una propuesta de 1995 para seguir adelante con el desarrollo del acuífero Cape Flats, como un esfuerzo conjunto sin más demoras. Solo se puede esperar que 25 años después, esta sabiduría finalmente prevalezca.

“Nunca se intentará nada si primero deben superarse todas las posibles objeciones”.
(Samuel Johnson).

11 Ejercicios

Ejercicio 1

Describe brevemente lo que entiendes sobre a) la recarga natural y b) la recarga artificial de un acuífero.

Describe por qué la c) recarga gestionada de acuíferos y d) almacenamiento y recuperación de acuíferos pueden ser una terminología más apropiada que la recarga artificial para esta práctica.

Use Internet para investigar y describir cómo se ha utilizado en Sudáfrica un nuevo término general e) "soluciones basadas en la naturaleza", y puede agregar una dimensión adicional a la terminología de RGA.

[Click aquí para solución al ejercicio 1 ↴](#)

Ejercicio 2

Usted es un consultor de Europa o los Estados Unidos y ha sido llamado a un lugar en el sur de África donde los niveles de agua subterránea en un acuífero para el suministro de agua urbana están cayendo, aparentemente de manera insostenible. Su cliente requiere una investigación de la factibilidad de RGA para tratar el problema. Describa brevemente los elementos del proceso de planificación/investigación que seguiría antes de poder recomendar invertir o no en RGA en este lugar.

[Click aquí para solución al ejercicio 2 ↴](#)

Ejercicio 3

Ha encontrado que la RGA es una opción factible en su proceso de planificación anterior. Describa al menos 4 tecnologías de RGA diferentes y su idoneidad para diferentes entornos superficiales y subterráneos que puede encontrar en el sur de África. Como probablemente haría si lo contrataran para realizar dicha evaluación, use el conocimiento que obtuvo de este libro junto con Internet para investigar a) las condiciones en el sur de África y b) las tecnologías de RGA, luego c) presente las posibles tecnologías.

[Click aquí para solución al ejercicio 3 ↴](#)

12 Referencias

- Adelana, M. and Y., Xu, 2006, Contamination and protection of the Cape Flats aquifer, South Africa, *in* Groundwater Pollution in Africa, editors, Y. Xu and B. Usher. Taylor and Francis, pages 265-277. https://www.researchgate.net/publication/265728781_Contamination_and_protection_of_the_Cape_Flats_Aquifer_South_Africa.
- Adelana, M., Y. Xu, and P. Vrbka, 2014, Hydrogeochemical characterization of the Cape Flats aquifer (South Africa): Constraints for water supply augmentation, *in* Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices, Chapter: 3, editor: S.M. Adelana. Nova Science Publishers Incorporated, New York, USA. https://www.researchgate.net/publication/266343087_Hydrogeochemical_characterization_of_the_Cape_Flats_aquifer_South_Africa_Constraints_for_water_supply_augmentation.
- Amwele E., A.P. Ausiku, A.K. Lugambo, E. Toivo, H. Bernhardt, I. Fillemon, K. Israel, M. Rodrick, M. Moses, M. Mkwetu, N. Isaac, N. Ntandozenkosi, S.M. Ndahafa, S. Veronica, and T.D. Nandjamba, 2004, Water balance, use and management in the Omaruru Basin, *in* Occasional Paper XX, editors, E.S. Aitana, K. Ganeb, B. Hamilton, M. Lundgren, N. Manning, K. Nantanga, T. Parr, S. Pettersen, M. Seely and G. Van Langenhove. Desert Research Foundation of Namibia, <http://the-eis.com/elibrary/search/11551>.
- Baumeler, H.P., 2017, [Swakoppoort Dam](#), licensed under [CC BY-SA 4.0](#).
- Baumeler, H.P., 2018, [Omaruru River](#), is licensed under [CC BY-SA 4.0](#).
- Beekman, H.E. and Y. Xu, 2003, Groundwater recharge estimation in Southern Africa. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), International Hydrological Programme (IHP), series number 64, UNESCO Paris, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000132404.locale=en>.
- Bitou Municipality, 2017, Effects of the drought disaster. Bitou Municipality News, media release on September 5, <https://www.bitou.gov.za/effects-drought-disaster>.
- Bitou Municipality, 2019, Bitou municipality's disaster risk assessment: Summarised report, http://www.bitou.gov.za/download_document/3303.
- Braune, E., 2007, Contributions of science and technology to water development and use in Southern Africa, *in* Our Water Our Culture, editor, L. van Vuuren. Water Research Commission (WRC), Pretoria, South Africa.
- Braune, E., B. Hollingworth, Y. Xu, M. Nel, G. Mahed, and H. Solomon, 2008, Protocol for the assessment of the status of sustainable utilization and management of groundwater resources with special reference to Southern Africa. Water Research Commission, Pretoria, South Africa.

- Braune, E. and Y. Xu, 2008, The role of ground water in Sub-Saharan Africa. *Groundwater Journal*, volume 48, issue 2, pages 229-238, [doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00557.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00557.x).
- Braune, E., S. Adams, and F. Fourie, 2014, Twenty years of groundwater research, development, and implementation in South Africa. Water Research Commission Report SP 78/14, South Africa, <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/20%20years%20of%20groundwater.pdf>.
- Bugan, R.D.H., N. Jovanovic, S. Israel, G. Tredoux, B. Genthe, M. Steyn, D. Allpass, R. Bishop, and V. Marinus, 2016, Four decades of water recycling in Atlantis (Western Cape, South Africa): Past, present future. *Water South Africa*, volume 42, number 4, [doi: 10.4314/wsa.v42i4.08](https://doi.org/10.4314/wsa.v42i4.08).
- Christelis, G. and W. Struckmeier (editors), 2001, Groundwater in Namibia - an explanation to the hydrogeological map, http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/yearbgeschlossen/TZ/Namibia/groundwater_namibia.pdf?blob=publicationFile.
- Christelis, G., 2019, Field excursion Omdel aquifer, Managed Aquifer Recharge [MAR] of the Omdel aquifer in an arid environment, the Namibia example. *China Africa Water Forum*, number 7.
- City of Cape Town, 2019, Cape Town water strategy – our shared water future. Draft for comment, version 1.6, January 2019.
- CuveWaters, 2015, Integrated Water Resources Management in Northern Namibia, <http://www.cuvewaters.net>.
- de Chaisemartin M. et al., 2017, Addressing the groundwater governance challenge *in* *Freshwater Governance for the 21st Century*, editor, E. Karar, *Global Issues in Water Policy*, volume 6, Springer, [doi: 10.1007/978-3-319-43350-9_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43350-9_11).
- DWAF, 1998, Department of Water Affairs and Forestry, Quality of domestic water supplies –Volume: I Assessment Guide, second edition. Water Research Commission, number: TT 101/98, ISBN No: 1-86845-416-9.
- DWAF, 2007, Department of Water Affairs and Forestry, Artificial recharge strategy, version 1.3 *in* *Strategy development: a national approach to implement artificial recharge as part of water resource planning*, Pretoria, South Africa, <http://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/yearRStrategySectD.pdf>.
- DWAF, 2008, Department of Water Affairs and Forestry, The Assessment of Water Availability in the Berg Catchment (WMA 19) by Means of Water Resource Related Models: Groundwater Model Report Volume 6–Langebaan Road and Elandsfontein Aquifer System Model. Prepared by Umvoto Africa (proprietary) limited in association with Ninham Shand (proprietary) limited on behalf of the Directorate. National Water Resource Planning, DWAF Report No. P WMA 19/000/00/0408.
- DWAF, 2009, Department of Water Affairs and Forestry, Strategy and guideline development for national groundwater planning requirements. Potential Artificial Recharge Areas in South Africa, PRSA000/00/11609/1 - Activity 14 (AR04).

- DWAF, 2010, Department of Water Affairs and Forestry, The Atlantis water resource management scheme: 30 years of artificial recharge. Strategy and guideline development for national groundwater planning requirements, Pretoria, South Africa. DWAF Report No. PRSA 000/00/11609/10 – Activity 17 (AR5.1).
- DWS, 2016, Department of Water and Sanitation, South Africa, Development of Reconciliation Strategies for All Towns in the Southern Planning Region, Hopefield, Saldanha Bay Local Municipality, version 2.
- Department of Water and Sanitation (DWS), 2017, National groundwater strategy. Pretoria, South Africa.
- Dillon, P., P. Stuyfzand, T. Grischek, M. Lluria, R.D.G. Pyne, R.C. Jain, J. Bear, J. Schwarz, W. Wang, E. Fernandez, C. Stefan, M. Pettenati, J. van der Gun, C. Sprenger, G. Massmann, B.R. Scanlon, J. Xanke, P. Jokela, Y. Zheng, R. Rossetto, M. Shamrukh, P. Pavelic, E. Murray, A. Ross, J.P. Bonilla Valverde, A. Palma Nava, N. Ansems, K. Posavec, K. Ha, R. Martin, and M. Sapiano, 2019, Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal* volume 27, pages 1–30, [doi: 10.1007/s10040-018-1841-z](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z).
- Drießen, C. and A. Jokisch, 2011, Technical report on historic pump storage dams (Stengel Dams) in central northern Namibia, [doi: 10.13140/RG.2.2.35175.65446](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35175.65446).
- Du Pisanie, P., 2007, Windhoek Namibia: a case study in water supply in an arid environment. PowerPoint Presentation.
- Du Plessis, J.A., 2009, Managing the unseen: Langebaan Road aquifer system. *Water SA*, volume 35, number 2, [doi: 10.4314/wsa.v35i2.76730](https://doi.org/10.4314/wsa.v35i2.76730).
- Earthwise contributors, 2019, Hydrogeology of Namibia. Africa Groundwater Atlas, Earthwise. <http://earthwise.bgs.ac.uk/>.
- Ebrahim, G.Y., J.F. Lautze, and K.G. Villholth, 2020, Managed aquifer recharge in Africa: taking stock and looking forward. *Water*, volume 12, issue 7, page 1844, [doi: 10.3390/w12071844](https://doi.org/10.3390/w12071844).
- EMG, 2011, Drought in Eden, An exploration of the 2009/10 drought in the southern Cape, Eden District Municipality, in terms of municipal responses, community impacts and lessons for water and climate change, Environmental Monitoring Group Water and climate change research series, report 4, prepared by Tarryn Pereira.
- Engelbrecht, J.F.P., G. Tredoux, and L. Soltau, 2009, Langebaan Road aquifer artificial recharge study: pilot phase recharge. Report number CSIR/NRE/WR/ER/2009/0099/B submitted to Department of Water Affairs, Pretoria, South Africa.
- Excellent, 2012, Sand Dams Will Transform Millions of Lives, <https://en.calameo.com/read/00151136288482e7158dc>.
- Foster, S., A. Tuinhof, and F. van Steenberg, 2012, Managed groundwater development for water-supply security in Sub-Saharan Africa: investment priorities. *Water SA*, volume 38, number 3, [doi: 10.4314/wsa.v38i3.1](https://doi.org/10.4314/wsa.v38i3.1).

- Gale, I., 2005, Strategies for MAR in semi-arid areas. International Association of Hydrogeologists (IAH), Commission on Managed Aquifer Recharge, and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], <https://unesdoc.unesco.org/yearrk:/48223/pf0000143819>.
- Geyh, M.A. and D. Ploethner, 1995, Groundwater isotope study in the Omaruru River delta aquifer, central Namib desert, Namibia. International Association of Hydrological Sciences, number 232, http://hydrologie.org/redbooks/year232/iahs_232_0163.pdf.
- Global Water Partnership South Africa (GWP), 2009, Integrated Water Resources Management (IWRM) survey and status report: Namibia. Desert Research Foundation of Namibia (DRFN), <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-saf-files/namibia-iwrm-report.pdf>.
- Groundwater Africa, 2012, Managed Aquifer Recharge (MAR): Support to the Department of Water Affairs, Botswana. Final report, South Africa.
- Hay, R., D. McGibbon, F. Botha, and K. Riemann, 2015, Cape Flats aquifer and False Bay – opportunities to change. Paper 16, Institute of Municipal Engineers (IMESA) Conference, Cape Town, South Africa, <https://www.imesa.org.za/wp-content/uploads/2015/11/Paper-16-Cape-flats-aquifer-and-false-bay-Opportunities-to-change-Rowena-Hay.pdf>.
- Heyns, P.S., J. Montgomery, and M.K. Seely, 1998, Namibia's water, a decision maker's guide. Desert Research Foundation of Namibia and Department of Water Affairs, Windhoek, Namibia.
- Holloway, A., G. Fortune, P. Zweig, L. Barrett, A. Benjamin, V. Chasi, and J. de Waal, 2012, Eden & Central Karoo drought disaster 2009-2011: "the scramble for water". University of Stellenbosch Report, reference number LG 10/2011/2012, [doi: 10.13140/RG.2.1.3179.8009](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3179.8009).
- Howard, K.W.F., 2015, Urban rural tensions and opportunities for co-management. Thematic Paper 3: Groundwater Governance - A Global Framework for Action, <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/onu//newsletter15/968-eng-v3.pdf>.
- IMESA, 2010, Sedgefield water augmentation case study by N. Perring, K. Turner, and H. Erwee, paper 7, Conference and Exhibition 27-29 October 2010 East London, South Africa. <https://www.imesa.org.za/wp-content/uploads/2015/08/7.pdf>.
- Jovanovic, N., G. Tredoux, R. Bagan, S. Israel, M. Steyn, and B. Genthe, 2014, Provision of professional services for Atlantis water supply scheme - Artificial recharge scientific and operational support. Report to Bulk Water Operations: Bulk Water Branch, Water and Sanitation Department, Utility Services Directorate, City of Cape Town, March 2014, South Africa.
- Jovanovic, N., G. Tredoux, S. Israel, R. Bagan, T. Kanyerere, N. Vermaak, F. Fourie, C.W. Andries, M. Van der Schyff, and H. Zhang, 2019, Towards the sustainable exploitation of groundwater resources along the West Coast of South Africa, Deliverable 5 -

- Technical Report: Modeling Managed Aquifer Recharge. Water Research Commission, Report number K5/2744.
- Kirchner, J., 1981, An updated evaluation of the Windhoek groundwater resources. Department of Water Affairs Technical Report, Windhoek.
- Kirchner, J. and A. van Wyk, 2001, Overview of the Windhoek city water supply in Groundwater in Namibia - an explanation to the Hydrogeological Map, G. Christelis and Struckmeier, Department of Water Affairs, Namibia.
- Lasher-Scheepers, C., 2020, Personal communication, principal professional officer: geohydrology, bulk water and infrastructure planning. Lecture notes prepared for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria.
- Lau, B., and C. Stern, 1990, Namibian water resources and their management: A preliminary history, including excerpts from unpublished sources (Archeia), National Archives of Namibia, <https://www.chapter1.co.za/product/4166915/Namibian-water-resources-and-their-management-A-preliminary-history-including-excerpts-from-unpublished-sources-Archeia-Lau-Brigitte--Stern-Christel>.
- Lindhe, A., L. Rosén, P.O. Johansson, and T. Norberg, 2012, Increase of water supply safety by Managed Aquifer Recharge along the North-South carrier – a pre-feasibility study. Chalmers University of Technology, Sweden, https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/208836/local_208836.pdf.
- MacDonald, A.M., H.C. Bonsor, B. Dochartaigh, and R.G. Taylor, 2012, Quantitative maps of groundwater resources in Africa. Environmental Research Letters, volume 7, number 7, page 024009, [doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024009](https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009).
- Mapani, B.S., 2005, Groundwater and urbanization, risks and mitigation: The case for the city of Windhoek, Namibia. Physics and Chemistry of the Earth, volume 30, pages 706–711, [doi: 10.1016/j.pce.2005.08.011](https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.011).
- Mauck, B.A., 2017, The capacity of the Cape Flats aquifer and its role in water sensitive urban design in Cape Town. Doctor of Philosophy Dissertation Thesis, University of Cape Town, South Africa, <http://hdl.handle.net/11427/27293>.
- Menges, W., 2020, Von Bach level nears 90%. The Namibian, News – National, published on February 27, 2020, <https://www.namibian.com.na/198496/archive-read/Von-Bach-level-nears-90pct>.
- Mostert, A.C. and B.M. Matengu, 2019, Managed Aquifer Recharge of the Omdel aquifer in an arid environment – the Namibia example. China Africa Water Forum, number 7.
- Murray, E.C. and G. Tredoux, 1998, Artificial recharge: a technology for sustainable water resource development. Water Research Commission Report, number 842/1/98, <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/842-1-98.pdf>.
- Murray, E.C. and G. Tredoux, 2002, Pilot artificial recharge scheme: testing sustainable water resource development in fractured aquifers. Water Research Commission Report, number 967/1/02, <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/967-1-02.pdf>.

- Murray, E.C., 2002, The feasibility of artificial recharge to the Windhoek aquifer. Unpublished Doctor of Philosophy dissertation thesis, University of Free State, South Africa.
- Murray, E.C., 2016, An overview of Managed Aquifer Recharge in Southern Africa. International Association of Hydrogeologists Newsletter, https://recharge.iah.org/files/2018/02/Southern-Africa-Murray_MAR-in-Southern-Africa-2016.pdf.
- Murray, R., 2004, Wise water management for towns and cities. Water Research Commission, Report no. TT 219/03, Pretoria, South Africa, <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT-219-03.pdf>.
- Murray, R., 2007, Bitou Municipality artificial recharge feasibility study. Groundwater Africa, <https://www.artificialrecharge.co.za/casestudies/plettenberg.pdf>.
- Murray, R., 2008, Artificial Recharge: The intentional banking and treating of water in aquifers. Lecture notes prepared for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria.
- Murray, R., 2009, Artificial Recharge: The intentional banking and treating of water in aquifers. Lecture notes prepared for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria.
- Murray, R. and J. Harris, 2010, Water banking: a practical guide to using artificial groundwater recharge. Department of Water Affairs.
- Murray, R. and P. Ravenscroft, 2010, Potential artificial recharge schemes – planning for implementation. Department of Water Affairs, Pretoria, South Africa.
- Murray, R., 2017, Managed Aquifer Recharge: An introductory guide for the Southern African Development Community - Groundwater Management Institute [SADC-GMI] including the Windhoek case study. SADC-GMI, Bloemfontein, South Africa, <https://sadc-gmi.org/2017/03/12/training-managed-aquifer-recharge-held-safari-court-hotel-windhoek-namibia-2-march-2017/>.
- Murray, R., D. Louw, B. van der Merwe, and I. Peters, 2018, Windhoek, Namibia: from conceptualizing to operating and expanding a MAR scheme in a fractured quartzite aquifer for the city's water security. Sustainable Water Resources Management, volume 4, pages 217–223, [doi: 10.1007/s40899-018-0213-0](https://doi.org/10.1007/s40899-018-0213-0).
- National Research Council, 2008, Prospects for managed underground storage of recoverable water. The National Academies Press, <http://www.nap.edu/catalog/12057.html>.
- News24, 2009, <https://www.news24.com/news24/municipalities-warned-over-water-20090512>, <https://www.news24.com/news24/water-water-not-everywhere-20090113>.
- Nilsson, A., 1988, Groundwater dams for small-scale water supply. Practical Action Publishing, <https://practicalactionpublishing.com/book/942/groundwater-dams-for-small-scale-water-supply>.

- Parks, R., M. McLaren, R. Toumi, and U. Rivett, 2019, Experiences and lessons in managing water from Cape Town. Grantham Institute Briefing, paper number 29, Imperial College, London, [doi: 10.25561/67992](https://doi.org/10.25561/67992).
- Peters, I., 2014, personal communication regarding the Windhoek Managed Aquifer Recharge. Presentation - City of Windhoek.
- Pietersen, K. and R. Parsons (editors), 2001, A synthesis of the hydrogeology of the Table Mountain group – formation of a research strategy. Water Research Commission Report number TT 158/01, Pretoria, South Africa, <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT-158-01.pdf>.
- Postel, S., 1992, Last oasis-facing water scarcity. Routledge, <https://www.routledge.com/The-Last-Oasis-Facing-Water-Scarcity/Postel/p/book/9781853831485>.
- Quayle, T., 2012, Atlantis, South Africa - Recycling wastewater to bolster ground water supply: the Atlantis story. ACCESSanitation Case Study, Council for Scientific and Industrial Research and City of Cape Town, South Africa, http://www.awasla.org/Docs/yearACCESS_Case_study_Atlantis_SA.pdf.
- Raynor, L.J., 2014, An analysis of the impacts of Sedgelyield's 2009/2010 drought response on water security, Mini-Dissertation (MOB791), Masters in Environmental Management, Faculty of Natural and Agricultural Sciences. University of the Free State, <https://www.naturesvalleytrust.co.za/assets/Uploads/Raynor-2014.pdf>.
- Riemann, K., D. Louw, N. Chimboza and M. Fubesis, 2011, Groundwater management framework. Water Research Commission, Report number 1917/1/10, Pretoria, South Africa, <http://wrcwebsite.azurewebsites.net/wp-content/uploads/mdocs/1917-1-101.pdf>.
- Robey, K. and G. Tredoux, 2013, In-Situ iron removal: Innovative option for preventing production borehole clogging, Groundwater Division Conference, Durban, 17-19 September 2013, https://www.researchgate.net/publication/271329117_IN-SITU_IRON_REMOVAL_INNOVATIVE_OPTION_FOR_PREVENTING_PRODUCTION_BOREHOLE_CLOGGING.
- Rogers, J., 1980, First report on the Cenozoic sediments between Cape Town and Elandsbay. Open File Report 1980 – 0249, Pretoria: Geological Survey of South Africa.
- Sauermann, H.B., 1966, Water storage in sand-filled dams. Council for Scientific and Industrial Research Report MEG 464, Pretoria, South Africa.
- Seyler H., K. Witthüser, and M. Holland, 2016, The capture principle approach to sustainable groundwater use incorporating sustainability indicators and decision framework for sustainable groundwater use. Report to the Water Research Commission.
- Seyler, H., K. Witthüser, and M. Sunaitis, 2019, Urban groundwater development and management. Water Research Commission Report, number 2741/1/19, http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/2741_final.pdf.

- Smith, M., 2006, Prediction, control and rehabilitation of iron encrustation in water supply boreholes, Western Cape, South Africa: a geochemical approach. Doctor of Philosophy Dissertation Thesis, University of Cape Town, Faculty of Science, Department of Geological Sciences, <http://hdl.handle.net/11427/4223>.
- South African National Standards (SANS), 2011, Drinking Water, Part 1: Microbiological, Physical, Aesthetical, Chemical Determinants, SANS241-1:2011. South African Bureau of Standards, Pretoria, South Africa.
- Southern African Development Community (SADC), 2007, Regional Water Strategy. Gaborone, Botswana.
- Southern African Development Community (SADC), 2009, Explanatory brochure for the Southern African Development Community hydrogeological map and atlas, <https://sadc-gip.org/documents/96/download>.
- Stengel, H.W., 1963, Water affairs in South West Africa. Windhoek, Namibia.
- Stengel, H.W., 1966, The rivers of the Namib and their discharge into the Atlantic. Part II: Omaruru and Ugab. Scientific Papers of the Namib Desert Research Station, number 30.
- Timmerman, L.R.A., 1985, Preliminary report on the Geohydrology of the Grootwater Primary aquifer unit between Yzerfontein and the Modder River. Geotechnical Report GH3372, Directorate of Geohydrology, Department of Water Affairs, Cape Town, South Africa.
- Timmerman, L.R.A., 1988, Regional hydrogeological study of the lower Berg River area, Cape Province – South Africa. Faculty of Science, Ghent University, <http://hdl.handle.net/1854/LU-8544626>.
- Travel Guide, 2020, Namaqualand: the blooming desert of South Africa. www.travelguide-en.org.
- Tredoux, G., W.R. Ross, and A. Gerber, 1980, The potential of the Cape Flats Aquifer for the storage and abstraction of reclaimed effluents (South Africa), [doi: 10.1127/zdgg%2F131%2F1980%2F23](https://doi.org/10.1127/zdgg%2F131%2F1980%2F23).
- Tredoux, G., 1987, The role of artificial recharge in groundwater management at Atlantis. Paper presented at the Biennial Conference and Exhibition, Institute of Water Pollution Control, South Africa Branch, Port Elizabeth, South Africa, 12-15 May 1987.
- Tredoux, G. and L. Cavé, 1997, Atlantis Groundwater Management Review 1996/97. Report number ENV/S-C97114, Council for Scientific and Industrial Research, Stellenbosch, South Africa.
- Tredoux, G., P.B. King, and L.C. Cavé, 1999, Managing urban wastewater for maximizing water resource utilization, Water Science and Technology, volume 39, issues 10-11, 353-356, [doi: 10.1016/S0273-1223\(99\)00309-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00309-1).
- Tredoux, G. and L. Cavé, 2002, Atlantis aquifer: a status report on 20 years of groundwater management at Atlantis. Report submitted to the City of Cape Town, South Africa, Council for Scientific and Industrial Research report number ENV-S-C 200269.

- Tredoux, G., E.C. Murray, and L. Cave, 2002, Infiltration systems and other recharge systems in Southern Africa, *in* Management of aquifer recharge and subsurface storage, editors, A. Tuinhof and Heederik, Netherlands National Committee of the International Association of Hydrogeologists [NNC-IAH], publication number 4, https://www.hydrology.nl/images/docs/iah/publications/4_Management_of_Aquifer_Recharge_and_Subsurface_Storage.pdf.
- Tredoux, G., 2007, Down-the-hole hydrogeochemical logging of boreholes for artificial groundwater recharge pilot study at Plettenberg Bay. Report for Groundwater Africa. Council for Scientific and Industrial Research, Natural Resources and Environment Unit, Stellenbosch, South Africa.
- Tredoux, G. and J.F.P. Engelbrecht, 2009, Langebaan Road aquifer artificial recharge study, Pilot phase recharge final report. Report prepared for Department of Environmental Affairs (DEA), number CSIR/NRE/WR/ER/2009/0099/B.
- Tredoux, G., B. Genthe, M. Steyn, J.F.P. Engelbrecht, J. Wilsenacht, and N. Jovanovic, 2009a, An assessment of the Atlantis artificial recharge water supply scheme (Western Cape, South Africa), volume 127, pages 403-413, [doi: 10.2495/RAV090351](https://doi.org/10.2495/RAV090351).
- Tredoux, G., N. Jovanovic, B. Genthe, M. Steyn, and K. Le Corre, 2009b, Reclaim water, a specific targeted research project under the thematic priority 'Global Change and Ecosystems'. Deliverable D4.3, Mass balance-based sustainability analysis for the Atlantis recharge site, European Commission, Brussels, Belgium.
- Tredoux, G. and A.S. Talma, 2009, Langebaan Road aquifer: Environmental isotope and hydro chemical sampling, analysis, and interpretation of samples collected in 2008. Report submitted to West Coast District Municipality, Moorreesburg, South Africa.
- Tredoux, G.; B. Van der Merwe, and I. Peters, 2009c, Artificial recharge of the Windhoek aquifer, Namibia: Water quality considerations. Boletín Geológico y Minero, volume 120, number 2, pages 269-278, http://years.gmi.igme.es/Boletin/2009/120_2_2009/269-278.pdf.
- Tuinhof, A., S. Foster, F. van Steenbergen, A. Talbi, and M. Wishart, 2011, Appropriate groundwater management policy for Sub-Saharan Africa: in face of demographic pressure and climatic variability. World Bank, Washington, D.C., <http://hdl.handle.net/10986/27363>.
- Van der Merwe, A.J., 1983, Exploration, exploitation and evaluation of groundwater in sand deposits in the Atlantis area for water supply to the Atlantis Growth Point (in Afrikaans). Master of Science thesis, University of Free State, Bloemfontein, South Africa.
- Van Rensburg, F., 2006, Urban Water Security in the City of Windhoek. <https://www.sustainabilityinstitute.net/>.
- Van Steenbergen, F. and A. Tuinhof, 2009, Managing the water buffer for development and climate change adaptation – groundwater recharge, retention, reuse and rainwater. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International

- Hydrological Programme [UNESCO-IHP], 91 pages, <https://www.ircwash.org/resources/managing-water-buffer-development-and-climate-change-adaptation-groundwater-recharge>.
- Veolia, 2019, News&Media. Case Studies: Bitou Municipality (Plettenberg Bay), Western Cape, South Africa.
- Water Scarcity Solutions, 2015, Groundwater recharge Omdel Dam, Namibia. Industrial case studies, <https://www.waterscarcitysolutions.org/wp-content/uploads/2015/07/Groundwater-recharge-Omdel-Dam-Namibia.pdf>.
- Water Wheel, 2003, Artificial recharge schemes – a novel method to “bank water”. The Water Wheel, May/June 2003, http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/WaterWheel_Archive_ww-may-jun%2003.pdf.
- Weidlich, B., 2019, Namibia plans future water supply, <https://namibian.org/news/nature-and-environment/water-supply>.
- West Coast District Municipality, 2005, Assessment of the response of the Langebaan Road aquifer system to a 3-month shutdown of the municipal Wellfield. SRK Consulting Engineers, draft report number 335975.
- West Coast District Municipality, 2009, Investigation into alternative water sources for the West Coast District Municipality. Water Study Report, Final, volume 2, Optimization of Existing Sources, compiled by Element Consulting Engineers, project number 07076.
- Wikipedia, 2016, Water supply and sanitation in Namibia. <https://en.wikipedia.org/>.
- Wikipedia, 2021, Swakoppoort Dam. Accessed on June 18, 2021, https://en.wikipedia.org/wiki/Swakoppoort_Dam.
- Wipplinger, O., 1953, The storage of water in sand: an investigation of the properties of natural and artificial sand reservoirs and of methods of developing such reservoirs. Doctor of Science Thesis, Stellenbosch University, <http://hdl.handle.net/10019.1/54014>.
- Woodford, A.C. and M. Fortuin, 2003, Assessment of the development potential of groundwater resources for the West Coast District Municipality. Specialist geohydrological report for Kwezi-V3 Consulting Engineers, as part of the 155 project: Pre-feasibility study of potential water sources for the area served by the West Coast District Municipality, completed by SRK Consulting Engineers and Scientists for Kwezi-V3.
- Wright, A., 1991, The artificial recharge of urban storm water runoff in the Atlantis coastal aquifer. Unpublished Master of Science thesis. Rhodes University, Grahamstown, South Africa, 188 pages, <http://hdl.handle.net/10962/d1005491>.
- Wright, A. and R. Parsons, 1994, Artificial recharge of urban wastewater, the key component in the development of an industrial town on the arid West Coast of South Africa, <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.753963955739309>.
- Wright, A. and J. Conrad, 1995, The Cape Flats Aquifer – current status. Watertek, Council for Scientific and Industrial Research, Stellenbosch, South Africa.

- Xu, Y. and B. Usher (editors), 2006, Groundwater pollution in Africa (first edition), Chemical Rubber Company Press, [doi: 10.1201/9780203963548](https://doi.org/10.1201/9780203963548).
- Xu, Y. and H.E. Beekman, 2019, Review: Groundwater recharge estimation in arid and semi-arid southern Africa. Hydrogeology Journal, volume 27, pages 929–943, [doi: 10.1007/s10040-018-1898-8](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1898-8).
- Zeelie, S., 2004, Omdel (Namibia): Capturing and infiltrating flood runoff in the desert, <http://www.artificialrecharge.co.za/05casestudies.html>.
- Zhang, H., Y. Xu, and T. Kanyerere, 2019, Site assessment for MAR through GIS and modeling in West Coast, South Africa. Water, volume 11, issue 8, page 1646, [doi: 10.3390/w11081646](https://doi.org/10.3390/w11081646).
- Ziervogel, G., 2019, Unpacking the Cape Town drought: lessons learned. Report for Cities Support Programme, African Centre for Cities, University of Cape Town, South Africa.

13 Soluciones a los Ejercicios

Solución al Ejercicio 1

- a) Las aguas subterráneas se recargan a partir de la lluvia que cae sobre la superficie de la tierra, se infiltra a través del suelo y luego por los poros, grietas y fisuras de las formaciones geológicas hasta saturar estos intersticios. Esto es recarga natural. Gran parte de la lluvia se escurre por la superficie o se vuelve a evaporar en la atmósfera, por lo que la magnitud de la recarga natural tiene límites.
- b) La recarga artificial es la práctica de aumentar la cantidad de agua que ingresa a un acuífero por medios controlados por humanos. Por ejemplo, el agua subterránea se puede recargar artificialmente al redirigir el agua a través de la superficie terrestre a través de canales, cuencas de infiltración o estanques desde los cuales el agua se filtra hacia el subsuelo; crear surcos de riego para permitir la infiltración del exceso de agua de riego; usar sistemas de rociadores para regar con agua superficial, parte de la cual se infiltra más allá de las raíces de las plantas; o inyectando agua directamente al subsuelo a través de pozos.
- c) El término 'Artificial' no captura el proceso en el que los humanos mejoran la recarga natural de manera sistemática. Estas deficiencias en el término "Recarga Artificial" han sido superadas por el término ahora generalmente aceptado "Recarga Gestionada de Acuíferos" (MAR).
- d) El término "Almacenamiento y recuperación de acuíferos" se utiliza principalmente en los Estados Unidos y Australia. Describe tanto la inyección de suministros de agua superficial, como de agua potable, aguas residuales recicladas, agua de lluvia recolectada, agua pluvial o agua de río en un acuífero para su posterior recuperación y uso. Este término describe explícitamente que la recarga de acuíferos administrados consiste en colocar agua en el almacenamiento del acuífero y recuperarla para su uso posterior.
- e) En Sudáfrica se ha informado sobre una serie de nuevos esquemas pequeños, similares en importancia local al estudio de caso de Kharkams. El Sr. Fanus Fourie del Departamento de Agua y Saneamiento, un campeón en RGA, las llama "soluciones basadas en la naturaleza" para enfatizar la necesidad de una gestión holística de los recursos hídricos disponibles localmente para las comunidades y los pueblos pequeños. Los únicos recursos naturales que tienen estas pequeñas comunidades son el agua, el suelo y la vegetación. Antes de esperar que los acueductos lleguen a su territorio, estas comunidades deben gestionar su entorno local de forma integrada y sostenible. Se agrega una dimensión adicional en el enfoque de servicios de agua de uso múltiple (SAUM) impulsado por la comunidad, como una alternativa de importancia crítica a los modelos urbanizados de suministro de agua, es decir, el suministro de agua, los medios de subsistencia y la salud se abordan de manera integral y con participación comunitaria.

[Regresar al Ejercicio 1](#) ↑

Solución al Ejercicio 2

La presencia de agua subterránea y las características del acuífero son muy variables de un lugar a otro y dependen de una serie de factores, en particular, la composición hidrogeológica del acuífero y el entorno de recarga natural del lugar. Por lo tanto, la recarga gestionada de acuíferos no es igualmente factible en todos los lugares.

Un profesional de aguas subterráneas necesitará la siguiente información y deberá determinar qué cantidad de esta información puede obtenerse de fuentes publicadas y qué información debe determinarse a través de la investigación del sitio.

- Aclarar el objetivo de la recarga artificial con el cliente: la recarga artificial de las aguas subterráneas normalmente se realiza con algunos o todos los siguientes objetivos en mente:
 - mejorar el rendimiento sostenible en áreas donde el desarrollo excesivo ha agotado el acuífero;
 - conservar y almacenar el exceso de agua superficial para necesidades futuras, ya que las necesidades varían según la temporada y pueden depender periódicamente de otros factores, como el desarrollo;
 - mejorar la calidad de las aguas subterráneas existentes mediante la dilución;
 - eliminar las impurezas bacteriológicas y de otro tipo de las aguas negras y residuales para que el agua sea apta para su reutilización; y,
 - restaurar el suministro de agua a los acuíferos agotados debido al desarrollo excesivo de aguas subterráneas.
- Desarrollar una comprensión de la influencia sociopolítica que facilitaría o impediría algunas de las posibles opciones técnicas para la RGA.
- Identificar áreas potenciales de recarga donde el agua podría infiltrarse y llegar al acuífero, o ser inyectada
- Identificar fuentes de agua potenciales y determinar su calidad con respecto a los constituyentes suspendidos y disueltos
- Evaluar el potencial del acuífero para recibir agua de recarga artificial tanto física (para permitir que el agua fluya fácilmente desde el sitio de recarga hacia el acuífero) como químicamente (que la obstrucción disminuya la posibilidad de que el agua ingrese al acuífero no ocurrirá)

[Regresar al Ejercicio 2](#) ↑

Solución al Ejercicio 3

a) Hay una serie de diferentes ambientes superficiales y subterráneos que uno puede encontrar en África. La recarga natural de las aguas subterráneas está relacionada con condiciones climáticas como la temperatura media y la evapotranspiración, y factores

geológicos como la porosidad y las tasas de infiltración. El potencial de recarga natural es relativamente bajo en gran parte del sur de África, mejorando hacia el norte, debido principalmente al aumento de las precipitaciones.

Aproximadamente el 55 por ciento de la región está cubierta por formaciones de baja permeabilidad. Estas son en su mayoría rocas de basamento con sistemas acuíferos desarrollados en la sobrecarga meteorizada y en el lecho rocoso fracturado. Los acuíferos desarrollados en estas áreas no están confinados, no son espacialmente extensos y se desarrollan localmente. En general, solo se pueden extraer fuentes modestas de agua subterránea de manera sostenible de estos acuíferos y los campos de pozos de agua subterránea a gran escala no son factibles. Los sistemas acuíferos fisurados están asociados particularmente con las formaciones Karoo (lutitas y areniscas intercaladas) que se encuentran ampliamente en todo el sur de África. Las formaciones son normalmente de bajo rendimiento, pero donde las rocas han estado sujetas a deformación e intrusión de doleritas, se puede encontrar una permeabilidad secundaria que resulta en buenos acuíferos.

Los sistemas acuíferos intergranulares no consolidados se presentan como grandes cuencas interiores, como las cuencas del Kalahari y del Congo, en acuíferos costeros y en acuíferos aluviales en canales, riberas y llanuras aluviales de ríos.

Los acuíferos kársticos no están muy extendidos en la región, pero constituyen algunos de los acuíferos más productivos en Namibia, Botswana, Zimbabue y Sudáfrica. Se encuentran en rocas altamente solubles, sobre todo en caliza y dolomita. El flujo de agua subterránea se concentra a lo largo de fracturas y fisuras secundariamente agrandadas y otras aberturas conectadas, donde puede tener lugar la acción de disolución química del agua ligeramente ácida (lluvia).

b) Al igual que las variaciones en las condiciones hidrogeológicas, las técnicas de recarga artificial también varían ampliamente. Las técnicas de recarga artificial se pueden clasificar en términos generales de la siguiente manera:

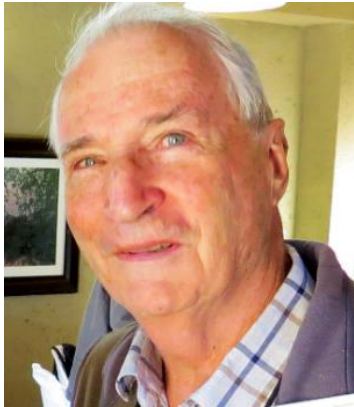
Tabla del Ejercicio 3-1 – Técnicas de recarga artificial categorizadas.

Técnicas directamente en la superficie	<ul style="list-style-type: none"> ● Inundación ● Balsas o tanques de percolación ● Aumento de transmisión ● Sistema de zanjas y balsas ● Riego excesivo
Técnicas directamente en el subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> ● Pozos de inyección o pozos de recarga ● zanjas y balsas de recarga ● Recarga de pozos excavados ● Inundación de pozos ● Aberturas naturales, rellenos de cavidades
Combinación de técnicas en superficie y subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> ● Tanques o cuencas de percolación con balsa, zanja o pozo.
Técnicas indirectas	<ul style="list-style-type: none"> ● Recarga inducida de una fuente de agua superficial ● Modificación de acuíferos

c) En la región de África del Sur, la RGA comenzó en los acuíferos costeros, por lo tanto, el énfasis estaba en las técnicas de superficie directa y esta es una posibilidad para el proyecto potencial. Entonces, (1) las tradicionales “presas de arena en acuíferos aluviales” son un enfoque posible. Para los entornos de roca dura más desafiantes, (2) los pozos de inyección son una solución más probable. Para cualquier entorno, si la agricultura es un usuario importante de agua, (3) el riego excesivo es una opción posible. En el escenario menos probable en el que el acuífero tenga aberturas naturales, (4) se podrían introducir aguas residuales tratadas.

[Regresar al Ejercicio 3](#) ↑

14 Acerca de los Autores



Eberhard Braune ha tenido una carrera de 42 años en el Departamento de Asuntos Hídricos, inicialmente en África Sudoccidental y luego en la Oficina Central en Sudáfrica, entre otros como Director del Instituto de Investigación Hidrológica del Departamento y de la Dirección de Geohidrología. Allí, dirigió la producción de la primera serie de mapas hidrogeológicos nacionales para Sudáfrica y publicó extensamente para la Comisión de Investigación del Agua de Sudáfrica. Tiene una Maestría en Ciencias (Ingeniería Hidrológica) del Imperial College de Londres y un Doctorado (Ciencias, Honoris Causa) de la Universidad de Western Cape. Después de jubilarse, se unió a la Universidad de Western Cape como profesor asociado. Su enfoque docente en el Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Agua de la universidad ha sido la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Junto con el profesor Yongxin Xu, se desempeñó como consultor especializado del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en relación con la gestión de los recursos hídricos subterráneos en África, con la gobernanza de los recursos hídricos subterráneos transfronterizos como su especialidad. Recientemente ayudó a redactar una Estrategia Nacional de Aguas Subterráneas para Sudáfrica. Se ha desempeñado durante muchos años como presidente del capítulo sudafricano de la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas y recibió la Membresía Honoraria Vitalicia de la División de Aguas Subterráneas de la Sociedad Geológica de Sudáfrica.



Sumaya Israel es profesora titular en la sección de Ciencias Ambientales y del Agua del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Western Cape (UWC), donde enseña y realiza investigaciones relacionadas con la calidad del agua subterránea. Sus estudios de pregrado en Geología se realizaron en UWC, mientras que su Maestría (2007) y su Doctorado (2015) los obtuvo en la Universidad de Stellenbosch con un enfoque en la remediación de aguas subterráneas. Tiene aproximadamente 20 años de experiencia trabajando en la industria, donde su investigación abarcó una serie de temas que incluyen, determinación de reservas, clasificación de recursos de agua subterránea, evaluaciones de calidad del agua, diseño de redes de monitoreo, monitoreo de la calidad del agua, investigación de recarga de acuíferos administrados, caracterización de acuíferos, sitio evaluación para la remediación de aguas subterráneas, implementación de la remediación de aguas subterráneas, la distribución espacial y las concentraciones de varios componentes

químicos de las aguas subterráneas en el medio ambiente (incluidos el nitrato en el sur de África, el fluoruro en Sudáfrica y los productos farmacéuticos en el Cabo Occidental) y la remediación de nitratos en las aguas subterráneas. Ha trabajado con PHREEQC y con el software de gestión de bases de datos Aquachem como herramientas de análisis de datos y para simular sistemas de aguas subterráneas. Su pasión radica en comprender los procesos químicos vinculados a las interacciones agua-roca en diversos escenarios geológicos, así como la influencia de las actividades antropogénicas en estos sistemas naturales. Dirige una serie de proyectos de investigación relacionados con estos temas. La Dra. Israel también se desempeña como revisor de varias revistas revisadas por pares y como presidente de la división de aguas subterráneas de la sucursal de Western Cape en Sudáfrica.

15 Acerca del Equipo de Traducción



J. Alberto Casillas-Trasviña, PhD, es un Ingeniero Civil por el Instituto Tecnológico de La Paz, Baja California Sur, México, con Maestría en Ingeniería y Ciencias del Agua (2018), con especialidad en Hidrología y Manejo de Recursos del Agua, por la UNESCO-IHE, en Delft. Países Bajos, y Doctorado en Hidrogeología (2022) por la Universidad de Gante ([Gent Universiteit](#)) en colaboración con el Centro Belga de Investigación Nuclear ([SCK CEN](#)) y con la Agencia Nacional Belga para Residuos Radiactivos y Material Fisible enriquecido ([NIRAS/ONDRAF](#)). Actualmente está afiliado a la Universidad de California, Davis ([University of California, Davis](#)) como Investigador Postdoctoral y trabajando en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos ([USDA](#)) en el grupo de Investigación de Sistemas de Agua Agrícola Sostenible ([SAWS Unit](#)). Su investigación actual está relacionada al modelado de agua subterránea y superficial con el uso de Modelos Integrados de Cuencas Hidrológicas, enfocándose en el uso de información geofísica y en el acoplamiento de modelos de flujos para la evaluación de las prácticas de recarga gestionada de acuíferos (Managed Aquifer Recharge) y su impacto en el medio ambiente y sociedad. Sus trabajos previos tratan mayormente sobre el uso de modelos de flujo de agua subterránea y transporte de calor (temperatura), trazadores de edad (^3H , ^4He , ^{14}C , ^{39}Ar) y solutos (hidroquímica), y el uso de variables de estado 'poco convencionales' para reducir incertidumbres en los parámetros y resultados producidos a través de una inversión conjunta de modelos.



Maria Loreto Encalada es una hidrogeóloga con una licenciatura en Geología de la Universidade Federal do Paraná (1994-1999) y una maestría en Ciencias de la Tierra, especialización en Hidrogeología, de la Universidad de Waterloo (2006-2009). Posee un Certificado en Gestión Ambiental de la Universidad de Calgary (2016-2020). Su carrera comenzó en el Viceministerio de Minas y Energía de Paraguay como Geóloga (diciembre de 2000 - diciembre de 2004), donde creó mapas temáticos, gestionó datos hidro-agro-meteorológicos y brindó asesoramiento técnico. Luego, fue Consultora de Proyectos y Profesora en el Centro de Tecnología Apropriada de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción (marzo de 2004 - julio de 2006), impartiendo clases de Geología Ambiental y promoviendo la preservación del

Sistema Acuífero Guaraní. Posteriormente, fue Asistente de Investigación en la Universidad de Waterloo (agosto de 2006 - mayo de 2009), contribuyendo a estudios hidrogeológicos. También trabajó como Coordinadora Nacional para el Programa GLOBE en la Corporación OIKOS en Quito, Ecuador (junio de 1999 - junio de 2000). Sus principales habilidades incluyen Ciencias Ambientales, Aguas Subterráneas y Conciencia Ambiental.



Pamela Garay de la Fuente, es Ingeniera Ambiental, Master en Hidrología Subterránea y Magister en Gestión de Recursos Hídricos en zonas áridas y semiáridas por la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, España. Ha desarrollado su carrera profesional en el área de medio ambiente y de recursos hídricos, principalmente en evaluación de impacto ambiental asociada a recursos hídricos y fiscalización. Actualmente es Jefa de la Unidad de Supervigilancia del Departamento de Organizaciones de Usuarios de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas en Gran Santiago, Región Metropolitana de Santiago, Chile.

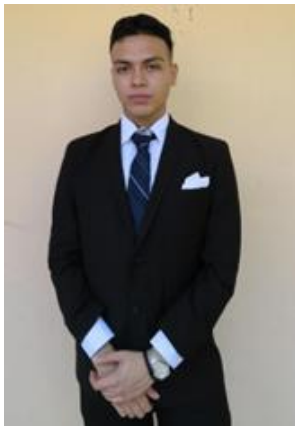


Pablo Fabrizio Guerrero del Angel es un Ingeniero Geofísico por la Universidad Nacional Autónoma de México. Cursó un semestre de intercambio en el departamento de Hidrología y Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Arizona, donde tuvo la oportunidad de visitar las instalaciones del proyecto de recarga gestionada del sur del Valle Avra. Tiene un gran interés en la hidrogeología y recursos hídricos. Profesionalmente se ha desarrollado en la industria de servicios geofísicos e hidrográficos en el Golfo de México.



Alfredo Huamani, es Ingeniero de Minas-Hidrogeólogo de la Universidad Estatal de Prospección Geológica de Rusia, donde además obtuvo el grado de MSc.; tiene un Diplomado en Gestión de Cierre de Minas. Actualmente es Hidrogeólogo Principal y Gerente General de Global Yaku Consultores con sede en Lima, Perú. Cuenta con más de 26 años de experiencia en hidrogeología, geología e ingeniería ambiental; se desempeñó como Hidrogeólogo en INGEMMET, lideró el proyecto "Hidrotermalismo en el Perú" hasta su conclusión, abarcando todo el territorio peruano y ha realizado numerosas publicaciones sobre aguas termales en el Perú. Tiene

amplia experiencia en diseño e implementación de sistemas de drenaje para minas, exploración y desarrollo de recursos de agua subterránea; evaluaciones hidrogeológicas en terrenos kársticos, análisis hidrogeoquímico y cierre de minas. Ha realizado estudios de hidrogeología desde Línea Base hasta Cierre de Mina, incluyendo prefactibilidad y factibilidad, y ha efectuado evaluaciones técnicas y auditorías de problemas de agua con comunidades en Perú, presentando en talleres y audiencias públicas en español y quechua. Su experiencia abarca proyectos en Perú, Argentina, Chile, Bolivia, Ecuador, México, República Dominicana, Panamá, Serbia, Rusia y Australia. En la última década, ha evaluado proyectos mineros para compañías como Mitsui, Antamina, BHP Billiton, Gold Fields, Minsur, El Brocal, Xstrata, Barrick, First Quantum, Volcan, Pan American Silver, MMG, Nexa, Rio Tinto y Fortescue Metals Group, entre otros.



Juan Bautista Reyna Martínez es un Ingeniero Geólogo por la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN). Ha laborado en el Ministerio de Energía y Minas en la implementación del Convenio Minamata en Nicaragua, específicamente en proyectos sobre minería artesanal y manejo responsable de materiales tóxicos. Además, en el Instituto de Geología y Geofísica de la UNAN Managua, ha colaborado en trabajos de caracterización Hidrogeología. Actualmente lidera y supervisa la negociación e implementación de convenios ambientales a nivel nacional e internacional, y la coordinando la

ejecución física y financiera de proyectos medioambientales. Así mismo, desarrolla propuestas para acceder a fondos que respalden iniciativas ambientales a nivel nacional y mantiene relaciones con agencias de cooperación para fomentar colaboraciones estratégicas.



Joaquín Riquelme Fenner tiene un MSc en Hidrogeología y Geotermia por la Université de Neuchâtel, Suiza y un Diploma en Hidrogeología aplicada a la minería y medio ambiente por la Universidad de Chile. Es graduado en Geología en la Universidad de Concepción, Chile. Cuenta con 10 años de experiencia en proyectos de obras civiles de gran envergadura y minería a cielo abierto en las disciplinas de geotecnia e hidrogeología, con especial foco en sondajes profundos, pozos de monitoreo y extracción,

mecánica de rocas y suelos, pruebas hidráulicas e hidrogeoquímica y ensayos geofísicos. Sus responsabilidades incluyen la planificación de proyectos, toma y análisis de datos de

terreno, y apoyo en instrumentaciones de precisión que incluyen tanto el monitoreo hidrogeológico como geotécnico.



Susana Torres es ingeniera Civil graduada de la Universidad Católica de Colombia, con una maestría en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos de las Universidades de Alcalá de Henares y Rey Juan Carlos en Madrid, España. Con más de 12 años de experiencia en el campo de la Hidrología e Hidráulica, su carrera se ha centrado en el estudio y manejo de los recursos hídricos. A lo largo de su trayectoria, ha participado en proyectos de diseño de infraestructuras hidráulicas (acueductos y alcantarillados), así como en estudios hidrológicos e hidráulicos para el diseño de puentes, canales de drenaje y otras obras hidráulicas relacionadas con la infraestructura vial. En los últimos 7 años, se ha especializado en el análisis de datos y mapas de inundaciones, eventos históricos de inundaciones y curvas de calibración, con el fin de implementar nuevos sistemas de pronóstico y alertas de inundaciones tanto en Colombia como en Australia. Actualmente, trabaja para el gobierno australiano en la Oficina de Meteorología (Bureau of Meteorology) en Adelaide, Australia del Sur. Como hidróloga de inundaciones, su principal responsabilidad es calibrar los modelos hidrológicos URBS y configurarlos en la plataforma FEWS (Sistema de Pronósticos Hidrológicos y Alertas Tempranas o Flood Early Warning System en inglés) para implementar y mejorar los servicios de alerta de inundaciones en la parte occidental del estado de Victoria en Australia.



Lei Zhong es una Ingeniera Arquitecta Paisajista, graduada del Instituto de Tecnología de Harbin, China. Continuó sus estudios en Aguas Subterráneas y Medio Ambiente bajo el Programa de Máster Conjunto Erasmus Mundus en Aguas Subterráneas y Cambio Global, por la Universidad Técnica de Dresden, Alemania, IHE-Delft en los Países Bajos, y el Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal. Posteriormente, realizó investigaciones relacionadas con la Recarga Gestionada de Acuíferos y Soluciones Basadas en la Naturaleza en la Universidad Técnica de Delft (TU Delft) y IHE-Delft, en los Países Bajos. Trabajó en la empresa AUBE Conception, Shenzhen, China, como arquitecta paisajista, contribuyendo a las guías de diseño de paisaje en el Sistema de Parques Urbanos y el Diseño Ecológico. Actualmente, trabaja como consultora y diseñadora independiente en

Arquitectura del Paisaje, especialmente en diseño ecológico incluyendo soluciones basadas en la naturaleza.

Considere suscribirse a la lista de correo del Proyecto de Agua Subterránea y manténgase informado sobre los lanzamientos de nuevos libros, eventos y formas de participar en el GW Project. Cuando se registra en nuestra lista de correo electrónico, nos ayuda a construir una comunidad mundial de aguas subterráneas. [Incribirse](#)®.



Modificaciones a la Publicación Original

Página 1, Se añadió el DOI del libro.

Página 1, se trasladó la página de derechos de autor antes de la Tabla de Contenidos para ser consistente con el diseño estándar de libros del Proyecto GW.

Página 107, la referencia al Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales (DWAF), 2009 fue reformateada.

Página 108, la referencia al Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales (DWAF), 2010 fue reformateada y mejorada con información adicional.

Página 111, se añadió la referencia a Murray 2008.

Página 112, la referencia a Peters 2014 fue revisada, el sitio web ya no está disponible.

Página 116, la referencia a Ziervogel 2019 fue revisada, el sitio web ya no está disponible.