

UTILIZACIÓN DE LIXIVIADO TRATADO
DE UN RELLENO SANITARIO DEL
CONURBANO BONAERENSE PARA EL
RIEGO DE *Cynodon dactylon* y *Lolium*
multiflorum

AUTOR: Páez Martínez, Iris (Leg. N° 103136)

DIRECTOR: Wagner Manslau, Alfredo

CO-DIRECTOR: Luengos, María de los Ángeles

TESIS PRESENTADA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
GESTIÓN AMBIENTAL

BUENOS AIRES

PRIMER / SEGUNDO CUATRIMESTRE, 2022

A Sol y a la vida que se teje con cada gota de agua.

AGRADECIMIENTO

A mis directores Ángeles Luengos, por su gran dedicación en el acompañamiento del desarrollo del presente trabajo de tesis, con su experiencia y humildad buscó siempre que diera un paso más allá; y Alfredo Wagner, el primero en apoyarme y guiarme durante este proceso, compartió conmigo su saber, siempre con gran practicidad y calidez.

A mi profesor, el Ing Daniel Pelizzari, quien, gracias a su rigor y dirección, me ayudó a enmarcar mi tesis, facilitando el progreso adecuado y detallado de la misma. Esto me llevó a incorporar nuevos conocimientos en la temática abordada, por lo que le estoy infinitamente agradecida.

A Francisco Decono, por el apoyo y las gestiones realizadas para que este documento fuese una realidad.

A todas las personas que trabajan de manera directa o indirecta en la zona de estudio, y que me permitieron el acceso al uso de diversos datos, los cuales hacen hoy parte de este trabajo de tesis. Así mismo, a Virginia, por compartir conmigo su conocimiento y experiencia con las especies analizadas en el presente trabajo.

Por último, a mi familia, en especial a Leo, porque solo gracias a él logré empezar, mantener y terminar esta maestría, siendo además de gran soporte durante el desarrollo de esta tesis. A mi hija Sol, que antes de nacer ya transitaba conmigo este camino, y quien a su corta edad me apoyó con paciencia, compartiendo con una sonrisa parte de su tiempo para que lograra escribir esta tesis. Finalmente, a mis padres y abuelas por el apoyo brindado durante toda mi carrera profesional y mi vida personal.

ÍNDICE

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Panorama General.....	3
1.1.1. Un cambio de paradigma	3
1.1.1.1. Demanda de agua	3
1.1.1.2. Reducción de la demanda.....	4
1.1.2. Situación actual y problemática asociada	5
1.2. Hipótesis	6
1.3. Objetivo	6
1.3.1. Objetivos específicos	7
1.4. Zona de estudio	7
2. ESTADO DE SITUACIÓN	9
2.1. Panorama mundial sobre el uso de aguas regeneradas	9
2.1.1. Obtención de agua regenerada	9
2.1.2. Las aguas residuales y la agenda de desarrollo sostenible.....	11

2.1.3. WWAP.....	12
2.1.4. Unión Europea	13
2.2. Experiencias de reúso de Aguas regeneradas en el mundo	16
2.2.1. Estados Unidos	16
2.2.2. Israel.....	18
2.2.3. Japón	18
2.2.4. Australia.....	20
2.3. Situación de Argentina en el uso de aguas regeneradas	22
2.3.1. Marco Legal.....	22
2.3.2. Experiencias de reúso de aguas tratadas en Argentina	23
2.3.2.1. Mendoza.....	23
2.3.2.2. Puerto Madryn- provincia de Chubut.....	27
2.4. Experiencias de reúso de lixiviado	30
2.4.1. Estados Unidos -Michigan.....	30
2.4.2. Australia.....	35
2.4.3. Taiwán	41
2.5. Niveles guía y normativa para el reúso de efluentes.....	41
2.5.1. Referentes a nivel mundial	41
2.5.1.1. OMS	42
2.5.1.2. FAO.....	42
2.5.1.3. Australia	46
2.5.1.4. U.S. EPA	49
2.5.1.5. Reducción de microorganismos	52

2.5.2. Referentes a nivel nacional	57
2.5.2.1. Normativa de efluentes para uso de agua regenerada en Mendoza	57
2.5.2.2. Normativa de efluentes para uso de agua regenerada en Puerto Madryn ..	62
2.5.3. Recopilación de los niveles guía y normativas de uso de agua regenerada a nivel nacional e internacional	66
2.6. Ubicación y generalidad de la zona de estudio	70
2.6.1. Localización y población	70
2.6.2. Clima.....	73
2.7. Características del lixiviado.....	74
2.8. Cobertura final de los módulos y áreas verdes de la zona de estudio.....	76
2.9. Sistema de captación y tratamiento del lixiviado	77
2.10. Riego de zonas verdes y de caminos de la zona de estudio	80
2.11. Requerimientos de agua de un cultivo.....	81
3.DESARROLLO	88
2.6.3. Geología y suelos.....	88
2.6.3.1. Hidrogeología.....	88
3.6.3.2. Suelos	92
3.1. Estimación de la demanda de agua utilizada para riego en la zona de estudio	93
3.2. Estimación de la producción de lixiviado tratado	94

3.3. Caracterización del agua usada actualmente para riego y del líquido lixiviado tratado.	94
3.4. Valores fisicoquímicos y biológicos para cumplir	98
3.4.1. Fisicoquímicos	98
3.4.2. Patógenos y barreras múltiples	98
3.5. Requerimiento de agua para la zona de estudio	105
3.5.1. <i>Leaching factor</i>	109
3.5.2. Cálculo de <i>leaching factor</i>	109
3.6. Impacto sobre los acuíferos - hidrogeología local.....	113
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	117
4.1. Volumen aproximado de agua subterránea extraída para riego de zonas verdes	117
4.2. Volumen de lixiviado tratado disponible para riego	118
4.3. Niveles guía de reúso y calidad fisicoquímica y biológica del lixiviado tratado	119
4.3.1. Caracterización fisicoquímica del lixiviado tratado	119
4.3.2. Salinidad	139
4.3.2.1. Balance iónico	141
4.3.2.2. RAS	143
4.4. Estimación de la demanda de agua de los cultivos	144
4.4.1. Evapotranspiración de referencia - ETo	145

4.4.2. Precipitación total y efectiva.....	146
4.4.3. Evapotranspiración del cultivo de referencia ETc - determinación de Kc	147
4.4.4. Información para calcular la evapotranspiración del cultivo ETcaj	150
4.4.4.1. Factores	150
4.4.4.2. Datos del Suelo	151
4.5. Requerimiento de agua del cultivo - ETcaj.....	152
4.5.1. <i>Cynodon dactylon</i>	153
4.5.2. <i>Lolium multiflorum</i>	155
4.6. Requerimiento de agua de riego.....	157
4.6.1 Proporción de lixiviado utilizado en el agua de riego.....	157
4.6.2. <i>Leaching factor</i> (LR) para el cultivo <i>Cynodon dactylon</i>	159
4.6.3. Cantidad total de agua requerida por el cultivo <i>Cynodon dactylon</i>	162
4.6.4. <i>Leaching factor</i> (LR) para el cultivo <i>Lolium multiflorum</i>	164
4.6.5. Cantidad total de agua requerida por el cultivo <i>Lolium multiflourm</i>	166
4.7. Requerimiento de agua de riego anual para la zona de estudio.....	167
4.8. Evaluación del impacto a los acuíferos de la zona de estudio.....	170
5. CONCLUSIONES	173
6. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS	179
7. BIBLIOGRAFÍA	181
ANEXOS	187

A.1. Clasificación de los cultivos regados con agua regenerada en Mendoza.....	187
A.2. Clasificación de los cultivos regados con agua regenerada en Puerto Madryn	189
A.3. Experiencias de reúso de lixiviado- Estados Unidos de Norte América Michigan.....	190
A.4. Experiencia de reúso de lixiviado en Australia.....	199
A.5. Mendoza, normas para vertido de efluentes líquidos industriales para reúso agrícola ANEXO I-B RES, N°778/96 H.T.A	219
A.6. Mendoza- Norma de calidad de efluente cloacal con tratamiento primario para reúso agrícola	222
A.7. EPA - reúso de agua para riego.....	224
A.8. Perfiles representativos del análisis hidrogeológico de la zona de estudio....	225
A.9. Cantidad de agua (AW) requerida para <i>Cynodon dactylon</i>- 30% de lixiviado tratado	229
A.10. Cantidad de agua (AW) requerida para <i>Cynodon dactylon</i> - 45% de lixiviado tratado	230

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ACRE:	Área de Cultivo Restringido especial.
ADA:	Autoridad Del Agua.
ADT:	Agua Disponible Total.
AHMC (en inglés):	Consejo de ministros de Salud de Australia.
AW (en inglés):	Cantidad de agua de riego.
AWT (en inglés):	Cantidad de agua de riego total.
CE:	Conductividad Eléctrica.
CENPAT:	Centro Nacional Patagónico.
CEPAL:	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
CONICET:	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
CREST (en inglés):	Evolución de la Ciencia y la Tecnología en Japón.
DBO:	Demanda biológica de oxígeno.
DEC (en inglés):	Departamento de Conservación Ambiental.
DGI:	Departamento General de Irrigación.
DQO:	Demanda Química de Oxígeno.
EMWATERS (en inglés)	Manejo eficiente de efluentes
EPHC (en inglés):	Consejo de Protección del Medio Ambiente y del Patrimonio.
EPP:	Elementos de Protección Personal.
ET:	Evapotranspiración.
ETc:	Evapotranspiración del cultivo.
ETcaj:	Evapotranspiración ajustada.

ETo:	Evapotranspiración del cultivo de referencia.
FAO (en inglés):	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
HTA:	Honorable Tribunal Administrativo de Irrigación.
ISO:	Organización Internacional de Estandarización.
LF (en inglés):	Factor de Lixiviación.
LR (en inglés):	Requerimiento de lixiviación.
NF:	Nanofiltración.
NRC (en inglés):	Consejo Nacional de Investigación.
NRMMC:	Consejo Ministerial de Gestión de Recursos Naturales.
NTK:	Nitrógeno Total Kjeldahl.
ODM:	Objetivos de Desarrollo del Milenio.
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
OMS:	Organización Mundial de la Salud.
OPDS:	Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible.
PCR (en inglés):	Reacción en Cadena de la Polimerasa.
PHC:	Plan Hidrológico de Cuenca.
RAS:	Relación de Adsorción de Sodio.
RSU:	Residuos Sólidos Urbanos.
SERVICOOP:	Cooperativa de Servicios Públicos y Vivienda de la Ciudad de Puerto Madryn.
TMB:	Tratamiento Mecánico-Biológico.
TRH:	Tiempo de Residencia Hidráulico.

U.S.EPA (en inglés):	Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos.
UE:	Unión Europea.
UF:	Ultrafiltración.
UN WATER (en inglés):	Agua de las Naciones Unidas.
UNESCO:	Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura.
USDA (en inglés):	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
WEF:	Foro Económico Mundial.
WWAP:	Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de agua regenerada en California	17
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del lixiviado no tratado del relleno sanitario de Ottawa, Michigan	31
Tabla 3. Efectos del riego en las concentraciones medias anuales ponderadas por volumen de la solución del suelo para NO_3^- y NH_4^+	33
Tabla 4. Parámetros medidos para agua de la ciudad y el lixiviado sin y con dilución	38
Tabla 5. Propiedades físicas del suelo bajo riego	39
Tabla 6. Producción de biomasa de césped (kg/ha) y tasas de producción (kg/ha mes) en respuesta al riego con lixiviado	40
Tabla 7. Directrices para interpretación la calidad de las aguas de riego según la FAO44	
Tabla 8. Niveles guía de calidad microbiológica recomendada para el reúso de efluentes en la agricultura ^a	45
Tabla 9. Clasificaciones generales de salinidad del agua de riego basadas en la CE...	47
Tabla 10. Norma de agua regenerada para el riego en Australia.....	48
Tabla 11. Niveles guía para el reúso de efluentes en la agricultura y riego de zonas verdes	51
Tabla 12. Reducción de microorganismos indicadores y patógenos entéricos durante las diversas etapas del tratamiento de aguas residuales	56
Tabla 13. Remoción de contaminantes por medio de filtración por membrana.....	57
Tabla 14. Normas de calidad de efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola	61
Tabla 15. Parámetros de calidad de efluentes cloacales tratados como fuente de agua regenerada.	63

Tabla 16. Parámetros de calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura para el riego restringido	65
Tabla 17. Comparativa de normativas y niveles guía para el uso de agua regenerada como fuente de riego para zonas verdes	68
Tabla 18. Valores medios mensuales (base de datos largo plazo >15 años).....	74
Tabla 19. Unidades geológicas e hidrogeológicas de Buenos Aires	89
Tabla 20. Parámetros analizados en el lixiviado tratado. Res 336/03 ADA	96
Tabla 21. Matriz de ensayo: agua subterránea (agua de pozo).....	97
Tabla 22. Matriz de ensayo: Lixiviado tratado.....	97
Tabla 23. CE en mS/cm de distintas diluciones de agua de pozo (acuífero Puelche) y lixiviado tratado.....	110
Tabla 24. Valores máximos y promedio de CE en diluciones de lixiviado tratado ...	110
Tabla 25. Valores de CE calculados para diferentes porcentajes de lixiviado	110
Tabla 26. Valores de E _{Ce} y E _{Cw} según la salinidad ¹ del agua de riego y del suelo en mS/cm ²	111
Tabla 27. Volumen de extracción anual de agua subterránea para riego de zonas verdes	117
Tabla 28. Volumen lixiviado tratado y su posterior uso durante el año 2016 y 2017	118
Tabla 29. Volumen promedio anual producción de lixiviado tratado, cantidad usada en riego de caminos y volumen restante	119
Tabla 30. Parámetros relevantes para la caracterización del lixiviado tratado como fuente de agua de riego para la zona de estudio.....	121
Tabla 31. Resultados de parámetros asociados a la salinidad de las muestras de agua de pozo y lixiviado tratado.....	140

Tabla 32. Balance iónico laboratorio 1	141
Tabla 33. Balance iónico laboratorio 2.....	141
Tabla 34. Resultados de parámetros asociados a la salinidad de las muestras de agua de pozo y lixiviado tratado.....	142
Tabla 35. Relación de Adsorción de Sodio (RAS).....	143
Tabla 36. Datos meteorológicos de la estación Buenos Aires (OBS.CENTR), y cálculo de ETo expresado en mm/día.....	145
Tabla 37. Precipitación total y efectiva en mm-mes para la zona de estudio.....	147
Tabla 38. Coeficientes de Kc analizados para los cultivos <i>Cynodon dactylon</i> y <i>Lolium multiflorum</i>	149
Tabla 39. Datos usados para calcular la Evapotranspiración del cultivo (ETc).	150
Tabla 40. Datos correspondientes a un suelo arcillo limoso típico	152
Tabla 41. Valores de ETcaj, y requerimiento de riego en mm/ década para <i>Cynodon dactylon</i>	154
Tabla 42. Valores de ETcaj y requerimiento de riego en mm/ década para <i>Lolium multiflorum</i>	156
Tabla 43. Valores de CE de distintas soluciones en mS/cm.....	158
Tabla 44. LR de <i>Cynodon dactylon</i> , según % de lixiviado tratado del agua regenerada.	159
Tabla 45. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo de <i>Cynodon dactylon</i> ¹	161
Tabla 46. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo de <i>Cynodon dactylon</i> ¹	162
Tabla 47. Resultados de requerimiento de agua del cultivo <i>Cynodon dactylon</i>	164

Tabla 48. LR de <i>Lolium multiflorum</i> , según el % de lixiviado tratado del agua regenerada	165
Tabla 49. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo <i>Lolium multiflorum</i> ¹	166
Tabla 50. Requerimiento de agua del cultivo <i>Lolium multiflorum</i>	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Niveles de tratamiento disponibles para alcanzar diferentes niveles de calidad de agua.....	10
Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	11
Figura 3. Reúso de efluentes domésticos generados en la zona Sur de Australia - Cuenca del Murray–Darling.....	21
Figura 4. Reúso de efluentes industriales generados en la zona Sur de Australia - Cuenca del Murray–Darling.....	21
Figura 5. ACREs en Mendoza según superficie irrigada.	25
Figura 6. Cambios en la calidad del agua post tratamientos	26
Figura 7. Municipios que disponen sus residuos en el relleno sanitario de la zona de estudio y su ubicación geográfica	72
Figura 8. Estación meteorológica de Buenos Aires (OBS.CENTR) (Latitud 34,58 Sur, Longitud 58.48 Oeste, Altitud 25 m).	73
Figura 9. Perfil geológico y ubicación de acuíferos importantes	90
Figura 10. Cuenca, subcuenca y afluentes del río Reconquista	91
Figura 11. Esquema de un relleno sanitario y sus industrias asociadas.	78
Figura 12. Esquema simplificado del sistema de tratamiento de Planta N°1 y N°3. ...	80
Figura 13. Curva generalizada de coeficiente de cultivo Kc.....	85
Figura 14. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c) y bajo condiciones ajustadas (ET _{caj}).....	86
Figura 15. Ubicación de los pozos de muestreo de agua. Buenos Aires, 34 ° 30'51" S y 58°40'12" O. Google Earth (8/7/2020).	95
Figura 16. Log de reducción de patógenos en la zona de estudio	104

Figura 17. Etapas de desarrollo de <i>Lolium multiflorum</i> y <i>Cynodon dactylon</i>	107
Figura 18. Pozos de monitoreo al acuífero Puelche	115
Figura 19. Pozos de monitoreo al acuífero Pampeano	115
Figura 20. Pozos de monitoreo seleccionados acuífero Pampeano (Np) y Puelche (Ns)	116
Figura 21. Volumen de lixiviado tratado en el periodo 2016 y 2017 y uso estimado para riego de caminos.....	119
Figura 22. Temperatura del lixiviado tratado por las plantas N°1 y 3, medida en el periodo 2016 y 2017.....	122
Figura 23. pH del lixiviado tratado por las plantas N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017.....	123
Figura 24. CE del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medida en el periodo 2016 y 2017.....	124
Figura 25. Boro del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N° 1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017	126
Figura 26. Cloro libre del lixiviado tratado de las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017	128
Figura 27. D.Q.O. del lixiviado tratado por las plantas N°1 yN° 3, medido en el periodo 2016 y 2017.....	129
Figura 28. D.B.O. del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017	131
Figura 29. Nitrógeno Total Kjeldahl, del lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3, medido en el periodo 2016 y 2017	132

Figura 30. Nitrógeno amoniacal del lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3, medido en el periodo 2016 y 2017,	133
Figura 31. Nitrógeno orgánico, del lixiviado tratado de las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el año 2016 y 2017	133
Figura 32. Fósforo total, del lixiviado tratado por las plantas N°1 y 3, medido en el periodo 2016 y 2017	136
Figura 33. Coliformes fecales del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medidos en el periodo 2016 y 2017	138
Figura 34. Precipitacion total y efectiva mensual en mm	147
Figura 35. Suelo arcillo limoso. <i>Soil Water Characteristics</i> (USDA).	152
Figura 36. Requerimiento de riego de <i>Cynodon dactylon</i> para la zona de estudio. ...	155
Figura 37. Requerimiento de riego de <i>Lolium multiflorum</i> para la zona de estudio ..	157

RESUMEN

La valorización de los recursos hídricos no convencionales es cada vez más importante para la adecuada gestión y protección de las fuentes de agua, siempre y cuando cumpla con requerimientos de calidad y seguridad en su uso.

En este sentido, el presente trabajo de tesis busca establecer si el lixiviado de un relleno sanitario de residuos sólidos urbanos, que ha sido tratado mediante un proceso biológico y de membranas de ultra y nanofiltración, puede ser utilizado como agua de riego de las especies *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*. Dichos cultivos se emplean habitualmente en la cobertura final de los módulos y en algunas zonas verdes del mencionado relleno, localizado en el conurbano bonaerense, en Argentina.

Para establecer las bases del presente trabajo, se realizó un análisis comparativo de los requerimientos establecidos por niveles guía internacionales y normativas provinciales argentinas, que regulan el uso de aguas regeneradas como recurso para regar áreas verdes.

Con el fin de determinar la factibilidad de esta propuesta, se recopilaron valores de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, medidos en el efluente de las plantas de tratamiento de lixiviado N°1 y N°3 del relleno sanitario en estudio, durante el periodo 2016 -2017. Además, se calculó el índice RAS en muestras de lixiviado tratado y de agua del acuífero Puelche, que se usa actualmente en la irrigación de los cultivos en la zona de estudio.

A partir del análisis de los datos recopilados, se identificó que el parámetro limitante para el desarrollo de las especies en estudio es la salinidad, que, alcanza valores

de hasta 15 mS/cm en el lixiviado tratado. Debido a esto, se consideró usarlo diluido, por lo que se midieron las conductividades eléctricas de una serie de mezclas de lixiviado tratado con agua del acuífero Puelche. Se concluye así, que el agua de riego deberá contar con 20 % de lixiviado tratado para alcanzar una conductividad eléctrica de alrededor de 3 mS/cm, que permita asegurar un potencial de rendimiento del cultivo de 100% para *Cynodon dactylon* y 90% para *Lolium multiflorum*.

Mediante el uso del programa CROPWAT 8.0 y la metodología de la FAO para cálculos de riego, se estimó que el requerimiento de agua regenerada para 130 hectáreas cultivadas con las especies estudiadas es de 738.400 m³/año. Como se señaló, el 20 % de este volumen podría cubrirse con lixiviado tratado.

Paralelamente se evaluaron las características geológicas e hidrogeológicas de la zona de interés, determinando que la salinidad de la dilución propuesta no afectaría los acuíferos localizados en dicho sector, siempre y cuando los cultivos fueran regados bajo los requerimientos de agua calculados.

Hacer uso de una mezcla de lixiviado tratado y agua del acuífero Puelche como agua regenerada para el riego de los cultivos *Cynodon Dactylon* y *Lolium multiflorum*, representaría un ahorro del recurso hídrico proveniente de este acuífero de unos 150.000 m³ anuales. De esta manera, se contribuye a reducir la presión que se ejerce hoy en día sobre este importante yacimiento de agua dulce.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Panorama General

1.1.1. Un cambio de paradigma

En los siguientes apartados, se describe la situación del agua a nivel global y en la Argentina en particular, así como el rol que cumple el uso de efluentes tratados en la reducción de la demanda de los recursos hídricos.

1.1.1.1. Demanda de agua

El Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (en inglés WWAP) afirmó en el año 2015, que desde hace varias décadas distintas organizaciones advierten que el futuro de las reservas hídricas genera preocupación. La escasez del recurso aumenta el riesgo de conflictos localizados y desigualdades en el acceso a los servicios, lo que genera impactos negativos en las economías locales y el bienestar humano.

En el año 2013, el 20% de la población mundial carecía de acceso a agua potable de buena calidad, y en los últimos 50 años el aumento del consumo de este recurso creció cuatro veces (Ardila, A., Alba, N., & Saldarriaga, J., 2013). Se prevé que para el 2050 la demanda de agua se incremente hasta cerca de un 55 % (WWAP, 2014), debido principalmente a las crecientes necesidades de la industria, la producción de electricidad y el uso doméstico (WWAP, 2015).

La utilización de agua subterránea suele cubrir la alta demanda del recurso hídrico, sobre todo en las regiones áridas donde las fuentes superficiales son escasas. Sin embargo, si los acuíferos no se recargan de forma natural o antropogénica, existe el riesgo que estas aguas dejen de ser una alternativa.

En Argentina, la extracción hídrica total creció de 29 a 39 Km², entre 1995 y 2011. De este volumen, el 74% se emplea en el sector agrícola, seguido del municipal que utiliza el 15%, y del industrial con 11 % (FAO,2015).

En cuanto al agua subterránea de Argentina, tomando la media nacional, se estima que un 30 % del agua de consumo es de este origen. No obstante, se considera que esta cifra no refleja de manera satisfactoria la importancia que tiene este recurso, ya que son las reservas subterráneas las que aseguran una regulación plurianual e interanual del agua, y cumplen, además, un papel esencial durante un déficit hídrico estacional o sequía.

Por su parte, las aguas subterráneas han sido importantes en el desarrollo socioeconómico de las regiones áridas y semiáridas de la Argentina, ya sea como fuente de abastecimiento para la industria, el riego, o las poblaciones urbanas o rurales que se abastecen con dicho suministro (FAO, 2015).

En el caso del noreste de la provincia de Buenos Aires, el recurso hídrico subterráneo es intensamente utilizado para el abastecimiento de agua potable, de industrias, riego y ganadería. Las reservas y calidad del agua de las unidades hidrogeológicas, con especial referencia al denominado acuífero Puelche, representan una fuente de provisión adecuada para dichos fines (Deluchi, M., Kruse, E., Laurencena, P., Rojo, A., & Rodrigues, L., 2010).

1.1.1.2. Reducción de la demanda

Una alternativa para reducir la demanda de agua subterránea para riego es la de recurrir a las aguas residuales. Esta actividad es tan antigua como la agricultura, sin embargo, a escalas mayores el aprovechamiento de manera controlada se remonta sólo al siglo pasado, cuando en parte de Europa, Australia, la India y los Estados Unidos se crearon los llamados campos de aplicación. Dichos campos, eran explotaciones

agrícolas en las que se utilizaban aguas residuales para el riego de cultivos y en algunos casos de árboles, de esta manera, se eliminaban las aguas negras y se evitaba la contaminación de los ríos (Braatz, S., & Kandiah, A, 1996).

En el 2015, el Informe de WWAP sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, argumenta que el uso de efluentes contribuye a lograr un acceso universal al agua.

En el año 2016 el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), determinó que la crisis del agua es el riesgo mundial, proyectado a diez años, que más preocupaba a la población y a las economías. A pesar de ello, la gestión de los efluentes sigue sin ser valorada en el ámbito político y social, si se compara con los demás abastecimientos del recurso hídrico. Podría decirse, que las aguas residuales son un recurso infravalorado, que es visto como un desecho a eliminar (WWAP, 2017).

Dicho lo anterior, no es de sorprender que se esté ante un cambio de paradigma en cuanto a la gestión de las aguas residuales; pasando del concepto de “trámite de eliminación, a contemplar la reutilización y recuperación de recursos” (WWAP, 2017). Por ello, mejorar la gestión de las aguas residuales, incluyendo la recuperación y/o el reusó del agua de manera segura, abre un camino de oportunidades.

1.1.2. Situación actual y problemática asociada

Como parte de la política de gestión integral de la empresa responsable de los residuos del relleno sanitario objeto de este trabajo, se destaca la intención de ser referente en la innovación de tecnología aplicada en el marco de la economía circular. De esta manera, se busca minimizar los pasivos ambientales de las actividades realizadas dentro del relleno, mediante la transformación de estos en activos energéticos o de otra índole,

buscando la sustentabilidad de sus actividades. Dentro de esta visión de sustentabilidad, la organización se encuentra interesada en gestionar el lixiviado tratado, considerando la posibilidad del reúso con el fin de generar un beneficio a los ecosistemas y reducir las extracciones de agua dulce.

El lixiviado del relleno sanitario de la zona de estudio, es tratado por medio de procesos biológicos y de tecnología de membranas de ultra y nano filtración. En lo que respecta a su reúso, tan solo una parte de dicho efluente tratado es empleado para riego de caminos.

Las zonas verdes ubicadas en el área de interés, tanto las que forman parte de la cobertura final del módulo (conocida también como *Capping*), como aquellas destinadas a fines contemplativos, presentan como cobertura vegetal gramíneas tales como *Cynodon dactylon* -Bermuda-, *Lolium multiflorum* -Rye grass anual- y en menor medida *Axonopus Compressus*- Grama Bahiana, que son regadas con agua subterránea proveniente del acuífero Puelche.

1.2. Hipótesis

Es posible utilizar el lixiviado tratado proveniente del relleno sanitario como agua de riego para los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*.

1.3. Objetivo

Evaluar si el lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3 de un relleno sanitario localizado en el conurbano bonaerense, puede ser usado para el riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio.

1.3.1. Objetivos específicos

- a) Identificar niveles guía internacionales y nacionales para reúso de efluentes tratados como fuente de agua para riego de espacios verdes.
- b) Estimar la cantidad de agua del acuífero Puelche que es utilizada actualmente para riego de zonas verdes en el área de interés.
- c) Establecer el volumen de agua regenerada que debería aplicarse para el óptimo rendimiento de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en el predio del relleno sanitario.
- d) Recopilar y analizar los parámetros que permiten establecer las características fisicoquímicas y microbiológicas del lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3.
- e) Evaluar la necesidad y el grado de dilución requerido para utilizar el lixiviado como agua de riego de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio.
- f) Evaluar los potenciales impactos del uso de lixiviado tratado para riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* sobre los acuíferos del área de investigación.

1.4. Zona de estudio

El relleno sanitario de la zona de estudio, ubicado en el conurbano bonaerense, recibe en promedio 16.100 ton/día de residuos sólidos urbanos (RSU) proveniente de una población de unos 14 millones de habitantes. En la actualidad este relleno cuenta con 500 ha y se prevé una ampliación de 170 ha más para 2030. En este predio se encuentran tres

plantas de tratamiento de líquido lixiviado, una planta de tratamiento mecánico - biológico (TMB) de residuos, una planta de tratamiento de biogás, que produce energía eléctrica, una planta de compostaje, plantas sociales de separación y clasificación de residuos y un espacio interactivo lúdico para los visitantes, cuyo propósito es brindar un conocimiento más amplio de la gestión integral de RSU.

2. ESTADO DE SITUACIÓN

Debido a que se emplean diferentes términos para referirse a la utilización de efluentes tratados, como por ejemplo: “reúso de aguas tratadas”, “uso de aguas depuradas”, “aguas regeneradas”, “ uso de aguas residuales depuradas”, “agua recuperada”, “agua reciclada”, entre otros, se decide utilizar el término “agua regenerada” en el presente documento, para hacer referencia a los efluentes que han sido sometidos a un proceso de tratamiento, que permite adecuar su calidad al uso al que vaya a ser destinado o, como la define WWAP (2017): aguas depuradas susceptibles de reutilización, por haber alcanzado el criterio de calidad exigible para el empleo al que vayan a ser destinadas.

2.1. Panorama mundial sobre el uso de aguas regeneradas

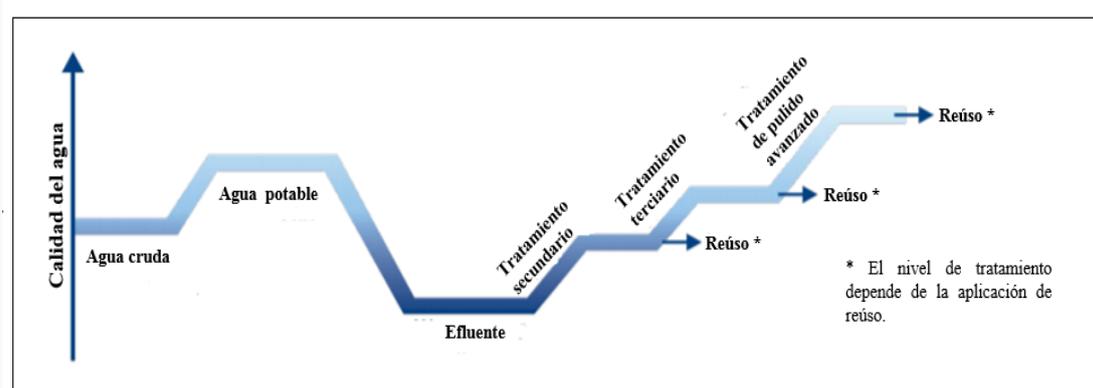
2.1.1. Obtención de agua regenerada

La obtención de agua regenerada muchas veces presenta mayores desafíos financieros, técnicos e institucionales que el acceso al recurso hídrico desde fuentes tradicionales. Es por esta razón, que existe una gama de opciones de tratamiento disponibles para lograr diversos niveles de calidad del agua regenerada, y dependiendo del grado que se alcance, podría ser empleada en una o más formas (U.S. EPA, 2012). Estas prácticas de tratamiento fueron reconocidas por el Consejo Nacional de Investigación (NRC) de EE. UU en el año 2012, por el potencial que tienen para expandir el abastecimiento hídrico a través de la reutilización de aguas residuales municipales.

Entre las opciones de tratamiento de efluentes para obtener aguas regeneradas, se encuentran los procesos secundarios (biológicos), terciarios (filtración por membrana,

intercambio iónico, adsorción, entre otros) y tratamiento de pulido. Los biológicos, son diseñados y gestionados para mitigar los contaminantes microbianos y químicos del efluente, facilitando una multitud de combinaciones de procesos que pueden adaptarse para cumplir objetivos específicos de calidad del agua regenerada. Si bien, los avances en la filtración por membranas son particularmente atractivos por la calidad obtenida, las limitadas alternativas rentables de eliminación del descarte dificultan la aplicación de esta tecnología en determinadas regiones. (U.S. EPA,2012). Por su parte, los procesos de tratamiento de pulido involucran depurar patógenos emergentes o trazas de químicos, que no lograron ser depurados por los procesos anteriormente descritos.

La figura 1, representa gráficamente los niveles de tratamiento de efluentes que, combinadas con la desinfección, se emplean para mejorar la calidad final del líquido tratado. La tecnología aplicada debe ser definida por el uso final que se le va a dar al agua regenerada, con el fin de obtener la mejor relación costo - beneficio ambiental (U.S. EPA, 2012).



Fuente: U.S. EPA (2012).

Figura 1. Niveles de tratamiento disponibles para alcanzar diferentes niveles de calidad de agua.

2.1.2. Las aguas residuales y la agenda de desarrollo sostenible

En septiembre de 2015, los Estados Miembros de la Asamblea General de las Naciones Unidas, adoptaron la agenda 2030 para el desarrollo sostenible con alcance mundial. Se establecieron un conjunto de 17 objetivos (ODS) y 169 metas (ver figura 2), a alcanzar en un periodo de 15 años. Su finalidad es la de reducir la pobreza, proteger el medio ambiente y garantizar la prosperidad para todos los habitantes (Naciones Unidas- Asamblea General, 2015).

Los ODS, están interrelacionados, son indivisibles y se basan en los progresos y lecciones aprendidas de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM, 2000-2015).



Fuente: (UNESCO, S.f.).

Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Cabe destacar que el objetivo 6, “Agua limpia y saneamiento”, hace referencia a dos metas concretas referidas a al uso de aguas regeneradas:

- Meta 6.3, “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial”.
- Meta 6.a, “De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo, para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización” (CEPAL, 2018).

2.1.3. WWAP

El Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (en inglés WWAP), asegura que el uso de agua regenerada es cada vez más común, llegando incluso a la recarga artificial de acuíferos. Al mismo tiempo, sugiere que la gestión moderna de los recursos hídricos debe tener un enfoque basado en la reducción de la demanda de agua, y en mejorar la eficiencia de su uso (WWAP,2006).

Los informes subsiguientes del WWAP, continúan mencionando la importancia del uso de las aguas regeneradas dentro de una apropiada gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, la publicación del año 2017 centra su atención en las aguas residuales, con énfasis en la necesidad de mejorar la gestión de estas. Entre las herramientas mencionadas, se destaca la prevención o reducción de la contaminación en la fuente, la captación y tratamiento, su uso posterior como agua regenerada, y la

recuperación de los subproductos útiles. Estas acciones, generan beneficios sociales, ambientales y económicos para toda la sociedad (WWAP, 2017).

Tres años más tarde, se hace hincapié en el reúso de aguas regeneradas, argumentando que valorar los recursos hídricos no convencionales, es cada vez más necesario en la planificación del agua. Es así, como la reutilización es considerada una alternativa fiable al uso de agua convencional para una serie de fines, siempre que esté tratada y/o se utilice con seguridad” (UNESCO, UN-Water, 2020).

2.1.4. Unión Europea

En lo que respecta al agua, la Unión Europea (UE) se ha preocupado por la escasez y la calidad de ésta, identificando como consecuencia del cambio climático, una serie de impactos, entre los que se encuentran: la desecación de las cuencas hidrográficas, la elevación de la temperatura del agua, la llegada de especies invasoras y el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías e inundaciones.

Como posibles medidas frente a los impactos referidos, la UE propone la elaboración de los planes de gestión de riesgos de inundación y su coordinación con el “Plan Hidrológico de Cuenca” (PHC). Así mismo, destaca la importancia del desarrollo de infraestructuras verdes, medidas de retención natural del agua, reducción de la impermeabilización del suelo y el establecimiento del Observatorio Europeo de la Sequía. En cuanto al uso de agua regenerada, destaca la importancia de hacer uso de esta en regadíos o fines industriales, así como el establecimiento de normas comunes en materia de medio ambiente y sanidad (Urbano López de Meneses , 2013).

Cabe mencionar, que la primera normativa de la UE que mencionó el uso de agua regenerada fue la directiva 91/271/CE Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, la

cual establece en el artículo 12 apartado 1, que las aguas residuales tratadas se reutilizarán cuando proceda (Doria, J. 2013).

Posteriormente, el artículo 5 de la Directiva Marco del Agua (DMA), adoptada en el año 2000, hace referencia a la presión que sufren los cuerpos de agua en algunas áreas de Europa. En dicho artículo se manifiesta que, entre las medidas a tomar se debe incluir el uso eficiente del recurso hídrico, la reducción de fugas en las redes de distribución y el uso de agua regenerada (European Commission, 2016).

Para lograr los objetivos marcados por la DMA, se propuso un plan de acción integrado que permitiera mejorar y proteger los recursos hídricos de Europa, denominado *Water Blueprint*. Este, buscó mejorar la implementación de las distintas políticas sobre el agua de la UE, manteniendo el marco legal existente, pero integrando las políticas de agua con sectores como la agricultura, pesca, energías renovables y transporte, así como con la administración de los fondos.

Con respecto al uso de aguas regeneradas, *Water Blueprint* propone la utilización de las aguas residuales para riego o uso industrial, afirmando que dichos procesos tienen un impacto ambiental relativamente bajo, si se comparan con la desalinización o transferencia de agua. Para el año 2000, las barreras encontradas con respecto al reúso de efluentes tratados tenían que ver con la ausencia de estándares ambientales y salud pública en la UE.

En el año 2015, la Comisión Europea propuso medidas en toda la UE, con el fin de fomentar la reutilización del agua, incluyendo una regulación con estándares comunes. De esta manera, se ayudaría a disipar los temores públicos sobre los posibles

riesgos a la salud, por comer cultivos de alimentos irrigados con agua regenerada (European Commission, 2013).

En el año 2017, la UE publicó el informe Requisitos mínimos de calidad para la reutilización del agua en riego agrícola y recarga de acuíferos -Hacia un instrumento regulador de reutilización del agua a nivel de la UE, elaborado por *Science for Policy report by the Joint Research Centre (JRC)*. Este, proporciona el apoyo científico para la elaboración de un instrumento jurídico, sobre los requisitos mínimos de calidad para el uso de agua regenerada en las actividades mencionadas.

Cabe aclarar, que no se realizaron evaluaciones de riesgos específicos para el establecimiento de los requisitos mínimos de calidad. Sin embargo, aseguran una protección adecuada de la salud y el medio ambiente, proporcionando así, confianza pública en las prácticas de reutilización (L. Alcalde-Sanz & B. M. Gawlik, 2017).

Los estándares mínimos de calidad, para el uso seguro del agua regenerada en el riego agrícola y la recarga de acuíferos dentro de la UE, se basan en el marco de gestión de riesgos, recomendado por distintas organizaciones referentes como: la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (en inglés FAO), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (en inglés U.S. EPA) y las Directrices de Australia.

Las naciones que integran la UE introducen ajustes específicos en sus directrices, considerando supuestos y variables particulares de cada lugar, por ejemplo: las características del suelo, las condiciones climáticas, así como la variedad y práctica de los cultivos, ya que estas difieren entre regiones y/o países.

A pesar de que cada estado miembro de la UE especifica sus requisitos mínimos de calidad, teniendo en cuenta características locales, la UE adopta las evaluaciones

cualitativas y cuantitativas de riesgos ambientales descritas en las directrices (FAO, 1985; NRMCC-EPHC-AHMC, 2006; OMS, 2006; U.S.EPA, 2012; ISO 16075, 2015), y suma, la experiencia adquirida por los Estados Miembro en materia de riego agrícola con agua regenerada. De esta manera, se identifican riesgos ambientales claves asociados a la práctica de riego (en su mayoría efectos agronómicos adversos), en particular aquellos relacionados con los procesos de salinización, sodicidad, toxicidad y desequilibrio de nutrientes (L. Alcalde-Sanz & B. M. Gawlik, 2017).

Siguiendo el criterio establecido por la UE, el presente trabajo toma los niveles guía y recomendaciones establecidas para el uso de aguas regeneradas por la OMS y FAO en el abordaje más amplio, sumando las recomendaciones de U.S. EPA y Australia en el abordaje fisicoquímico. Su aplicación en el área de estudio se desarrolla más adelante.

2.2. Experiencias de reúso de Aguas regeneradas en el mundo

Las experiencias que serán mencionadas a continuación son en su mayoría sobre aguas regeneradas, provenientes de efluentes cloacales tratados. Esto se debe a que existe mayor cantidad de documentación disponible, comparativamente con aquellas que tienen otros orígenes, como, por ejemplo, efluentes industriales o lixiviado tratado.

2.2.1. Estados Unidos

La U.S.EPA es uno de los referentes mundiales en cuanto al uso de aguas regeneradas, siendo la guía más actualizada la publicada en el año 2012. En esta, se afirma que, aunque los Estados Unidos alcanzó numerosos logros en la expansión de la utilización de este tipo de agua, así como en la extensión de los recursos hídricos para muchas comunidades, existe aún, un margen de mejora muy grande en cuanto a la

cantidad usada. La distribución en todo el país es un tema que aún debe mejorar, así como la adopción de nuevos usos de mayor calidad. (U.S. EPA, 2012).

Con respecto a las experiencias de este país, existen referencias que datan del año 1889, en donde se afirma que se usó por primera vez efluente cloacal tratado para riego de áreas verdes en San Francisco. Posteriormente, en 1929, con un mayor conocimiento del uso de efluentes tratados, se incorporó en la agricultura, el riego de áreas verdes y jardinería en Panama city, California (Massoudinejad., M., Manshour, M., & Yazdanbakhsh, A., 2006).

Cabe mencionar que, en la actualidad, el Estado de California hace el mayor uso de aguas regeneradas de distintos orígenes. En la tabla 1, se resume el porcentaje de distribución del agua regenerada en California para el año 2009 y Florida para el año 2010, siendo mayor su utilización en el sector agrícola en el caso de California, mientras que en el estado de Florida suele tener como fin el riego de áreas verdes urbanas (U.S. EPA, 2012).

Tabla 1. Distribución de agua regenerada en California

Categoría de reúso		California (% de uso en 2009)	Florida (% de uso en 2010)
Riego	Agricultura	29	11
	Reúso Urbano (Canchas de golf y zonas verdes)	19	55
	Recarga de acuíferos	5	14
	Barrera de intrusión de agua de mar	8	-
	Reúso industrial	7	13
	Sistemas naturales y otros usos	23	9
	Embalses recreativos	7	-
	Energía geotérmica	2	-

Fuente: U.S. EPA, (2012).

2.2.2. Israel

Israel es uno de los países que mayor porcentaje de aguas regeneradas utiliza. Al poseer un territorio árido sufre de graves problemas de sequía, razón por la que se han impulsado diversos proyectos y estrategias dirigidas a la creación de nuevas tecnologías que den solución a la falta de agua dulce.

Dichas tecnologías van desde riego por goteo, uso de aguas regeneradas, hasta la desalinización de agua de mar. Estos procesos, llevaron a este país a convertirse en líder en tecnologías de tratamiento de aguas. Hoy en día, cerca del 70% de los efluentes tratados son utilizadas en el sector agrícola. El objetivo es reducir la demanda de las fuentes de agua dulce, liberando a Israel de la dependencia de las lluvias para la producción de alimentos, mediante la utilización de aguas regeneradas urbanas (Hernández Loyola, 2017).

2.2.3. Japón

Investigaciones sobre el uso de agua regenerada como una alternativa a una fuente del recurso hídrico, se vienen desarrollando en Japón desde 1964.

En 1970, como preparación para Osaka Expo, la ciudad empezó a enviar efluentes tratados a los canales de agua del castillo con el fin de mantener su nivel. Este tipo de reúso recreacional se volvió popular como método para mantener cuerpos de agua en la década de 1980.

Por su parte, en 1996, más de 13 millones de m³ de aguas regeneradas se destinaron a la agricultura en Japón, y desde entonces se han desarrollado otras alternativas, como por ejemplo fuente de agua para el uso de inodoros en ciudades como Tokio, Chiba y Kobe, o la utilización de efluentes industriales en Tokio y Nagoya en el

tratamiento de suelos, donde no se requiere una alta calidad final del agua (Massoudinejad, et al., 2006).

En el caso del norte de Japón, se usa agua regenerada para derretir la nieve acumulada a través de la provisión de zanjas de amortiguación o tanques, a los que se aplica aguas tratadas de origen cloacal (Suzuki, et al., 2002). Esta actividad representa el 20,2% del uso de este tipo de agua regenerada en el país, sin embargo, la aplicación más común es el aumento del caudal de los arroyos (35%), seguido por el riego de jardines (21,6%). Un menor volumen se utiliza para riego agrícola (5,8%), descarga de inodoro (4,1%), aplicaciones recreativas (2,1%) y actividades industriales (1,2%) (Takeuchi, H., & Tanaka, H., 2020).

A pesar de que existen numerosas prácticas de reutilización en Japón, el aprovechamiento de agua regenerada se considera todavía limitado. Esto se adjudica a que los estándares de calidad final de este recurso son inadecuados y que el consumo de energía de las plantas de tratamiento es muy elevado. Por dichas razones, este país promovió una serie de leyes entre el 2014 y el 2015, que resaltan la importancia del uso de aguas regeneradas en la gestión de los recursos hídricos.

En consecuencia, el Centro de Investigación para la Evolución de la Ciencia y la Tecnología en Japón (en sus siglas en inglés CREST), realizó estudios para desarrollar procesos de recuperación de agua energéticamente eficientes, utilizando tecnologías de membranas y procesos de ozonización. Los resultados de la evaluación integral de los rendimientos del proceso y la viabilidad económica mostraron que, un sistema constituido por ultrafiltración (UF), sistema el cual es utilizado en las plantas de tratamiento del relleno sanitario del presente trabajo de tesis, seguido de radiación

ultravioleta (UV), permite la eliminación de virus. De esta manera se alcanza un nivel adecuado para la reutilización del agua con fines agrícolas a bajo costo.

Tomando los resultados de CREST, se instaló una planta de tratamiento en Itoman a escala piloto, cuyo esquema de reúso busca que la ciudad, integre los sistemas de agua regenerada con los de abastecimiento industrial (Takeuchi, H., & Tanaka, H., 2020).

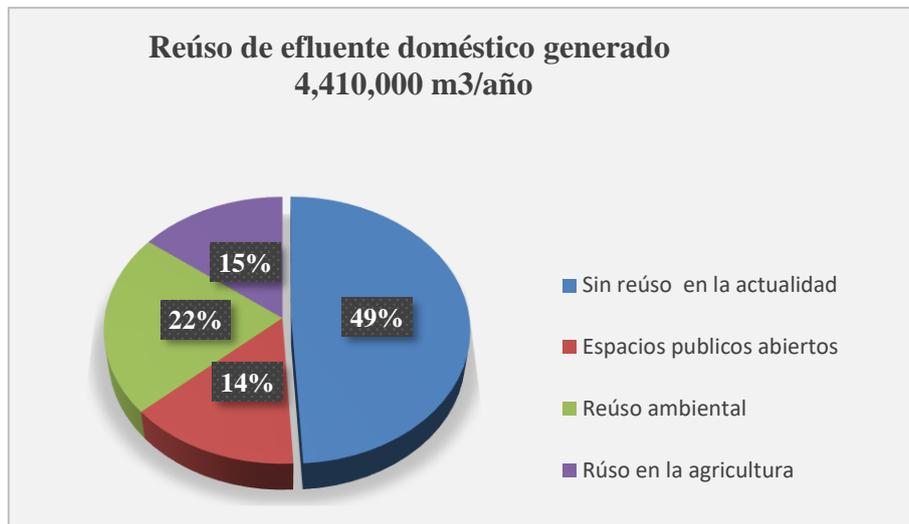
2.2.4. Australia

Como se mencionó anteriormente, Australia es un país de referencia en cuanto al uso de aguas regeneradas, por esta razón la UE tomó la normativa australiana como base para la elaboración de sus propios niveles guía.

El avance de este país en el uso de efluentes tratados se debe en parte, a que las graves sequías que se produjeron a mediados de los años 90 obligaron a sus autoridades a tomar medidas, y establecer regulaciones que aseguraran el abastecimiento de agua a la población en el corto y largo plazo. Las primeras medidas apuntaron a utilizar efluentes urbanos tratados para satisfacer la demanda del sector agrícola. Posteriormente se desarrollaron sistemas de tratamiento avanzado de efluentes, que permitieran el uso indirecto de las aguas regeneradas de la industria para riego de complejos deportivos y recarga de sistemas naturales de abastecimientos hídricos, como embalses y napas subterráneas, entre otros (Hernández Loyola, 2017).

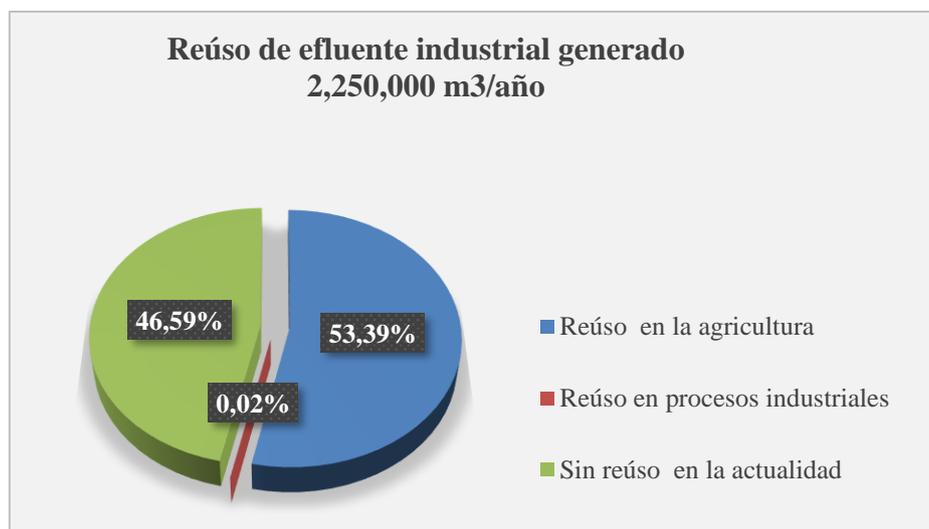
A manera de ejemplo, en la zona sur de Australia, específicamente en la cuenca del Murray Darlingse, el 15% de las aguas residuales domésticas son fuente de agua regenerada, la cual es utilizada en el riego del sector agrícola, y otro 14% en el riego de zonas verdes y de espacios públicos (ver figura 3). Por su parte, del total del efluente

industrial tratado de esta zona del país, un 53% es destinado al riego en la agricultura (ver figura 4).



Fuente: adaptado de NEW WATER (2007).

Figura 3. Reúso de efluentes domésticos generados en la zona Sur de Australia - Cuenca del Murray–Darling



Fuente: adaptado de NEW WATER (2007).

Figura 4. Reúso de efluentes industriales generados en la zona Sur de Australia - Cuenca del Murray–Darling

2.3. Situación de Argentina en el uso de aguas regeneradas

2.3.1. Marco Legal

Argentina, no tiene un marco legal relativo al uso de aguas regeneradas, que establezca condiciones mínimas requeridas y políticas de promoción para el desarrollo de esta actividad. Sin embargo, existen algunas experiencias aisladas de uso de agua regenerada con diferentes grados de consolidación, especialmente en actividades productivas. El caso de la provincia de Mendoza es una excepción, ya que cuenta con una arquitectura institucional y jurídica compleja en materia de gestión de agua y su reúso, la cual, podría ser modelo para definir los criterios esenciales de una ley a nivel nacional (Sartor , A., & Sifuentes , O.,2012).

Cabe mencionar, que el Art. 124 de la Constitución Nacional, reconoce a las provincias el dominio originario de sus recursos naturales (Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, s.f.). Las aguas situadas en territorio provincial quedan bajo su dominio y a su vez, cada provincia posee competencia para dictar su propia ley o código de aguas, fijando los criterios de asignación de los recursos hídricos, sus condiciones de uso, así como el régimen de autorizaciones y concesiones (Doria, J., 2013).

Doria, J (2013), afirma que Argentina se distingue en Latinoamérica por un pluralismo institucional, caracterizado por la ausencia de una legislación nacional y una heterogeneidad de legislaciones tanto provinciales como sectoriales. Sin embargo, a partir del año 2000, se comenzó a desarrollar un marco legal para la gestión, en el que se establecieron nuevos principios de política hídrica y algunos gobiernos provinciales dictaron nuevas leyes sobre el agua. En este marco se incluyeron, además, de manera

novedosa, principios rectores de política hídrica, organizaciones e instrumentos de planificación y gestión. (Doria, J., 2013).

Los principios rectores fueron un reflejo de los emitidos en la *Declaración de Dublín sobre Agua y Desarrollo Sustentable* de 1992. De la Política Hídrica Argentina, cabe destacar el principio 11, el cual propone la conservación y reúso del agua, estableciendo que: “Las practicas conservacionistas y el reúso del agua, brindan oportunidades para el ahorro del recurso que derivan en importantes beneficios sociales productivos y ambientales; beneficios que deben compartirse entre los múltiples usuarios del recurso. El reciclado del agua a partir de la modificación de procesos industriales, la disminución de los altos consumos de agua potable, el reúso de aguas residuales provenientes de centros urbanos e industriales en otras actividades, el aumento de eficiencia en el consumo de agua por el sector agrícola bajo riego; constituyen líneas de acción concurrentes en pos del uso racional y sustentable del recurso” (Consejo Hidrico Federal, 2003).

2.3.2. Experiencias de reúso de aguas tratadas en Argentina

El presente trabajo de tesis toma como referencia nacional, las normativas de uso de efluentes tratados para riego de cultivos de las provincias de Mendoza y la localidad Puerto Madryn, debido a su trayectoria institucional y jurídica en el reúso de aguas tratadas para riego de cultivos asociados a zonas verdes.

2.3.2.1. Mendoza

Como ya se mencionó anteriormente, Mendoza es la provincia argentina con mayor experiencia en uso de aguas regeneradas, contando con más de 9.408 hectáreas regadas en Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (ACRE).

Los ACREs, son áreas agrícolas destinadas al aprovechamiento productivo de los efluentes tratados que provienen de plantas de tratamiento cloacal. No obstante, existe la posibilidad de establecer un ACRE sin que exista una planta depuradora, siempre y cuando, se garantice que los efluentes cumplan con los parámetros de calidad previstos para estos fines (Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno, 2016).

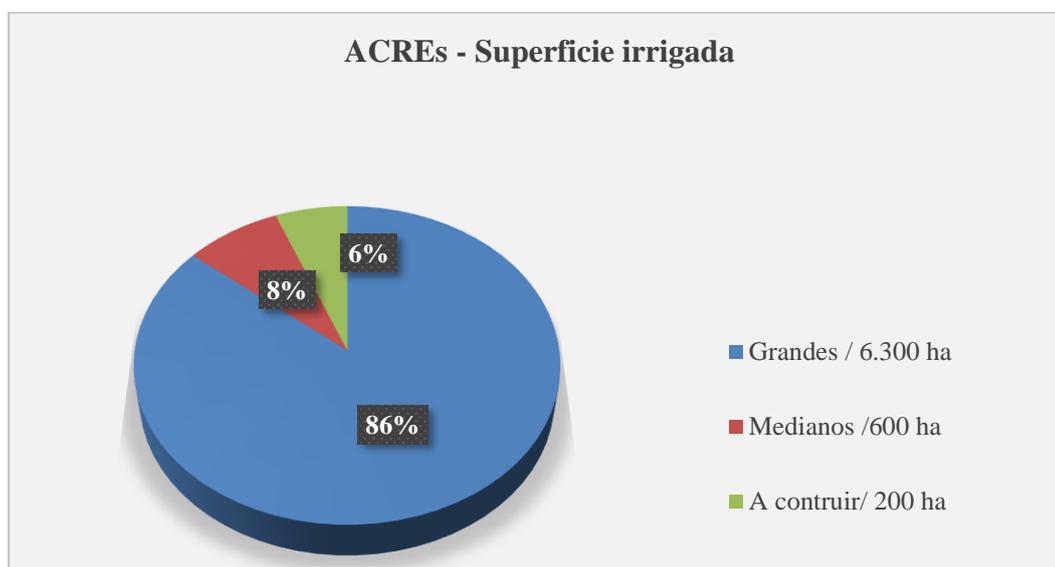
Este sistema de ACREs se materializó y se legisló en el año 2003 bajo la Resolución del Departamento General de irrigación (DGI), DGI 400/2003 Reglamento General de ACREs y DGI 500/2006 (Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno, 2016). Bajo este método, se recupera cerca del 90 % del efluente cloacal para una población de 800.000 habitantes (Hernández Loyola, 2017).

Actualmente, existen dos inspecciones denominadas ACRE Campo Espejo y ACRE Lavalle, que agrupan y administran a los usuarios de los líquidos tratados pertenecientes a las dos plantas depuradoras más grandes de la provincia: Campo Espejo y El Paramillo (Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno, 2016).

La cuenca del río Mendoza posee ACREs de diferentes características:

- grandes ACREs conformados por Campo Espejo y El Paramillo (Lavalle), con aproximadamente 3.000 ha c/u.
- ACREs pequeños formados por Costa de Araujo, Potrerillos y Penitenciaría
- ACREs proyectados a ser constituidos: Algarrobal, Uspallata, Villa Tulumaya, Colonia Segovia y Alta Montaña (Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno, 2016).

La figura 5 muestra el porcentaje relativo y cantidad de hectáreas pertenecientes a cada tipo de ACRE.



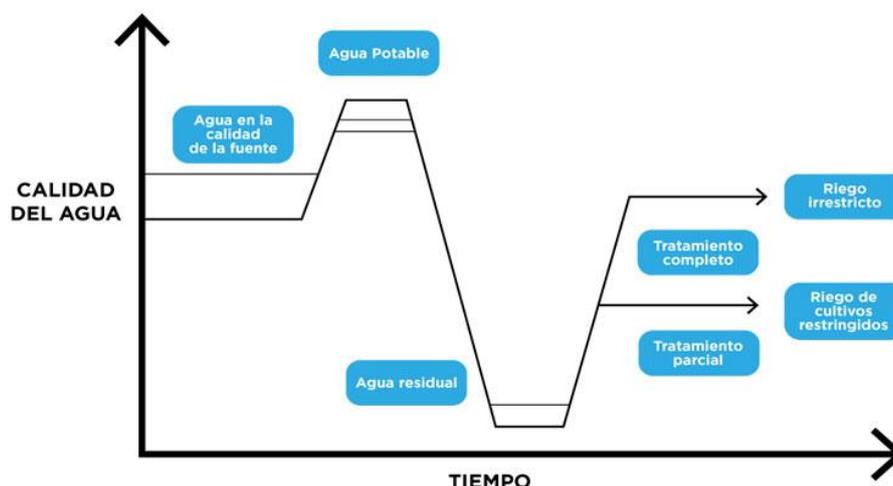
Fuente: adaptado de Departamento General de Irrigación, Mendoza Gobierno (2016).

Figura 5. ACREs en Mendoza según superficie irrigada.

Cabe mencionar, que el sistema de uso del agua residual post tratamiento para riego en la provincia de Mendoza, está basado en el principio de adecuar su calidad (mediante procesos de tratamiento) al uso que se necesite, con el fin de convertir los efluentes en un recurso adicional frente al crecimiento de la demanda de agua (ver figura 6).

De acuerdo con el nivel alcanzado en la eliminación de patógenos, y siguiendo la normativa internacional (OMS), se determinan dos categorías: riego irrestricto o riego restringido. El riego irrestricto, se refiere al uso de efluentes tratados de alta calidad para cualquier tipo de cultivo, mientras que el restringido, que es menos exigente en cuanto a la calidad del efluente, se utiliza para determinados cultivos o aquellos que van a ser

consumidos en condiciones específicas. En los dos casos sin ocasionar riesgos a la salud pública.



Fuente: Adaptado de Mc Gauhey (1968), tomada de Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno (2016).

Figura 6. Cambios en la calidad del agua post tratamientos

La aprobación de los efluentes por parte del DGI, es efectuado mediante normativa propia, la cual fue establecida bajo la sanción de la Resolución 778/96 del Honorable Tribunal Administrativo de Irrigación (HTA). Esta normativa, tomó las recomendaciones dadas por la OMS, y reguló hasta el 2020 el uso de efluentes para riego de cultivos en Mendoza. En dicho año, se realizó una revisión de esta, decretándose así la Resolución N° 52/2020.

En lo que respecta al uso de aguas regeneradas para riego, la Res 52/2020 mantiene las normativas de vertido del Anexo I- e) de la Resolución N° 778/96 del H.T.A. (incorporado y modificado por Resolución 627/00 HTA, 647/00 HTA y 715/00 HTA).

De acuerdo con el nivel de tratamiento alcanzado para el efluente, y las medidas complementarias requeridas, los cultivos permitidos para el ACRE pueden clasificarse en las categorías A o B. El detalle de estas se desarrolla en el punto 2.5.2.1. y Anexo 1.

Vale recalcar que a la categoría A, se suman una serie de medidas complementarias, relacionadas con la protección de los trabajadores rurales que tienen a cargo la labranza, el riego y la cosecha de los cultivos. En ella, se especifica, el uso de guantes y botas de goma; debiendo implementarse, además, un sistema de alerta sobre el peligro de aguas no potables acompañado de una campaña de educación sanitaria.

2.3.2.2. Puerto Madryn- provincia de Chubut

En la ciudad de Puerto Madryn, se promulgó un reglamento que tiene por objeto establecer las condiciones para la utilización de los efluentes del sistema de tratamiento de líquidos cloacales domiciliarios, los cuales pueden ser utilizados en las áreas de riego que delimita la Autoridad de Reúso (Comisión de Agua de Reúso, 2006).

La planta de tratamiento de esta ciudad fue construida bajo la participación de la comunidad, el gobierno municipal, la Universidad de Patagonia, la Fundación Patagonia Natural, Centros de Investigación (CENPAT – CONICET) la cooperativa de servicios públicos SERVICOOOP, ALUAR, la cámara de comercio e industria, entre otros. Esta alianza de sectores busca que el líquido tratado sea reutilizado en su totalidad, persiguiendo el objetivo de cero vuelcos de las aguas al golfo.

La regulación de los efluentes tratados de esta planta se efectúa mediante la Ordenanza N° 6301/06, de la municipalidad de Puerto Madryn, que toma las directrices sanitarias establecidas por la OMS para el uso de aguas regeneradas.

Según esta normativa, los cultivos se clasifican en 4 tipos de acuerdo con el nivel de calidad alcanzado por el agua tratada, según el grupo poblacional expuesto y las medidas de protección de la salud exigidas.

A continuación, se detallan la clasificación de los cultivos.

- El tipo 1, abarca fundamentalmente cultivos industriales que no son consumidos por humanos, los procesados mediante calor o esterilizados, y los forrajeros secados al sol
- El tipo 2, incluye los cultivos que producen frutas y hortalizas que se pelan y/o cocinan antes de ingerirse, o que están sujetos a un periodo de estacionamiento antes de su consumo. Así como pastos, forrajes verdes y cultivos cuyas partes vegetales para consumo humano no entren en contacto directo con el agua regenerada, con el suelo, ni se rieguen por aspersión.
- El tipo 3, contiene la siembra de césped, parques y jardines en zonas con acceso al público, lavado de automóviles y calles, uso en el combate de incendios y otros usos industriales con similar acceso o exposición al agua.
- Por último, el tipo 4 contempla productos que se consumen crudos y que se cultivan en estrecho contacto con el agua regenerada. Los detalles de cada una de estas categorías se desarrollan en el Anexo 2.

A pesar de que esta legislación solo admite el uso tipo 1 y 2, menciona que, si se dispone de un mejoramiento progresivo de los parámetros de calidad del recurso destinado a riego, se pueden alcanzar niveles necesarios para la implementación del tipo 3 y 4. En caso en que el regante, disponga de los recursos técnicos necesarios para

alcanzar la calidad de agua requerida para estos últimos tipos, la autorización es otorgada por la Autoridad de Reúso

Para cada una de las clasificaciones descritas anteriormente, se debe sumar una serie de medidas complementarias que hacen referencia al uso de elementos de protección personal (EPP), y manejo del riego.

En el caso de la categoría tipo 1, se debe implementar prácticamente las mismas medidas que establece la normativa de Mendoza, sumando el uso de anteojos. Por su parte, en los cultivos tipo 2 se solicita no regar por aspersión, la cosecha debe realizarse dos semanas después del último riego de verano, y en invierno se debe esperar hasta tres semanas antes de cosechar. No se debe recoger del suelo frutas caídas, se requiere eliminar frutas y hortalizas dañadas y evitar encharcamiento y saturación del suelo. Independiente del tipo de cultivo que se desarrolle, si se realiza con agua tratada, el inmueble deberá contar con la señalización que indique la Autoridad de Reúso (Ordenanza, 6301/2006).

En cuanto a los métodos de riego, en los sectores permitidos con agua regenerada son: por melgas sin pendiente, por surcos sin desagüe al pie, por riego subsuperficial y por riego localizado. Los emprendimientos agropecuarios tienen prohibido el riego por aspersión, pivote o similar, que proyecte el agua tratada hacia la atmosfera. Solamente se permitirá el riego por aspersión en lugares de acceso controlado, como pueden ser, canchas de fútbol, rugby, campos de golf y cementerios, siempre y cuando se realice un tratamiento complementario al efluente, que asegure una calidad tal, que no exista riesgo alguno para los trabajadores y usuarios del lugar. Este riego debe realizarse únicamente

en los momentos donde no haya acceso al público y hasta tres horas antes del ingreso de personas al predio regado.

De la normativa de Puerto Madryn, se toma como referencia para el presente trabajo de tesis, la categoría de cultivo tipo 3, ya que abarca la siembra de césped para espacios verdes y parques con acceso al público.

2.4. Experiencias de reúso de lixiviado

Como ya se mencionó, la mayoría de las publicaciones y de prácticas de uso de aguas regeneradas para riego de cultivos o de zonas verdes, están asociados a efluentes cloacales. Por este motivo, la búsqueda de documentación que sirviera de antecedentes y que aportara experiencias similares a la que se plantea en este trabajo resultó compleja. Si bien, es posible que se estén iniciando trabajos en varios rellenos sanitarios a nivel mundial, las experiencias documentadas son escasas. En particular, en nuestro país, no se ha planteado este tipo de trabajo previamente, y no se cuenta con estudios publicados ni experiencias relacionadas hasta la fecha

A continuación, se describen algunos estudios y experiencias de usos de lixiviado de un relleno sanitario como fuente de agua para riego, que se consideran relevantes por la información que aportan para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

2.4.1. Estados Unidos -Michigan

Uno de los estudios más importantes realizados en el campo del uso de lixiviado no tratado, es el trabajo realizado por MacDonald, N., Rediske, R., & Scull, B., (2008), en un relleno sanitario de RSU que se encontraba operativo. El objetivo era determinar los efectos del riego por aspersión con lixiviado bajo condiciones *in situ*, en la cobertura final del relleno.

El diseño experimental consistió en sectorizar parcelas de 20 m de diámetro (regadas con lixiviado no tratado), con su respectivo control (sin ningún tipo de riego), con el fin de evaluar el impacto a los aspectos fisicoquímicos del suelo, la respuesta de las plantas que hacían parte de la zona de estudio y la lixiviación de solutos.

La tabla 2, recopila la información que fue considerada relevante para el presente trabajo de tesis. Un mayor detalle del estudio de MacDonald N, et al. (2008), incluyendo la metodología, se detalla en el anexo 3.

Entre los resultados encontrados, se resalta que, el promedio anual de pH en el lixiviado varió ligeramente alrededor de una media general de 8,03 (ver tabla 2).

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del lixiviado no tratado del relleno sanitario de Ottawa, Michigan

Parámetro	2003	2004	2005	2006	Valor de P†
pH, log(H ⁺)	8,05 ab (0,17) ‡	8,13 a (0,15)	7,94 b (0,11)	8,00 ab (0,12)	0,018
CE, § mS/cm	5,6b (0,13)	6,4 ab (0,11)	7,2 a (0,11)	6,8 a (0,09)	0,002
NO ₃ -N, mg/l	3,4 (7,3)	2,6 (1,8)	3,3 (2,9)	3,5 (3,5)	0,985
NH ₄ -N, mg/l	296 ab (123)	322 ab (60)	386 a (131)	290 b (47)	0,039
NTK, § mg/l	ND¶	ND	357 (41)	359 (49)	0,92

Fuente: MacDonald N, et al. (2008).

† Probabilidad del ANOVA de una vía, que compara los efectos del año a menos que las concentraciones de los componentes del lixiviado estuvieran esporádicamente por debajo de los límites de detección.

Efectos significativos ($P < 0,05$) en cursiva.

Las medias anuales con diferentes letras difieren significativamente.

‡ Valores son la media y la desviación estándar de la muestra. n = 15 en 2003; n = 5 en 2004; n = 18 en 2005; n = 16 en 2006.

§ Conductividad eléctrica (CE), ortofosfato, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).

ND, no determinado; las muestras no fueron analizadas para NTK en 2003 y 2004.

Es importante mencionar que la mayor parte del Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) es amonio (NH_4^+), cuyas concentraciones en el lixiviado variaron ligeramente en el periodo de estudio, permaneciendo altas durante varios años, incluso después del cierre de los módulos (ver tabla2).

La eliminación efectiva del NH_4^+ , es una parte importante del tratamiento de lixiviados, ya que su toxicidad está fuertemente relacionada con este nutriente (MacDonald N, et al.,2008).

Contrario a lo esperado, las concentraciones del NH_4^+ , ortofosfatos y fósforo total, tendieron a ser mayores en las parcelas de control durante el 2005 (ver tabla 3). MacDonald.N et al. (2008), consideran que estos resultados se deben a que durante ese año se evidenció una menor precipitación, condiciones de suelo más secas y reducción de la absorción de estos nutrientes por parte de las plantas.

Por su parte, las concentraciones de NO_3^- medidas en el 2006, son menores a los valores observados en las parcelas de riego en los tres años anteriores. Esto se debe a la reducción de las tasas de aplicación de lixiviado, en conjunto con los efectos diluyentes de las altas precipitaciones en julio, septiembre y octubre en ese año.

Aunque el NO_3^- , se mantuvo por encima de los valores del agua potable en las parcelas de regadío, la solución del suelo mostró concentraciones de NH_4^+ por debajo de 0,3 mg/l (ver tabla 3). Las bajas concentraciones de NH_4^+ en la solución del suelo, demuestran la presencia de un proceso de nitrificación, el cual también fue observado por Bowman , M., Clune, T., & Sutton, B., (2002), Godley, A., G. Alker, J. Hallet, R. Marshall, & D. Riddell-Black. (2005) y Robertson, W.D., Murphy, & J.A. Cherry. (1995), en estudios de aplicación de lixiviado a suelos.

Tabla 3. Efectos del riego en las concentraciones medias anuales ponderadas por volumen de la solución del suelo para NO₃⁻ y NH₄⁺

Tratamiento	2003	2004	2005	2006
NO₃⁻ mg/l				
Control	1,1 (0,8) ¶	0,2 (0,05)	0,3 (0,1)	0,02 (0,02)
Riego	138,2 (35,5)	62,7 (61,1)	83,0 (51,7)	14,1 (3,2)
NH₄⁺ mg/l				
Control	0,01 (0,01)	0,03 (0,01)	0,35 (0,16)	0,10 (0,03)
Riego	0,07 (0,06)	0,03 (0,02)	0,25 (0,17)	0,16 (0,04)

Fuente: MacDonald N, et al. (2008).

¶ Los valores son la media y la desviación estándar de la muestra (n = 3 parcelas).

Las pérdidas estimadas por lixiviación de NO₃⁻ y otros solutos fueron elevadas en las parcelas de regadío, especialmente durante el primer año del estudio, cuando las tasas de aplicación de lixiviados superaron los 32 cm. Para reducir la alta lixiviación de solutos observada en 2003, las aplicaciones de lixiviado en 2004, 2005 y 2006, se programaron para que coincidieran con los periodos de mayor evapotranspiración

Se encontró además que, a pesar de presentar una tendencia creciente de NO₃⁻ en el suelo durante el periodo de riego, cuando llegaban las lluvias estas concentraciones bajaban. Godley, et al. (2005), informaron efectos similares de corta duración, cuando se intercalaban los periodos de riego con lixiviado durante el invierno. Esto sugiere que, la dilución resultante de los componentes del lixiviado reduciría los impactos en la superficie receptora o las aguas subterráneas.

Es importante resaltar que el nitrógeno (N) podría también ser eliminado por volatilización o adsorción en el suelo (MacDonald N, et al., 2008).

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) del lixiviado, aumentó ligeramente durante 2003 al 2005, posiblemente debido a que la cobertura del módulo reduce la infiltración de la precipitación dentro del mismo. Contar con una CE alta en el agua de

riego es un problema, debido a los efectos negativos que puede causar sobre las propiedades del suelo.

Si la CE del lixiviado aumentaba, los autores argumentan que se requeriría diluir el lixiviado de la zona de estudio, o mantener un equilibrio entre los riegos y los aportes de la precipitación. Esta última alternativa es solamente viable si la CE del lixiviado se mantiene alrededor de 7mS/cm.

En cuanto al balance de agua y tasas de lixiviación, se encontró que es necesario mantener los suelos por debajo de la capacidad de campo (humedad que es capaz de retener el suelo) durante los periodos de riego activo. De esta manera, se reduce al mínimo la escorrentía y las pérdidas inmediatas de soluto por lixiviación (MacDonald.N et al., 2008).

Con lo que respecta a la biomasa de los cultivos, se debe resaltar que, a pesar de obtener un aumento en las parcelas regadas con lixiviado, puede verse incrementada la CE del suelo a largo plazo. Sin embargo, se encontró que el monitoreo del suelo y del lixiviado durante el ensayo, ayudó a ajustar la planificación del riego, para evitar así, la salinización y los efectos negativos que esto conlleva sobre el cultivo (MacDonald N, et al.,2008).

Cuando se busca usar el lixiviado de un relleno sanitario para riego, la CE es sin duda alguna el parámetro limitante a la hora de definir el volumen a aplicar sobre la cobertura vegetal sin que esta se vea afectada. Por su parte, el N es el principal nutriente que se debe controlar, debido a que sus altas concentraciones pueden generar impactos negativos sobre el medioambiente. Por estas razones, los autores hacen énfasis en que los

tiempos y las tasas de aplicación deben ser cuidadosamente planificadas, con el fin de evitar pérdidas de N en forma de NO_3^- por lixiviación y un aumento de la CE del suelo.

Sin duda alguna, para MacDonald N, et al. (2008), es indispensable hacer un balance de riego teniendo en cuenta las posibles variaciones de humedad en el suelo, la evapotranspiración de los cultivos y la precipitación de la zona de estudio si se busca regar con lixiviado de un relleno sanitario de RSU.

2.4.2. Australia

Bowman, et al., publicaron en el 2002 los resultados de un estudio de aplicación de lixiviado realizado durante los años 1998 y 1999. Este consistía en evaluar el uso del lixiviado no tratado del relleno sanitario Newington, como fuente de agua de riego de *Cynodon dactylon* y *Pennisetum clandestinum*.

Se debe resaltar que el estudio, buscó principalmente utilizar el sistema planta – suelo para manejar el exceso de N y de sales con las que cuenta el lixiviado, con el fin de encontrar una alternativa con menor costo energético y económico, al sistema de tratamiento tradicional para la eliminación de N, sin afectar las especies regadas.

Contar con un sistema de riego con lixiviado no tratado como medio de biorremediación *in situ*, está limitado por la capacidad del sistema para depurar los contaminantes, en particular el N. Sin embargo, es sabido que, si las condiciones del suelo y del estado del N son favorables, puede ocurrir un proceso de desnitrificación que eventualmente proporcione un importante sumidero de N.

Para que se produzca la desnitrificación *in situ*, el amonio (NH_4^+) aplicado al suelo debe ser primero oxidado (mediante el proceso de nitrificación) para formar el nitrato (NO_3^-). La conversión de NO_3^- a N gaseoso (N_2) (por medio de la

desnitrificación), se favorece si existe alta humedad del suelo, temperaturas entre los 15 a 35°C, pH neutro, presencia de una adecuada población bacteriana, y disponibilidad de una fuente de carbono soluble (Bowman et al., 2002).

En el Anexo A.4) se presenta un mayor detalle del estudio de Bowman, et al., (2002).

A continuación, se destaca la información y los resultados que fueron considerados relevantes para el presente trabajo de tesis.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el umbral de salinidad para *Cynodon dactylon* es 6,9 mS/cm, (Bowman, et al.,2002), mientras que los niveles de salinidad de los lixiviados de un relleno sanitario de RSU, pueden llegar a superar los 15 mS/cm (Bowman, et al.,2002). Por lo tanto, controlar la salinidad es importante si se quiere hacer uso de lixiviado como fuente de agua regenerada para el riego de esta especie.

Dicho lo anterior, los autores ajustaron las concentraciones de la salinidad del lixiviado (ver tabla 4) mediante diluciones con agua de red obteniendo así: un control (100 % agua de red), 20% de lixiviado, 50% de lixiviado y lixiviado no diluido. De esta manera, se realizó un ensayo experimental que consistió en regar parcelas con las diferentes soluciones propuestas.

Entre los resultados encontrados, se destaca que las pérdidas de N en la solución del suelo fueron similares en las parcelas regadas con una concentración de 20% de lixiviado no tratado, y en aquellas regadas con el agua de control (106 y 80 kg/ha año respectivamente). Esto redujo el riesgo de tener entradas de N al río Parramatta, el cual se encuentra cercano al relleno. Por el contrario, las pérdidas fueron significativamente

mayores cuando se aplicó dilución al 50% y lixiviado no diluido (359 y 624 kg/ ha año respectivamente).

Se debe aclarar que, para promover la desnitrificación durante el ensayo, se realizaron ciclos de riego para crear pulsos anaeróbicos y mantener disponible la humedad del suelo en un 60 a 70%. Bajo este régimen de riego la desnitrificación resultó ser el principal sumidero del amonio (NH_4^+), representando alrededor de un 54% del N total aplicado en las parcelas tratadas con lixiviado en cualquiera de sus concentraciones (ver tabla 4).

Cabe resaltar, que la inmovilización o la incorporación de N en la matriz del suelo, fue la segunda forma en importancia de reducción de este nutriente, siendo equivalente a una media total de 34%. Los porcentajes inmovilizados durante el primer año de operación fueron 49 %, 42% y 35%, para las parcelas regadas con lixiviado al 20%, 50% y sin diluir; mientras que durante el segundo año los porcentajes fueron significativamente más bajos, 36%, 33% y 31 %, respectivamente.

Tabla 4. Parámetros medidos para agua de la ciudad y el lixiviado sin y con dilución

		Lixiviado	Agua de red			
media	pH (UpH)	6,8±1,2	6,90±0,4			
	CE (mS/cm)	17,6±4,6	0,10±0,04			
	RAS	33	1			
	NH4 (mg/l)	285,0±31,8	0,05±0,01			
Resultados del ensayo						
		Control	20%	50%	No diluido	
CE (mS/cm)		0,2	3,6	9,1	17,6	
Distribución de pérdidas de N aplicado (kg/ ha)						
Pérdidas de nitrógeno		Control	20%	50%	No diluido	
1998	Aplicado ^a	121	1216	3337	6082	
	Lixiviado ^b	82 (68)	97 (8)	331 (10)	446 (7)	
	Inmovilización	24 (20)	559 (49)	1401 (42)	2099 (35)	
	Captación- césped	10 (8)	37 (3)	171 (5)	221 (4)	
	Pérdida gaseosa ^c	5 (4)	523 (43)	1434 (43)	3316 (55)	
1999	Aplicado ^a	139	1431 ^d	3576 ^d	7156 ^d	
	Lixiviado ^b	78 (56)	115 (8)	386 (11)	781(11)	
	Inmovilización	30 (22)	386 (27) ^d	866 (24) ^d	1973 (28)	
	captación- césped	19 (14)	57 (4)	173 (5)	292 (4)	
	Pérdida gaseosa ^c	12 (9)	873 (61) ^d	2151(60) ^d	4110 (57) ^d	
media	Aplicado ^a	130	1324	3457	6619	
	Lixiviado ^b	80 (62)	106 (8)	359 (10)	624 (9)	
	Inmovilización	27 (21)	473 (36)	1134 (33)	2036 (31)	
	captación- césped	5 (11)	47 (4)	172 (5)	257 (4)	
	Pérdida gaseosa ^c	9 (7)	698 (53)	1793 (52)	3713 (56)	

Fuente: Adaptado de Bowman, et al., (2002).

^{*}Relación de adsorción de Sodio.

^{**} Los datos son la media de las muestras triplicadas.

Los números entre paréntesis son porcentajes (%) del nitrógeno aplicado.

^a Incluye la mineralización de nitrógeno (kg ha⁻¹).

^b Comprende el nitrógeno mineralizado (nitrato - NO₃⁻, amonio - NH₄⁺, y amoniaco - NH₃) perdido debajo de la zona de la raíz (600 mm).

^c Derivado de los cálculos de balance de masa y asumiendo que las pérdidas se deben a la desnitrificación y la volatilización (nitrógeno molecular N₂ y NH₃ respectivamente).

^d Significativo en P ≤ 0,05

Por su parte, los autores señalan que la depreciación de la capacidad del suelo, para inmovilizar nitrógeno en el segundo año, sugiere que el sistema planta-suelo alcanzó la saturación. Sin embargo, aunque la incorporación de este nutriente disminuyó, el porcentaje lixiviado no cambió significativamente con respecto al periodo anterior. Esto podría indicar que la gestión de riego adoptada durante el estudio, favoreció a las bacterias desnitrificantes del suelo, coincidiendo así con la pérdida de nitrógeno en forma gaseosa del segundo año.

En relación con el aumento de la salinidad del suelo, el riego también tuvo un efecto en las propiedades físicas de este (ver tabla 5). En la parcela tratada con lixiviado no diluido, la densidad aparente aumentó de 1,1 a 1,3 g/cm³, la porosidad disminuyó de 62 a 55%, y la clase de estabilidad del agregado, disminuyó de 5 a 3. Por el contrario, las propiedades físicas del suelo en las parcelas de tratamiento al 20% no fueron significativamente diferentes del control.

Tabla 5. Propiedades físicas del suelo bajo riego

Propiedades del suelo	año	Control ^a	20% ^a	50% ^a	No diluido ^a
Densidad aparente g/cm ³	1998	1	0,9	1,1	1,1
	1999	1,1	0,9	1,2	1,3**
Porosidad (%)	1998	61	65	69	613**
	1999	57	66	63	55
Clase de Emerson ^b	1998	5	5	5	5
	1999	5	5	3**	3*

Fuente: Bowman, et al. (2002).

^a Los datos son la media (\pm SD) de las muestras triplicadas.

^b La agregación se basa en el sistema de clasificación de Emerson (1967).

*,** Las diferencias entre 1998 y 1999 son significativas en $P \leq 0,05$ y $0,01$, respectivamente.

Sumado a lo anterior, la producción total de biomasa fue significativamente más alta durante el segundo año, tanto en el control como en el tratamiento al 20%. Por otro

lado, las tasas de producción de biomasa, en relación con la parcela de control, aumentaron cuando se aplicó dilución al 20% y disminuyeron en el tratamiento al 50% y sin diluir (ver tabla 6).

Tabla 6. Producción de biomasa de césped (kg/ha) y tasas de producción (kg/ha mes) en respuesta al riego con lixiviado

Año	Biomasa kg/ha ^a		Tasa kg/ha mes ^a	
	1998	1999	1998	1999
Control	2019±46	2228±31*	168±4	186±6*
20%	3488±38	5157±49*	291±3	430±4*
50%	2455±113	2014±78*	205±9	168±8*
No diluido	1682±74	800±216*	104±6	67±18*

Fuente: Bowman, et al. (2002).

^a Los datos son la media de las muestras triplicadas.

* Significativo en $P \leq 0,05$ con respecto a la producción del año anterior.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados durante el ensayo, Bowman, et al., (2002), concluyen que la mayor limitación para utilizar el lixiviado no tratado de Newington, para el riego de las especies *Pennisetum clandestinum* y *Cynodon dactylon*, fue su alta salinidad, la cual afectó negativamente al crecimiento del césped y la estructura del suelo. Sin embargo, fue posible lograr un control adecuado mediante una dilución al 20% ($CE \leq 3,6$ mS/cm).

De manera similar, la lixiviación de N se controló de manera más eficaz cuando se regó con la dilución al 20%, donde las aplicaciones de N fueron de 1400 kg de N/ ha año.

Aunque los autores consideran que las cargas de N aplicado pueden ser mayores a 1400kg/ha año, sin generar un impacto negativo sobre el ambiente, señalan que esto sólo podría ser viable si la salinidad fuera adecuadamente controlada.

2.4.3. Taiwán

Chin-Kuei. C, et al. (2014), señalan que los Estados nacionales deberían promover iniciativas de reutilización de lixiviados para diversos usos, en especial durante los periodos en donde escasea el agua. En el relleno sanitario de la ciudad de Keelung-Taiwán, el lixiviado tratado bajo un proceso biológico y de membranas, es utilizado en el lavado de las membranas de osmosis inversa, así como en riego de caminos y espacios verdes en esta misma ciudad.

En este caso, se hace uso de lixiviado tratado mediante osmosis inversa como fuente de agua para riego de zonas verdes, a diferencia de las plantas de tratamiento de lixiviado del relleno sanitario de la zona de estudio, que cuenta con un tratamiento de ultrafiltración y nanofiltración. Sin embargo, esta experiencia da un indicio del potencial que tiene el lixiviado tratado, para ser usado en el riego de espacios recreativos y/o contemplativos.

2.5. Niveles guía y normativa para el reúso de efluentes

2.5.1. Referentes a nivel mundial

Teniendo en cuenta las experiencias internacionales ya mencionadas, se detalla a continuación, aquellos niveles guía para el uso de aguas regeneradas que serán utilizados como referencia en este trabajo de tesis. Cabe destacar que, la mayoría de los países se remiten a estos parámetros, como punto de partida para la elaboración de sus propias normativas o niveles de referencia. De igual manera, se mencionan también, los niveles guía de Australia, debido a su amplia información documentada en relación con la calidad de agua para riego de zonas verdes, y por ser referente para la elaboración de los requisitos

mínimos de calidad para el uso de efluentes por parte de la Unión Europea (como se mencionó en el punto 2.1.4).

2.5.1.1. OMS

La OMS, a fin de hacer frente a los riesgos para la salud y el medio ambiente, causados por los contaminantes microbiológicos y químicos que pueden estar presentes en el agua, recomienda aplicar los principios de un marco de gestión de riesgos (L. Alcalde-Sanz & B. M. Gawlik, 2017). Siendo este válido tanto para agua potable, como para regenerada y de uso recreativo.

En concordancia con dicho enfoque de gestión de riesgos, la OMS elaboró una serie de directrices o guías publicadas en cuatro volúmenes para el uso seguro de las aguas residuales, los excrementos y las aguas grises. El volumen I, tiene que ver con los aspectos normativos y reglamentarios; el II, con la utilización de las aguas residuales en la agricultura; el III, con la utilización de las aguas residuales y los excrementos en la acuicultura; y el IV, aborda la utilización de los excrementos y las aguas grises en la agricultura. Como parte de las guías, se desarrolló un manual de planificación de la seguridad del saneamiento, para facilitar la aplicación de las directrices de reutilización del agua (OMS, 2006).

De esta manera, las guías de la OMS son tomadas en cuenta por otras organizaciones como la FAO y la U.S. EPA, para desarrollar sus propios niveles guía de uso de aguas regeneradas.

2.5.1.2. FAO

La FAO desarrolló una guía que permite evaluar e identificar, potenciales impactos negativos dependientes de la calidad del agua utilizada para riego. En ella, se

consideran aspectos tales como: salinidad, tasa de infiltración de agua en el suelo, toxicidad específica para determinados iones, entre otros. Además, propone una serie de usos y restricciones, presentando opciones de manejo, planificación y operación. Sin embargo, cabe resaltar que, las pautas FAO deben verse como valores de orientación, que no reemplazan el estudio particular de cada caso (EMWASTEWATER, s.f).

Las directrices que Ayer y Wastcot (FAO,1992) fueron formuladas para el regadío con agua convencional. Sin embargo, la FAO señala que pueden ser usadas como guías para el uso de efluentes (tratados o no) en el riego de cultivos. Como se muestra en la tabla 7, la FAO define niveles de restricción de uso para el agua de riego en función a la CE, la relación de adsorción de sodio (RAS) y la toxicidad de algunos iones específicos.

Teniendo en cuenta la naturaleza del lixiviado de un relleno de RSU, y las experiencias internacionales mencionadas anteriormente, en las que la salinidad de este líquido es un factor limitante cuando se utiliza para el riego de zonas verdes, se puede asumir que un agua regenerada cuya fuente es un lixiviado tratado, entraría en la categoría de restricción severa de la FAO (1992). Sin embargo, es importante tener en cuenta que el tomar como referencia el grado de restricción de uso (ninguno, moderado y severo) de la tabla 7, sirve para identificar de manera general, los parámetros y el grado de limitación del agua que se desea usar para riego de los cultivos. En este caso, es especialmente útil tener en cuenta aquellos parámetros relacionados a la salinidad del agua de riego (CE y RAS).

Tabla 7. Directrices para interpretación la calidad de las aguas de riego según la FAO

	Unidades	Grado de restricción de uso				
		Ninguno	Moderado	Severo		
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)						
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	<0,7	07-3,0	>3,0		
Solidos suspendidos totales	mg/l	<450	450-2000	>2000		
Infiltración (evaluar usando a la vez CE y RAS)						
	0-3	Conductividad Electrica	dS/m	>0,7	0,7-0,2	<0,2
Relación adsorción/ sodio (RAS)	3-6		dS/m	>1,2	1,2-03	<0,3
	6-12		dS/m	>1,9	1,9-0,5	<0,5
	12-20		dS/m	>2,9	2,9-1,3	<1,3
	20-40		dS/m	>5,0	5,0-2,9	<2,9
Toxicidad de Iones específicos (afecta cultivos sensibles)						
Sodio (Na)						
Riego por superficie	RAS		< 3	3-9	<9	
Riego por aspersión	meq/l		<3	<3		
Cloruro						
Riego por superficie	meq/l		<4	4-10	>10	
Riego por aspersión	meq/l		<3	>3		
Boro (B)	mg/l		<0,7	0,7-3,0	>3,0	
Varios (afecta cultivos sensibles)						
Nitrógeno (N-NO3)	mg/l		<5	5 - 30	<30	
Bicarbonato (HCO3)						
Aspersión foliar únicamente	mg/l		1.5	1,5 -8,5	>8,5	
pH	UpH		Rango normal 6,5-8,4			

Fuente: FAO,1992.

N-NO3: Es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en forma de nitrógeno elemental, en caso de aguas residuales incluir el nitrógeno amoniacal N-NH4 y el Nitrógeno Orgánico.

No obstante, como se verá a lo largo del presente trabajo de tesis, el grado de restricción final del agua con la que se cuenta se define mediante el análisis de diversos factores, como son: las especies vegetales a regar, el tipo de suelo, la precipitación, la hidrogeología de la zona de estudio y el tipo de población implicada con el área de riego. Es por esta razón que la tabla 7 es útil como punto de partida, para dar una idea sobre la complejidad que puede tener el hacer uso de un lixiviado tratado como agua regenerada, pero no determina su viabilidad en el regadío de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio.

En cuanto a los parámetros microbiológicos, la FAO (1992) toma las recomendaciones que propone la OMS para el uso de efluentes como agua de riego (ver tabla 8).

Es importante aclarar que la OMS, promueve el uso de aguas residuales en la agricultura, siempre y cuando estas prácticas sean acompañadas de una serie de medidas y precauciones, que buscan disminuir a un nivel razonable los riesgos para la salud humana.

Para el análisis de datos del presente trabajo de tesis, se toman de la FAO los niveles guía de calidad microbiológica correspondientes a la categoría A, cuya condición de reúso corresponde a riego de cultivos que probablemente se comerán sin cocinar, campos deportivos y parques públicos.

Tabla 8. Niveles guía de calidad microbiológica recomendada para el reúso de efluentes en la agricultura ^a

Categoría	Condición de reúso	Grupo expuesto	Nematodos^b intestinales (número de huevos por litro^c)	Coliformes fecales (UFC/100ml^c)	Tratamiento de efluentes esperado para que se alcance la calidad microbiológica requerida.
A	Riego de cultivos que probablemente se comerán sin cocinar, campos deportivos, parques públicos	Trabajadores, consumidores, público	<1	<1000 ^d	Tanques de estabilización en serie diseñados para lograr la calidad microbiológica indicada, o tratamiento equivalente
B	Riego de cereales, cultivos industriales, especies forrajeras, pasturas y árboles	Trabajadores, consumidores, público	<1	No existe un estándar recomendado	Retención en estanques de estabilización durante 8-10 días o eliminación equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego localizado de cultivos en la categoría B sin exposición de los trabajadores y del público	Ninguno	No aplica	No aplica	Pretratamiento según lo requiera la tecnología de riego, pero no menos que una sedimentación primaria

Fuente: FAO,1992 tomado de OMS,1989.

Contiúna

Tabla 8: Continuación

^a En casos específicos, deben tenerse en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales locales, y las directrices deben modificarse en consecuencia.

^b Especies de *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostomas.

^c Durante el período de riego.

^d Una guía más estricta (<200 coliformes fecales por cada 100 ml) es apropiada para los céspedes públicos, como el césped de hoteles, con los cuales el público puede entrar en contacto directo.

^e En el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de que se recolecte la fruta, y no se debe recoger ninguna fruta del suelo. No se debe usar riego por aspersión.

2.5.1.3. Australia

Los niveles guía de reúso de agua tratada en Australia, son pautas nacionales que se han desarrollado bajo los auspicios de la Estrategia Nacional de Gestión de la Calidad del Agua (NWQMS), con el fin de proporcionar orientación sobre las mejores prácticas para el reciclaje del agua, no son prescriptivos y no representan estándares obligatorios. Sin embargo, están diseñados para proporcionar una referencia autorizada en el uso de aguas regeneradas. (Environment Protection and Heritage Council, the Natural Resource Management Ministerial Council and the Australian Health Ministers' Conference., 2006)

Debido a que la salinidad de las aguas tratadas (especialmente aquellas que provienen del lixiviado de un relleno sanitario de RSU), es un factor limitante a la hora de hacer uso de esta fuente de agua para riego, se considera relevante la información que la normativa de Australia toma del Departamento de Conservación Ambiental (DEC, por sus siglas en inglés). Esta clasificación general de las aguas de riego según su salinidad (ver tabla 9), se basa en la CE.

Por su parte, los niveles guía de Australia brindan, además, información relevante en lo que respecta a la tolerancia a la salinidad de una gran variedad de especies vegetales, tanto comestibles como ornamentales.

Tabla 9. Clasificaciones generales de salinidad del agua de riego basadas en la CE

CE (mS/cm)	Clasificación de la salinidad del agua	Tolerancia del cultivo
<0,65	Muy bajo	Cultivos sensibles
0,65 - 1,33	Bajo	Cultivos moderadamente sensibles
1,3 - 2,9	Medio	Cultivos moderadamente tolerantes
2,9 -5,2	Alto	Cultivos tolerantes
5,2-8,1	Muy alto	Cultivos muy tolerantes
>8,1	Extremo	Generalmente muy salino

Fuente: DEC (2004).

En el caso de las especies pertenecientes al género *Cynodon*, los niveles guía de Australia indican una tolerancia al riego con agua cuya CE este entre 3,7 y 11 mS/cm, si se encuentra el cultivo en un suelo arenoso y se aplica un factor de lixiviación (LF) del 25 %. En el caso de un suelo franco arenoso, la CE debe estar entre 3,2 y 9,5 mS/cm con un LF del 20%. Para un suelo franco, el rango varía entre 2,7 y 8,1 mS/cm, con un LF del 17 %; y en el caso de un suelo arcilloso ligero, los valores varían entre 2,2 y 8,1 mS/cm, con un LF del 12 %.

Para *Lolium multiflorum*, la CE del agua de riego para un suelo arenoso con un LF de 25%, es de 1,7 mS/cm. En el caso de un suelo franco arenosos con un LF de 20%, el valor es de 1,5 mS/cm. Para un suelo franco con un LF de 17%, la CE es de 1,2 mS/cm, y para un suelo arcilloso ligero con un LF de 12%, el valor estimado es de 1,0 mS/cm.

Cabe mencionar que, estos valores se estimaron a partir del promedio de la CE medida en suelo para un crecimiento del 80%, asumiendo que las precipitaciones son limitadas.

Los valores que brinda la guía de Australia son orientativos, ya que la tolerancia de las plantas variará dependiendo de una serie de factores, tales como: la especie, el tipo de suelo, el drenaje, el clima y el estado vegetativo del cultivo (National Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks, 2006).

La tabla 10, presenta un listado con los parámetros considerados más importantes de la normativa de agua regenerada para riego en Australia. (Maheshwari. B, Rahman. M.M, & Hagare.D, 2016). Estos parámetros y los valores de tolerancia a la salinidad de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, fueron tenidos en cuenta a la hora de evaluar el potencial uso del lixiviado tratado en la zona de estudio.

Tabla 10. Norma de agua regenerada para el riego en Australia

Parámetros	Unidad	Normativa Agua regenerada para riego
		Australia ^a
Conductividad	mS/cm	0,65-1,3 ^b
Sólidos disueltos totales	mg/l	600-1000 ^c
RAS	mg/l	10-18 ^c
DBO ₅	mg/l	≤ 20
Aluminio	mg/l	5
Arsénico	mg/l	0,1
Boro	mg/l	0,5
Cadmio	mg/l	0,01
Cobalto	mg/l	0,05
Cobre	mg/l	0,2
Hierro	mg/l	0,2
Plomo	mg/l	2
Manganeso	mg/l	0,2
Molibdeno	mg/l	0,01
Níquel	mg/l	0,2
Selenio	mg/l	0,02
Zinc	mg/l	2
Sodio	mg/l	230-460 ^c
Cloro	mg/l	350-700 ^c

Continúa

Tabla 10: continuación

^a Maheshwari. B, et al., (2016)

^b La tasa de salinidad del agua: baja

^c Para plantas moderadamente tolerantes, ej. Alfalfa

2.5.1.4. U.S. EPA

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA por sus siglas en inglés), propone una serie de categorías para el reúso de aguas tratadas, según el tipo de tratamiento a la que haya sido sometida y la calidad alcanzada. Las categorías o usos son: urbano no restringido, urbano con áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto (U.S. EPA, 2004).

Se debe resaltar que, la U.S. EPA recomienda el uso de estándares para el uso de efluentes mucho más estrictos que los indicados por la OMS. La pauta es que los coliformes fecales no deberían exceder 14 NMP/100 ml en una muestra dada, lo que en la práctica significa que sea no detectable, mientras que, para la categoría más exigente de la OMS, se requiere ≤ 1000 NMP. Estos valores más exigentes por parte de la U.S. EPA, se alcanzarían empleando tratamiento biológico (secundario) más filtración. En contraposición la U.S. EPA no contempla valores guía para huevos de nematodos.

Aunque estas directrices se enfocan en la recuperación y reutilización del agua para Estados Unidos, han sido utilizadas por distintas naciones en el establecimiento de programas de uso de aguas regeneradas.

La tabla 11, presenta las categorías asociadas al riego de zonas verdes y agrícolas, con efluentes cloacales o con un aporte limitado de efluente industrial. Se detalla el

tratamiento sugerido en cada categoría, la calidad del agua recuperada y el monitoreo que debe preverse. El presente trabajo de tesis toma de esta tabla, los parámetros asociados a la categoría “Reúso Urbano Restringido”, la cual contempla el riego en áreas verdes urbanas, como pueden ser los espacios dedicados a cementerios, canchas de golf, parques, entre otros. Por su parte, esta categoría no permite el acceso libre al público, debe existir barreras físicas, señalización y/o control del ingreso de personal de manera temporal a las zonas regadas con agua regenerada. Cabe aclarar, que el relleno sanitario de RSU de la zona de estudio del presente trabajo de tesis, cumple con todas estas características. En el punto 3.4.2, se desarrolla el tema de barreras múltiples y control del acceso al público para este relleno.

Es importante resaltar que la U.S.EPA, define valores diferentes a un mismo parámetro fisicoquímico, en función de si el riego se planifica a corto o largo plazo (ver anexo A.7). El presente trabajo adopta los valores más exigentes (largo plazo), debido a dos razones principales. En primer lugar, se busca evaluar la posibilidad de utilizar el lixiviado tratado durante todo el período de actividad, clausura y posclausura del relleno sanitario (en donde los lixiviados siguen siendo tratados). La segunda razón, tiene que ver con reducir futuros impactos negativos relacionados con la acumulación de sales en el suelo.

Tabla 11. Niveles guía para el reúso de efluentes en la agricultura y riego de zonas verdes

Tipos de Reúso	Tratamiento	Calidad del agua regenerada	Monitoreo del agua regenerada
<p><u>Reúso urbano no restringido</u> Riego en todo tipo de áreas verdes. (ej. Cancha de golf, parques, cementerios) El acceso al público no es restringido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundario¹ • Filtración⁷ • Desinfección⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH=6-9 • ≤10 mg/l DBO • ≤ 2 NTU • No detectable CF/100ml² • 1 mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH – Semanal • DBO- Semanal • Turbidez- Continuo • CF- Diario • Cl₂ residual- Continuo
<p><u>Reúso urbano restringido</u> Riego en todo tipo de áreas verdes. (ej. Cancha de golf, parques, cementerios) El acceso al público es restringido por barreras físicas, señales de advertencia o acceso temporal restringido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundario¹ • Desinfección⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH=6-9 • ≤30 mg/l DBO • ≤ 30 TSS • ≤200 CF/100ml^{3,4,5} • 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH – Semanal • DBO- Semanal • TSS- Diario • CF- Diario • Cl₂ residual- Continuo
<p><u>Reúso en la agricultura- Cultivos alimenticios sin ser procesados.</u> Riego superficial o por aspersión de cualquier cultivo alimenticio incluyendo los alimentos que se consumen crudos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundario¹ • Filtración⁷ • Desinfección⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH=6-9 • ≤10 mg/l DBO • ≤ 2 NTU • No detectable CF/100ml² • 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH – Semanal • DBO- Semanal • Turbidez- Continuo • CF- Diario • Cl₂ residual- Continuo •
<p><u>Reúso en la agricultura- Cultivos alimenticios procesados.</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundario¹ • Desinfección⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH=6-9 • ≤30 mg/l DBO • ≤ 30 mg/l TSS • ≤ 200 CF/100ml^{3,4,5} • 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH – Semanal • DBO- Semanal • SS – Diario • CF- Diario • Cl₂ residual- Continuo
<p><u>Reúso en la agricultura- Cultivo no alimenticios-</u> Pasturas para animales productores de leche, forraje, fibras, semillas para cultivos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundario¹ • Desinfección⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH=6-9 • ≤30 mg/l DBO • ≤ 30 mg/l TSS • ≤ 200 CF/100ml^{3,4,5} • 1mg/l Cl₂ residual (mínimo)⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • pH – Semanal • DBO- Semanal • SS – Diario • CF- Diario • Cl₂ residual- Continuo

Fuente: EMWATERS, s f, (adaptado de U.S. EPA/USAID, 1992⁹ y de los niveles Guía de U.S. EPA/USAID,2012).

Continúa

Tabla 11: continuación.

SS= Sólidos suspendidos; CF= Coliformes fecales.

¹ Los tratamientos secundarios usados deben producir efluentes con valores de DBO y SS \leq a 30 mg/l. Incluye los tratamientos secundarios por lodo activado, lecho fijo, contactores biológicos rotativos, y posibles lagunas de estabilización.

² El valor de Coliformes fecales debe ser menor o igual a 14/100 ml en la muestra.

³ A menos que se indique lo contrario, los límites de coliformes recomendados son valores promedio determinados a partir de los resultados bacteriológicos de los últimos 7 días para los que se han completado los análisis. Se puede utilizar el filtro de membrana o la técnica de tubo de fermentación.

⁴ El valor de coliformes fecales debe ser menor o igual a 800/100 ml. Algunas lagunas de estabilización pueden alcanzar dichos valores sin necesidad de realizar una desinfección.

⁵ Algunos sistemas de estanques de estabilización pueden ser capaces de cumplir con este límite de coliformes sin desinfección.

⁶ Se aplica solo cuando se usa cloro como desinfectante primario. El cloro residual total debe cumplirse después de un tiempo de contacto real mínimo de al menos 90 minutos, a menos que se haya demostrado que un tiempo de contacto menor proporciona un organismo indicador y una reducción de patógeno equivalente a los sugeridos en estas pautas. En ningún caso el tiempo real de contacto debe ser inferior a 30 minutos.

⁷ Se refiere a filtro el paso de efluente a través de un suelo no perturbados o medios filtrantes como arena y / o antracita; o el paso de efluentes a través de microfiltros u otros procesos de membrana.

⁸ Desinfección significa la destrucción, inactivación o eliminación de microorganismos patógenos por medios químicos, físicos o biológicos. La desinfección se puede lograr por cloración, ozonización, otros desinfectantes químicos, UV, procesos de membrana u otros procesos.

⁹ Guía que se basa en la recuperación y reúso de agua en U.S.A. y se encuentra dirigida especialmente a todos los Estados que no tienen desarrollada su propia regulación y valores guía. Se debe tener en cuenta que, aunque los valores guía pueden ser útiles para otras áreas fuera de U.S.A. las condiciones locales pueden limitar la aplicabilidad de las directrices en algunos países.

2.5.1.5. Reducción de microorganismos

Los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales actúan como descomponedores beneficiosos de nutrientes y materia orgánica. Sus concentraciones son típicamente reportadas en un sistema logarítmico (por ejemplo, 1 millón = 10^6 microorganismos), porque pueden estar presentes en concentraciones muy altas. Asimismo, pueden ser eliminados en grandes cantidades mediante los tratamientos, y las escalas logarítmicas permiten evidenciar estos grandes rangos de concentraciones.

Además de los microorganismos beneficiosos, las aguas residuales domésticas sin tratar pueden contener una gran variedad de microorganismos patógenos, que provienen principalmente de las heces de los humanos infectados, y se transmiten principalmente por la vía "fecal-oral" (U.S. EPA, 2012). La eliminación de microorganismos se informa típicamente de manera logarítmica, donde 1 log indica una eliminación del 90 %; 2 log del 99%; 3 log del 99,9 %; 4 log del 99,99 %, y así sucesivamente.

Un patógeno es un microorganismo que causa una enfermedad en su huésped. La mayoría de los patógenos encontrados en las aguas residuales no tratadas se conocen como microorganismos entéricos, ya que habitan en el tracto intestinal, pudiendo causar enfermedades, como la gastroenteritis o el cólera. Los virus patogénicos, bacterias, protozoarios y helminto pueden pasar mediante las excretas de una persona infectada a una sana por medio de la boca (es decir al consumir verduras o frutas que no fueron previamente desinfectadas), o de la piel (como es el caso de los anquilostomas y esquistosomas).

Las aguas residuales pueden llegar a tener elevadas concentraciones de agentes patógenos excretados y las características causales varían y son importantes para determinar en qué circunstancias se puede fomentar o controlar una infección con las prácticas de aprovechamiento de las aguas residuales. Algunos ejemplos de estos patógenos son los virus, bacterias y helmintos como *Enterobius vermicularis* (lombriz blanca u oxiuro) e *Hymenolepis nana* (tenia enana). En el caso de los huevos de los nematodos intestinales transmitidos por el suelo, que no necesitan un huésped intermedio, requieren un periodo de latencia para desarrollarse en el medio ambiente antes que puedan causar infección. Por su parte, la dosis infecciosa mínima es un solo microorganismo y estos parásitos se ven muy poco afectados por la inmunidad del huésped. Los más

importantes son las ascárides *Ascaris lumbriciodes*, los anquilostomas *Ancylostoma duodenale*, y *Necator americanus*, en el caso de los tricocéfalos es común *Trichuris trichiura*. Estas especies se transmiten fácilmente mediante el uso de excretas y aguas residuales que no han pasado por un tratamiento o que ha sido insuficiente.

En el caso de la *Taenia saginata* y *Taenia solium* su transmisión necesita que una vaca o un cerdo debe ingerir primero los huevos viables antes de que el hombre pueda infectarse mediante el consumo de su carne mal cocida. Una posible transmisión es el riego de áreas de pastura con aguas residuales (OMS,1989)

A pesar de lo expuesto, es posible lograr una calidad de agua adecuada al uso que se le va a dar, mediante procesos biológicos convencionales y desinfección. Sin embargo, a medida que aumentan las posibilidades de contacto humano, puede ser necesario efectuar un tratamiento avanzado del tratamiento secundario. Es por esta razón, que el nivel y los procesos de tratamiento que se empleen en un proyecto de reutilización, deben tener en cuenta el uso final, para así, alcanzar las metas de calidad del agua y los objetivos de tratamiento.

Cabe mencionar que, no todos los componentes contenidos en las aguas residuales tienen efectos negativos para todos los usos. Los nutrientes, por ejemplo, pueden ser beneficiosos cuando el agua se reutiliza para el riego agrícola, compensando la necesidad de aplicar fertilizantes suplementarios (U.S. EPA, 2012). Por otra parte, la eliminación de nutrientes podría ser fundamental para evitar procesos de eutrofización, cuando el agua se reutiliza en ecosistemas acuáticos, o cuando el agua recuperada pueda repercutir en fuentes subterráneas de agua potable, ya que el exceso de nutrientes puede ser perjudicial para la salud humana.

La U.S. EPA clasifica los agentes infecciosos en: bacterias, parásitos (protozoos, helmintos) y virus. La tabla 12 presenta los rangos de reducción (expresados mediante logs) que pueden alcanzarse con distintas etapas y tecnologías de tratamiento (U.S. EPA, 2012).

En la tabla 13, se resume los contaminantes y microorganismos típicos que pueden removerse mediante tecnologías de membrana.

Es importante resaltar que, el lixiviado de la zona de estudio es tratado bajo un proceso biológico (anaeróbico y aeróbico), seguido de un tratamiento de membranas de ultrafiltración (UF) y Nano filtración (NF).

Debido a que las distintas etapas de tratamiento de un efluente actúan como barrera para el paso de patógenos al líquido final, en el punto 3.4.2, se analiza la reducción de microorganismos en el tratamiento del lixiviado de la zona de estudio.

Tabla 12. Reducción de microorganismos indicadores y patógenos entéricos durante las diversas etapas del tratamiento de aguas residuales

Tipo de microorganismo	microorganismos / indicador			microorganismos /patógenos				
	<i>Escherichia coli</i> (bacteria indicadora)	<i>Clostridium perfringens</i>	Bateriofagos o Fagos (indicador de virus)	Bacterias entéricas (ej. <i>Campylobacter</i>)	Virus entéricos	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Helmintos
Bacteria	x	x		x				
Protozoos y helmintos						x	x	x
Virus			x		x			
Log de reducciones en varias etapas del tratamiento de aguas residuales ¹								
Tratamiento secundario	1 - 3	0.5 - 1	0.5 - 2.5	1 - 3	0.5 - 2	0.5 - 1.5	0.5 - 1	0 - 2
filtración dual media ²	0 - 1	0 - 1	1 - 4	0 - 1	0.5 - 3	1 - 3	1.5 - 2.5	2 - 3
Membrana de filtración UF, NF, Osmosis inversa	4 - >6	>6	2 ->6	>6	2 ->6	>6	4 ->6	>6
Reservorio	1 - 5	N/A	1 - 4	1 - 5	1 - 4	3 - 4	1 - 3.5	1.5 - > 3
Ozonización	2 - 6	0 - 0.5	2 - 6	2 - 6	3 - 6	2 - 4	1 - 2	N/A
Desinfección con UV	2 ->6	N/A	3 ->6	2 ->6	1 ->6	3 ->6	3 ->6	N/A
Oxidación avanzada	>6	N/A	>6	>6	>6	>6	>6	N/A
Cloración	2 ->6	1 - 2	2 ->6	2 ->6	1 - 3	0.5 - 1.5	0 - 0.5	0 - 1

Fuentes: Bitton, 1999; EPHC, 2008; Mara y Horan, 2003; NRC, 1998; NRC, 2012; Rose y otros, 1996; Rose, y otros,2001; U.S. EPA, 1999, 2003, 2004; OMS, 1989, tomado de U.S. EPA,2012.

¹ Las tasas de reducción dependen de condiciones operativas específicas, como los tiempos de retención, los tiempos contacto y las concentraciones de químicos utilizados, el tamaño de los poros, la profundidad de los filtros, el pretratamiento y otros factores. Los rangos dados no deben ser usados como diseño o bases reguladoras: están destinadas a mostrar sólo comparaciones relativas.

² incluyendo coagulación.

³ Las tasas de remoción varían dramáticamente dependiendo de la instalación y el mantenimiento de las membranas.

N/A = no aplica

Tabla 13. Remoción de contaminantes por medio de filtración por membrana

Filtración por membrana	Remoción de contaminantes
Microfiltración	SST, turbidez, algún protozoario, ooquistes y quistes, algunas bacterias
Ultrafiltración	Macromoléculas, coloides, la mayoría de las bacterias, algunos virus, proteínas
Nanofiltración	Moléculas pequeñas, algunas durezas, virus.
Osmosis inversa	Moléculas muy pequeñas, color, dureza, sulfatos, nitrato, sodio, otros iones.

Fuente: U.S.EPA, (2012).

2.5.2. Referentes a nivel nacional

2.5.2.1. Normativa de efluentes para uso de agua regenerada en Mendoza

Como ya se mencionó en el punto 2.3, la Argentina no cuenta con un marco legal nacional que regule el uso de aguas regeneradas. Sin embargo, el modelo jurídico e institucional de Mendoza, ha servido como base para otros casos de utilización de las aguas residuales a nivel nacional.

El sistema de uso del agua residual para riego, en la provincia de Mendoza, está basado en el principio de adecuar la calidad del agua según su destino final. La Resolución 778/96 del Departamento General de Irrigación, regula la utilización de efluentes como fuente de agua regenerada para el riego de cultivos. Esta Resolución establece categorías de reúso para efluentes cloacales e industriales, de acuerdo con el nivel de tratamiento alcanzado por el efluente y con las medidas complementarias aplicadas. Dichas categorías se describen a continuación y se presentan en detalle en el anexo A1.

Categoría A: incluye los cultivos regados con efluentes sometidos a un tratamiento primario, el cual tiene como objetivo la reducción de los sólidos en suspensión (flotantes y sedimentables), mediante su sedimentación y/o retención.

Esta categoría abarca fundamentalmente:

- Cultivos industriales no aptos para consumo humano, procesados mediante calor o esterilización, cultivos de productos enlatados y forrajeros. Por ejemplo, algodón, forestales y viveros.
- Cultivos normalmente procesados mediante calor, secados o envasados con procesos de esterilización antes del consumo humano: frutas y verduras para conserva, semillas oleaginosas, oréganos y otras yerbas aromáticas desecadas, vid para vino, cereales. verduras y/o frutas exclusivamente para enlatados u otros tratamientos que destruyan los agentes patógenos.
- Cultivos forrajeros secados al sol y recolectados antes de ser consumidos por animales y riego de campos en zonas cercadas y sin acceso de público como pueden ser viveros, bosques, zonas verdes, etc.

Categoría B: contempla los cultivos regados con efluentes que presentan un tratamiento secundario, es decir que previamente a su uso, han pasado por un proceso biológico.

En esta categoría se encuentran:

- Cultivos de frutas y verduras que se pelan o cocinan antes de ingerirse, o que están sujetos a un período de estacionamiento antes de su consumo. Incluye también cultivos de pastos y forrajes verdes, no permitiendo que las vacas lecheras pasten en estas tierras mientras se encuentren humedecidas con el efluente.

- Cultivos para consumo humano que no entren en contacto directo con las aguas residuales, no se arranquen del suelo, ni se rieguen por aspersión (árboles frutales, viñas, etc.), o cultivos para consumo humano que normalmente se ingieren sólo después de ser cocinados. Estos pueden ser regados con líquido cloacal siempre que el mismo deje de ser aplicado al terreno o a los vegetales, por lo menos un mes antes de la cosecha y/o consumo del producto (maíz, coliflor, berenjena, etc.).
- Cultivos para consumo humano cuya cáscara no se come (melones, sandías, pepinos, maní, etc.), tratando que el líquido cloacal no se ponga en contacto con el producto.

Con respecto al lixiviado de la zona de estudio, se busca que este sea utilizado como riego de zonas verdes, por lo tanto, podría pensarse que esta actividad encuadra dentro de la categoría A de la normativa de Mendoza, sin embargo, el presente trabajo de tesis toma como referencia la categoría B, debido a que el lixiviado cuenta con tratamiento secundario seguido de ultra y nanofiltración. De esta manera, se evalúa la calidad del lixiviado tratado, con los parámetros más exigentes de esta normativa.

El lixiviado en sí, no es un líquido cloacal ni industrial, sin embargo, debido a que el relleno sanitario analizado en el presente trabajo de tesis recibe solo corrientes de residuos provenientes de hogares, escuelas, oficinas, centros recreativos/deportivos, barridos de calles y no recibe corrientes de residuos peligrosos ni patológicos, se decide tomar como referencia la categoría de la norma de Mendoza para efluentes cloacales con tratamiento secundario.

Cabe mencionar que, si se tomara esta misma normativa en la categoría de efluentes industriales, solo algunos pocos parámetros (detergentes, sodio y manganeso)

resultan más estrictos que los definidos para la categoría de efluente cloacal con tratamiento secundario. En el caso de parámetros como DBO, DQO y RAS, (parámetros de importancia en este estudio debido a las características fisicoquímicas de los lixiviados de RSU), la categoría de efluentes industriales solo indica que el valor máximo permitido debe determinarse en función de la potencial afectación al recurso hídrico, ya sea superficial o subterráneo (ver Anexo A.5); mientras que, en el caso de la normativa para efluentes cloacales, se detallan los valores límites y recomendados, siendo esto útil a la hora de evaluar los parámetros medidos al lixiviado tratado de la zona de estudio.

La norma de Mendoza de calidad de efluentes cloacales con tratamiento primario para reúso agrícola se presenta en el anexo A.6.

Dicho lo anterior, para el análisis de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado tratado de la zona de estudio, se usaron los valores máximos estipulados por la normativa de Mendoza para efluentes cloacales con tratamiento secundario, según el Anexo I-c de la Resol. N°778/96 H.T.A (incorporado y modificado por Resolución 627/00 HTA y 647/00 HTA). de la tabla 14.

Tabla 14. Normas de calidad de efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
A) PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS			
Conductividad	μS/cm	2500	1800
pH	unidades	5.5 - 9	6,5 - 8.0
Temperatura	°C	45	30
RAS	N°	6	4
Solubles en éter	mg/l	80	30
Sólidos sedimentables en 10'	ml/l	0,5	<0,5
B) SUSTANCIAS INORGÁNICAS			
ANIONES			
Sulfatos	mg/l	600	400
Cloruros	mg/l	500	400
Fluoruro	mg/l	1	0,6
Sulfuros	mg/l	1	0,5
Cianuros	mg/l	0,1	0,05
CATIONES			
Sodio	mg/l	500	250
Manganeso	mg/l	0,5	0,2
Bario	mg/l	2	1
Boro	mg/l	1	0,5
Hierro total	mg/l	5	3
Aluminio	mg/l	5	2
Arsénico	mg/l	0,1	0,05
Cadmio	mg/l	0,01	<0,01
Cobre	mg/l	1	0,5
Cromo (+6)	mg/l	0,1	0,05
Cromo total	mg/l	0,5	<0,5
Zinc	mg/l	3	2
Níquel	mg/l	0,5	0,2
Mercurio	mg/l	0,005	0,001
Plomo	mg/l	0,5	<0,5
Selenio	mg/l	0,05	0,02
Cobalto	mg/l	0,1	0,05
Detergentes	mg/l	3	1
Hidrocarburos totales	mg/l	10	5
Cloro libre residual	mg/l	0,5	<0,5
Fenoles	mg/l	0,05	<0,05

Continúa

Tabla 14: continuación

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
C) NUTRIENTES			
Potasio	mg/l	*	*
Nitratos	mg/l	*	*
Nitritos	mg/l	*	*
Nitrógeno amoniacal	mg/l	*	*
Nitrógeno total	mg/l	*	*
Fosfatos	mg/l	*	*
Fósforo total	mg/l	*	*
D) PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS Y ORGÁNICOS			
Bacterias	Ufc/ml	*	*
Aeróbicas			
<i>Escherichia coli</i>	Nº/100 ml	1000	250
Pseudomonas aeruginosas	Nº/100 ml	*	*
Aeruginosas			
	huevos/1000		
Helmintos	ml	1	< 1
D.Q.O.	mg/l	70	50
D.B.O.	mg/l	30	<30
E) ELEMENTOS RADIOACTIVOS			
Uranio	ug/l	1500	1500
Radio 226	pico curie/l	5	5

Fuente: Tomado de anexo I-c Res. N°778/96 H.T.A Mendoza

* Limite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.

2.5.2.2. Normativa de efluentes para uso de agua regenerada en Puerto Madryn

Como se mencionó anteriormente (punto 2.3.2.2) la Ordenanza N° 6301/06, que rige el riego con efluentes en la ciudad de Puerto Madryn, adopta una clasificación en 4 grupos, en la que se relaciona el tipo de cultivo con el nivel de calidad alcanzado por el agua tratada, el grupo poblacional expuesto y las medidas de protección de la salud exigidas.

Esta tesis, toma como referencia la categoría de cultivo tipo 3, la cual contempla la siembra de césped, riego de espacios verdes y de parques con acceso al público.

En cuanto al uso de EPP, se sugiere que los trabajadores a cargo de las labranzas, el riego y la cosecha, deben utilizar guantes, anteojos de seguridad, barbijos y calzado apropiado. Además, se recomienda implementar un sistema de alerta sobre el peligro de las aguas tratadas acompañado de una campaña de educación sanitaria.

En la tabla 15, se recopila de la Ordenanza N° 6301/06, los parámetros con sus respectivos valores máximos y frecuencia de los análisis para el uso de agua regenerada, cuya fuente es un efluente cloacal. Cabe aclarar que los límites máximos de los parámetros fisicoquímicos de la tabla 15, aplican para todos los cultivos, mientras que los microbiológicos difieren según el tipo de cultivo a regar. En este caso, se toma el valor correspondiente al tipo 3 (ver tabla 16).

Tabla 15. Parámetros de calidad de efluentes cloacales tratados como fuente de agua regenerada.

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
A) PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS			
Conductividad	μS/cm	2500	1800
pH	unidades	5,5 - 9	6,5 – 8,0
Temperatura	°C	45	30
RAS	N°	6	4
Solubles en éter	mg/l	80	30
Sólidos sedimentables en 10'	ml/l	0,5	<0,5
B) SUSTANCIAS INORGÁNICAS			
ANIONES			
Sulfatos	mg/l	600	400
Cloruros	mg/l	500	400
Fluoruro	mg/l	1	0,6
Sulfuros	mg/l	1	0,5
Cianuros	mg/l	0,1	0,05
CATIONES			
Sodio	mg/l	500	250
Manganeso	mg/l	0,5	0,2
Bario	mg/l	2	1
Boro	mg/l	1	0,5

Continúa

Tabla 15. Continuación

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
Hierro total	mg/l	5	3
Aluminio	mg/l	5	2
Arsénico	mg/l	0,1	0,05
Cadmio	mg/l	0,01	<0,01
Cobre	mg/l	1	0,5
Cromo (+6)	mg/l	0,1	0,05
Cromo total	mg/l	0,5	<0,5
Zinc	mg/l	3	2
Níquel	mg/l	0,5	0,2
Mercurio	mg/l	0,005	0,001
Plomo	mg/l	0,5	<0,5
Selenio	mg/l	0,05	0,02
Cobalto	mg/l	0,1	0,05
Detergentes	mg/l	3	1
Hidrocarburos totales	mg/l	10	5
Cloro libre residual	mg/l	0,5	<0,5
Fenoles	mg/l	0,05	<0,05
C) NUTRIENTES			
Potasio	mg/l	*	*
Nitratos	mg/l	*	*
Nitritos	mg/l	*	*
Nitrógeno amoniacal	mg/l	*	*
Nitrógeno total	mg/l	*	*
Fosfatos	mg/l	*	*
Fósforo total	mg/l	*	*
D) PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS Y ORGÁNICOS			
Bacterias	Ufc/ml	*	*
Aeróbicas			
Escherichia coli	Nº/100 ml	1000	250
Pseudomonas aeruginosas	Nº/100 ml	*	*
Aeruginosas			
Helmintos	huevos/1000 ml	1	< 1
D.Q.O.	mg/l	70	50
D.B.O.	mg/l	30	<30
E) ELEMENTOS RADIOACTIVOS			
Uranio	ug/l	1500	1500
Radio 226	pico curie/l	5	5

Fuente: Ordenanza N° 6301/06, Secretaría de Ecología y Medio Ambiente- Puerto Madryn.

Continúa

Tabla 15. Continuación

*Limite a determinar por la Autoridad de Reúso, según el uso que se le dé al efluente, estableciéndose valores para cada caso en particular.

** Límite máximo definido según tabla 6: parámetros de calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en la agricultura para riego restringido.

(1). Determinación para realizar con descuento de masa algal.

Nota: los valores que figuran en la presente tabla serán revisados anualmente.

Tabla 16. Parámetros de calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura para el riego restringido

CLASIFICACIÓN DE CULTIVOS Y OTROS USOS	CONDICIONES DE REÚSO	GRUPO EXPUESTO	NEMATODOS INTESTINALES ^a	COLIFORMES FECALES ^b
Tipo 4	Riego de productos que se consumen crudos y que se cultivan en estrecho contacto con agua tratada.	Trabajadores Consumidores	0	<150
Tipo 3	Riego de campos de deportes, parques públicos	Trabajadores Público	<1	<1000
Tipo 2	Riego de cultivo de cereales industriales y forrajeros, praderas y arboles	Trabajadores Público	<1	No es aplicable
Tipo 1	Riego localizado de los cultivos en el tipo 2, cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable

Fuente: Ordenanza N° 6301/06, Secretaría de Ecología y Medio Ambiente- Municipalidad de Puerto Madryn.

^{a)} Unidad media aritmética n° de huevos por litro.

^{b)} Unidad media geométrica n° por 100 ml.

2.5.3. Recopilación de los niveles guía y normativas de uso de agua regenerada a nivel nacional e internacional

En este apartado, se pretende recopilar los parámetros que fueron tomados de las diferentes normativas y niveles guía presentados en los capítulos anteriores, con el fin de evaluar la factibilidad del uso del lixiviado tratado como fuente de agua para el riego de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* (ver tabla 17). El objetivo es facilitar el análisis comparativo que se plantea en el punto 3 Desarrollo.

Con respecto a los parámetros microbiológicos, se toman valores establecidos por la OMS (ver tabla 8), ya que las normativas de Mendoza y Puerto Madryn, así como los niveles guía internacionales, toman como referencia los parámetros microbiológicos establecidos por dicha organización.

De la normativa de Puerto Madryn, se tomaron los parámetros microbiológicos asociados al tipo 3, correspondiente a riego de campos de deportes y parques públicos (ver tabla 16), debido a las características con las que cuenta las áreas verdes de la zona de estudio en la actualidad. Además, se toma como base, el hecho que el destino final de un relleno sanitario suele ser de uso recreativo, campos de golf, parques, parques naturales, campos o espacios públicos dedicados al esparcimiento al aire libre. Por lo tanto, una vez clausurados la totalidad de los módulos que conforman el relleno sanitario de la zona de estudio, su uso seguirá correspondiendo a esta categoría.

Como ya se mencionó anteriormente, de la normativa de Mendoza se tomaron los valores máximos de la categoría de efluentes cloacales que cuentan con tratamiento secundario (ver tabla 14).

De los niveles guía de Australia, se hizo uso de los valores de la tabla 10 de reúso de agua tratada para riego de áreas verdes. Sin embargo, en el caso de la CE, se realizó un análisis más amplio, tomando los valores, que esta misma guía sugiere, para el género *Cynodon* y la especie *Lolium multiflorum*

Respecto a los niveles guía de la U.S.EPA, se tomaron los valores que corresponden al reúso de zonas verdes urbanas (ej. canchas de golf, parques, cementerios), con acceso restringido, es decir, donde el acceso al público es controlado por barreras físicas, señales de advertencia o acceso temporal restringido (tabla 11). Como ya se mencionó, en el punto 2.5.1.4, se toma también como referencia para el análisis del lixiviado tratado de la zona de estudio, los valores correspondientes a un riego planificado a largo plazo, siendo estos, los más exigentes de esta normativa. Esta categoría permite evaluar la posibilidad de hacer uso del lixiviado tratado de la zona de estudio, durante el período de actividad y post clausura del relleno sanitario de la zona de estudio.

Por último, en el caso de la FAO, se hace uso de los valores de la tabla 7.

Tabla 17. Comparativa de normativas y niveles guía para el uso de agua regenerada como fuente de riego para zonas verdes

<u>Parámetros</u>	<u>Unidad</u>	<u>Puerto Madryn</u> Reúso de efluentes cloacales Tratados para riego Tipo 3	<u>Mendoza</u> Efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola	<u>Australia</u> Reúso de agua tratada para riego de áreas verdes	<u>U.S.EPA</u> Calidad de agua para reúso urbano (Restringido ^a a largo plazo) ^b	<u>FAO</u> Apto para riego de zonas verdes ^c
Conductividad	mS/cm	2,25	2,50	0,65 a 1,3 _d	-----	Ver tabla 7
pH	Unidades	5,5 a 9,0	5,5-9	-----	6 a 9	-----
Temperatura	°C	-----	45	-----	-----	----
Sólidos disueltos totales	mg/l	-----	----	600 a 1000	500-2,000	-----
Sedimentables en 10'	mg/l	0,5	0,5	-----	----	----
Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	300	----	----	----	----
RAS	mg/l	6	6	10-18 ^e	----	Ver tabla 7
S.S.E.E.	mg/l	100	80	-----	-----	-----
DBO5	mg/l	30	30	≤20	≤30	-----
Aluminio	mg/l	5	5	5	5,0	5,0
Arsénico	mg/l	0,05	0,1	0,1	0,1	0,10
Boro	mg/l	4	1	0,5 ^f	0,75	Ver tabla 7
Cadmio	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01 ^g	0,01
Cobalto	mg/l	1	0,1	0,05	0,05	0,05
Mercurio	mg/l	0,005	0,005	0,002	-----	----
Cromo hexavalente	mg/l	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1
Cromo Total	mg/l	0,5	0,5	-----	-----	-----
Cobre	mg/l	3	1	0,2	0,2	0,2
Hierro	mg/l	5	5	0,2	5,0	5
Plomo	mg/l	0,05	0,5	2 a 5	5,0	5,0
Manganeso	mg/l	0,5	0,5	0,2	0,2	0,20
Molibdeno	mg/l	-----	-----	0,01	0,01	0,01
Níquel	mg/l	0,1	0,5	0,2	0,2	0,2
Detergentes	mg/l	3	3	-----	-----	-----
Hidrocarburos totales	mg/l	10	10	-----	-----	-----
Fenoles	mg/l	0,05	0,05	-----	-----	-----

Continúa

Tabla 17: continuación.

<u>Parámetros</u>	<u>Unidad</u>	<u>Puerto Madryn</u> Reúso de efluentes cloacales Tratados para riego Tipo 3	<u>Mendoza</u> Efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola	<u>Australia</u> Reúso de agua tratada para riego de áreas verdes	<u>U.S. EPA</u> Calidad de agua para reúso urbano (Restringido ^a a largo plazo) ^b	<u>FAO</u> Apto para riego de zonas verdes ^c
Coliformes Fecales	UFC/100ml	1000	1000	<1000	≤200	<1000
Bacterias Aeróbicas	Ufc/ml	*	*	-----	-----	-----
Pseudomona aeruginosa	Nº/100 ml	**	*	-----	-----	-----
Helmintos	huevos/1000 ml	1	1	-----	5	-----
D.Q.O.	mg/l	70	70	-----	-----	-----
Uranio	ug/l	-----	1500	-----	-----	-----
Radio 226	pico curie/l	-----	5	-----	-----	-----

^a Reúso Restringido: contacto indirecto se consideran riego de jardines y camellones en autopistas y avenidas, fuentes de ornato, campos de golf; lagos destinados al paisaje y barreras hidráulicas de seguridad; panteones y parques memoriales y abastecimiento de hidrantes. U.S.EPA, 1992.

^b U.S.EPA, 1992.

^c FAO 1992.

^d Tasa de salinidad del agua: baja

^e Tolerancia moderada por parte de la planta ej Alfalfa

^f 0,5 es el valor límite deseable sin embargo los niveles guía de Australia contemplan la tolerancia de las especies a las concentraciones de Boro, las cuales pueden variar desde valores ≤ 0,5 hasta 6-8 mg/l.

^g En el caso de riego a corto plazo el valor máximo de Cadmio es de 0.05 mg/l.

* Limite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.

** En el caso de Nitrógeno Total, los niveles guía de Australia clasifican a este nutriente de los efluentes para riego según su potencial como contaminante. Bajo < 50, Medio 50 -100, Alto >100 (DEC 2004). Sin embargo, los valores de nitrógeno del agua regenerada son de 5.8 mg/l, entrando en el rango de 5-50 mg/l. es importante tener en cuenta que los valores de nitrógeno dependerán del tipo del cultivo.

*** En el caso del Fósforo total, los niveles guía de Australia clasifican a este nutriente de los efluentes para riego según su potencial como contaminante. Bajo < 10, Medio 10 -100, Alto >100 (DEC 2004). Sin embargo, los valores de nitrógeno del agua regenerada son de 5.8 mg/l, entrando en el rango de 5-50 mg/l. los valores de fósforo dependerán del tipo de cultivo.

----- No mencionado

2.6. Ubicación y generalidad de la zona de estudio

El relleno sanitario de RSU de la zona de estudio, está ubicado al noroeste del conurbano bonaerense, en un ambiente de llanura pampeana en la cuenca inferior del río Reconquista. Las celdas del relleno se desarrollan únicamente en las terrazas media y alta del río, a pesar de que una parte del predio se encuentra localizada sobre la terraza baja.

Los suelos de las terrazas media y alta son arcillo limosos, mientras que los de la terraza baja son predominantemente arcillosos.

Con respecto a las aguas subterráneas, dos acuíferos de agua dulce se desarrollan en la zona de estudio: el acuífero freático o Pampeano, predominantemente limo arcilloso, y el acuífero Puelche, de arenas finas y medias fluviales, que representa el acuífero de suministro de agua de consumo a gran parte de la población del conurbano bonaerense. Estos acuíferos están separados por un acuitardo arcilloso de entre 3 y 5 m de espesor.

En el punto 3.6. se amplía la descripción geológica del área.

2.6.1. Localización y población

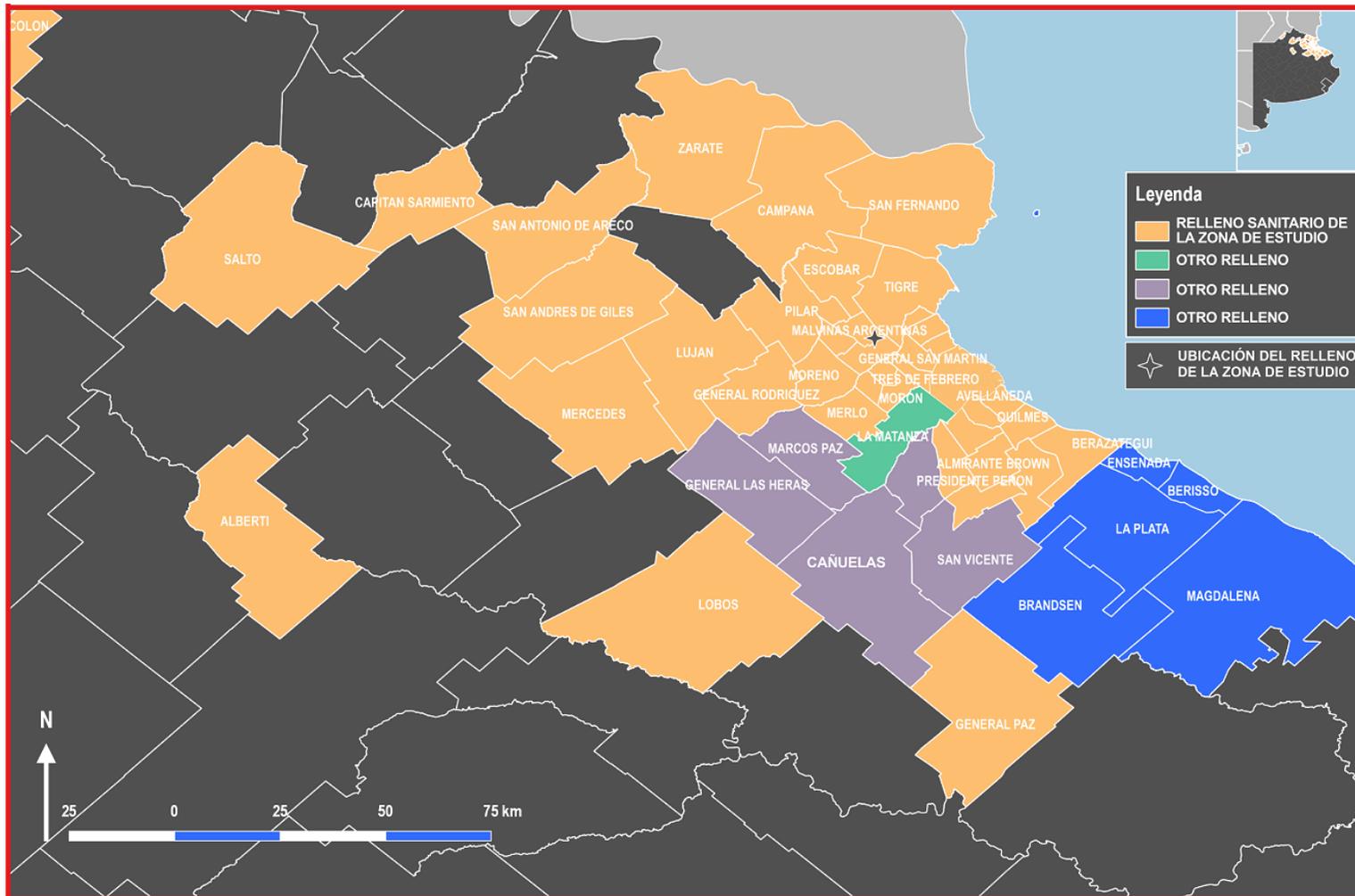
El relleno sanitario de la zona de estudio recibe 424.570 t/mes de RSU provenientes de 14,5 millones de personas, que habitan en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y en 25 municipios del conurbano bonaerense.

En la figura 7, se muestra la ubicación geográfica y los municipios que disponen sus residuos en este relleno.

Cabe mencionar que, al predio ingresan diariamente además del personal permanente, proveedores de insumos y servicios, recicladores y distintos tipos de visitantes.

Dentro de la población permanente, se encuentran los trabajadores dedicados a diferentes áreas relacionadas con la gestión y disposición final de los RSU, al mantenimiento de áreas verdes o caminos y el personal de seguridad. Por el contrario, el personal transitorio, se encuentra conformado por las visitas de diversas instituciones educativas, gubernamentales o civiles, interesadas en conocer la gestión de los RSU. También se incluye en este grupo, a los proveedores y recicladores informales, los cuales tienen permitida la entrada a la zona de estudio, en un horario establecido y bajo ciertas pautas organizativas. Estas medidas de control de ingreso al predio buscan preservar la integridad de las personas que lo visitan.

El análisis de riesgo de la salud humana, del uso de lixiviado tratado como fuente de agua para el riego de los cultivos analizados en el presente trabajo, contempla los dos grupos de personas descritos anteriormente, e involucra el concepto de barreras múltiples de la OMS. Este análisis se describe en el punto 3.4.2.



Fuente: adaptada de Buenos Aires Ciudad (s.f).

Figura 7. Municipios que disponen sus residuos en el relleno sanitario de la zona de estudio y su ubicación geográfica

2.6.2. Clima

La información climatológica para la zona de estudio fue obtenida de la base de datos de CLIMWAT 2.0 (2009) de la FAO, específicamente de la estación meteorológica Buenos Aires (OBS.CENTR), debido a la cercanía a la zona de estudio (ver figura 8).

La recopilación de datos realizada del CLIMWAT abarca un periodo extenso, generalmente desde 1971 al 2000. Cuando no es posible obtener la información del periodo completo, se incluyen series de al menos 15 años continuos de registros. A partir de esta base se obtuvieron valores medios mensuales de temperatura, humedad, viento y precipitación (ver tabla 18).

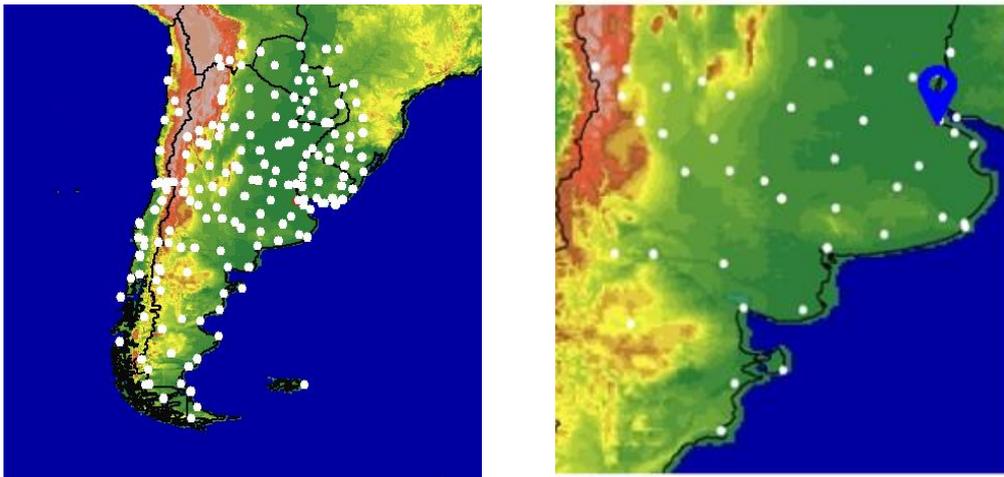


Figura 8. Estación meteorológica de Buenos Aires (OBS.CENTR) (Latitud 34,58 Sur, Longitud 58.48 Oeste, Altitud 25 m).

Tabla 18. Valores medios mensuales (base de datos largo plazo >15 años)

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Radiación MJ/m ² día	Precipit. mm/mes
Enero	19,6	29,9	61	190	10,4	26,8	119
Febrero	18,9	28,6	66	173	9,2	23,3	117,6
Marzo	16,9	26,3	72	147	7,6	18,3	134,1
Abril	13,3	22,8	71	147	6,6	13,6	97
Mayo	10,4	19,3	78	130	5,5	9,8	73,6
Junio	7,7	15,7	83	130	4,3	7,6	62,6
Julio	7,6	15,4	80	147	4,8	8,5	66,3
Agosto	8,3	17,1	72	190	5,9	11,7	69,8
Septiembre	10	19,3	70	190	7	16,1	73,3
Octubre	12,7	22,1	71	190	7,9	20,4	119
Noviembre	15,4	25,2	65	190	8,7	23,7	108,6
Diciembre	18,1	28,2	61	190	10,2	26,9	105

Fuente: Estación meteorológica Buenos Aires (OBS.CENTR) - CLIMWAT 2.0.

2.7. Características del lixiviado

La composición del lixiviado tiene la particularidad de ser altamente variable dependiendo de varios factores, en particular del clima de la región (Grugnaletti, et al., 2016; Ragle, et al., 1995; como se citó en Sniffen, K. D, 2017). La alta o baja percolación del agua de lluvia dentro de cada uno de los módulos genera más o menos volumen de lixiviado, así como una mayor o menor dilución (Al-Yaqout & Hamoda, 2003; Kawai et al., 2012 como se citó en Sniffen, K. D, 2017).

El contenido de agua de los residuos dentro del módulo puede afectar la tasa de descomposición, y, por lo tanto, afectar el contenido orgánico e inorgánico del lixiviado. Las temperaturas extremas también pueden afectar al proceso de descomposición dentro de los módulos del relleno, y así a la composición del lixiviado (Megalla, Van Geel, & Doyle, 2016; X. Zhao et al., 2008 como se citó en Sniffen, K. D, 2017).

El tipo y el contenido general de los residuos que llegan al relleno sanitario también tendrán un efecto importante en el lixiviado (Kjeldsen et al., 2002 como se citó en Sniffen, K. D, 2017). Es así como los rellenos que aceptan principalmente residuos domésticos, con alto contenido de materia orgánica procedente de los alimentos, tendrán un lixiviado significativamente diferente comparado con un relleno que acepte residuos industriales o de demolición. Incluso las diferencias regionales en los residuos alimentarios pueden tener un efecto sobre los constituyentes en el lixiviado (Onay, et al., Bacioglu, 2010; Zhan et al., 2017 como se citó en Sniffen, K. D 2017).

De acuerdo con diversos autores, los lixiviados se pueden clasificar en tres grupos, de acuerdo con el tiempo de operación del relleno sanitario, y particularmente, de la celda del relleno, de la cual provengan (Torres Lozada, Barba- HO, Ojeda, Martinez , & Castaño, 2014). Los rellenos serán jóvenes cuando tienen menos de 5 años de operación, intermedios si tienen entre 5-10 años y maduros si su edad es mayor a 10 años. En general, el grado de biodegradabilidad de los lixiviados es inversamente proporcional a su edad, siendo más biodegradables los jóvenes y menos los maduros (Torres Lozada, et al., 2014). A medida que aumenta la edad de un relleno, y la concentración de compuestos orgánicos disminuye, se incrementa la concentración de nitrógeno amoniacal, producto de la hidrólisis y la fermentación del nitrógeno presente en los residuos biodegradables (Abdulhussain A, et al., 2009).

Debido a que el relleno de la zona de estudio es uno de los rellenos de mayor volumen de RSU en América Latina, consta de distintas etapas de apertura y cierre de celdas o módulos, por lo tanto, se opera con diferentes edades de lixiviado.

Es así como el lixiviado proveniente de los diferentes módulos del relleno, es bombeado desde las cámaras de extracción de los distintos módulos, o llevado por medio de camiones atmosféricos a la pileta de ecualización, con el fin de homogeneizar las diferentes corrientes previamente a entrar a las distintas etapas de tratamiento, las cuales se describen en detalle en el punto 2.9.

2.8. Cobertura final de los módulos y áreas verdes de la zona de estudio

Debido a que la cobertura final es la primera capa que recibiría el líquido lixiviado tratado, en caso de ser usado como agua de riego, es importante definir la estructura y la función que esta cumple en la etapa de cierre de los módulos.

Esta cobertura llamada también *Capping*, se realiza a los efectos de minimizar los olores, el transporte de residuos por acción del viento, el riesgo de incendios, la proliferación de roedores y moscas, mantener control sobre la migración de gases, evitar la erosión, la infiltración del agua de lluvia (ya que esta incrementa la generación de líquido lixiviado), y propiciar un ambiente reductor que favorezca la descomposición anaeróbica de los residuos.

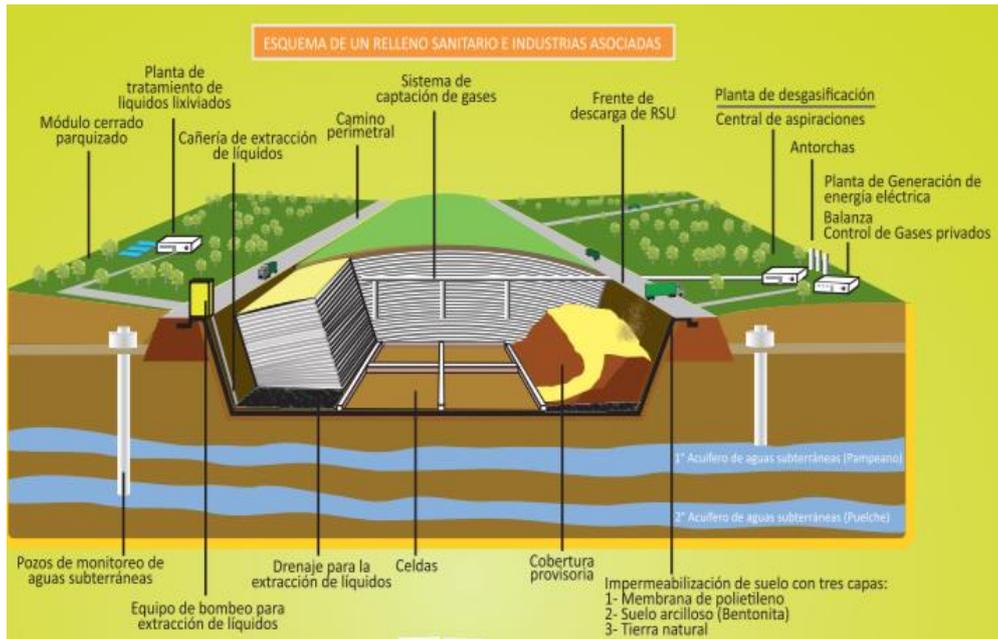
Para la cobertura final de la celda, se utiliza generalmente el suelo producto de la excavación del módulo, formando un manto de un metro de espesor. Por encima de la capa de cobertura, se dispone el mismo suelo vegetal del destape. Esta segunda capa permite el desarrollo de las especies sembradas, generando así un mayor control sobre la erosión de los taludes. A su vez, este material orgánico tiene la capacidad de transformar parte de los componentes nocivos del biogás, como el metano (que no haya sido captado por la red de generación de energía) y dióxido de carbono. Para minimizar

la erosión sobre este suelo se siembran diferentes especies de poáceas, principalmente *Lolium multiflorum* (Ryegrass anual) y *Cynodon dactylon* (Bermuda).

Con el tiempo, a medida que los residuos se van estabilizando, las celdas de cada módulo se van modificando. Por lo general en los primeros 2 años posteriores al cierre de las celdas, la descomposición biológica de la materia orgánica es alta y se pueden producir asentamientos diferenciales. Estos asentamientos se rellenan, según su dimensión, con residuos o con suelo de aporte para emparejar la superficie, permitiendo así la buena escorrentía de las aguas de lluvia. Dichas aguas de escorrentía deben ser monitoreadas mediante mediciones fisicoquímicas del líquido colectado, durante o inmediatamente después de una lluvia, con el fin de asegurar que no hayan entrado en contacto con los residuos o con líquido lixiviado del módulo.

2.9. Sistema de captación y tratamiento del lixiviado

Dentro de cada módulo del relleno, se construye un sistema de colección de lixiviado el cual intercepta el líquido percolado a través de los residuos y lo dirige a los sumideros, desde donde es bombeado a lagunas de homogeneización antes de ser tratado (ver figura 11).



Fuente: Ceamse, s.f

Figura 9. Esquema de un relleno sanitario y sus industrias asociadas.

El objetivo principal de la captación del lixiviado es la de prevenir fallas en la interfaz geomembrana- residuo, así como la de dar estabilidad al módulo. Esto se consigue manteniendo el nivel del líquido por debajo de los 30 cm sobre el fondo de la celda. Durante periodos de lluvias fuertes, el nivel del líquido puede llegar a superar los 30 cm, pero el sistema es capaz de evacuar el exceso en 72 hs aproximadamente.

Una vez que el líquido lixiviado proveniente de los distintos módulos es captado, se bombea a las lagunas de equalización, desde allí, pasa por sucesivas lagunas anaerobias, para finalmente ingresar a alguna de las 3 plantas de tratamiento. Cabe aclarar que, debido al acceso a la información sobre el lixiviado tratado de cada una de las plantas, el presente trabajo de tesis describe y analiza el proveniente de la Planta N°1 y Planta N°3.

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) promedio del lixiviado entre la equalización y las lagunas anaerobias, es de 60 días para el líquido que ingresa a la Planta N°1, y de 90 días en el caso de la Planta N°3. Luego de la etapa anaeróbica, el lixiviado pasa a un tratamiento aeróbico. En el caso de la planta N°1, el tratamiento es un sistema MBR (por sus siglas en inglés de reactor biológico de membrana, constituido por un reactor aeróbico de lodo activado y una etapa de UF) y en el caso de la planta N°3, es un sistema aeróbico convencional de lodo activado, seguido de un tratamiento por membrana de UF.

En los dos casos, una vez que el líquido de cada planta ha pasado por el proceso aeróbico, sigue hacia su propio sistema de ultrafiltración. La ultrafiltración tiene la finalidad de obtener un permeado claro y un rechazo con gran cantidad de lodo activado y sólidos en suspensión. En el caso de la Planta N°1, la parte de ese rechazo se recircula al reactor aeróbico, mientras que el porcentaje restante se descarta para ser tratado. En cualquiera de las dos plantas, el permeado de la ultrafiltración pasa por una etapa de nanofiltración, luego por un tanque australiano y una cámara de aforo antes de ser descargado en el río Reconquista (ver figura 12). En la cámara de aforo se monitorea el líquido tratado bajo los parámetros de vuelco de la Resolución 336/2003 de la Autoridad del Agua (ADA), siendo este organismo de aplicación, el que controla la descarga de efluentes en el conurbano bonaerense.

Cabe mencionar que, las membranas de ultrafiltración pueden retener un tamaño de partícula entre 0,1 y 0,01 μm , permitiendo separar macromoléculas, materia coloidal, bacterias, virus, proteínas y pectinas. En el caso de la nanofiltración, el tamaño de partícula retenida está entre los 0,01 y 0,001 μm , logrando separar, moléculas de pequeño tamaño, iones polivalentes (calcio y magnesio) y en el caso del tratamiento de lixiviado,

es especialmente útil en retener gran parte del DQO remanente no biodegradable y color, obteniendo al final del proceso, un efluente totalmente incoloro.

Se debe acotar que, en la actualidad antes de descargar dicho permeado al Reconquista, se extrae especialmente durante el verano, una parte de líquido tratado proveniente de la Planta N°3 mediante camiones atmosféricos para ser usado en el riego de caminos, evitando así, que se levante polvo con la circulación de estos.

Por su parte, los rechazos de la ultra y nano filtración son tratados mediante un proceso fisicoquímico (coagulación- floculación- sedimentación) y los lodos resultantes de este proceso son deshidratados y enviados a los módulos del relleno, mientras que los líquidos producidos en esta etapa retornan a la pileta de equalización.

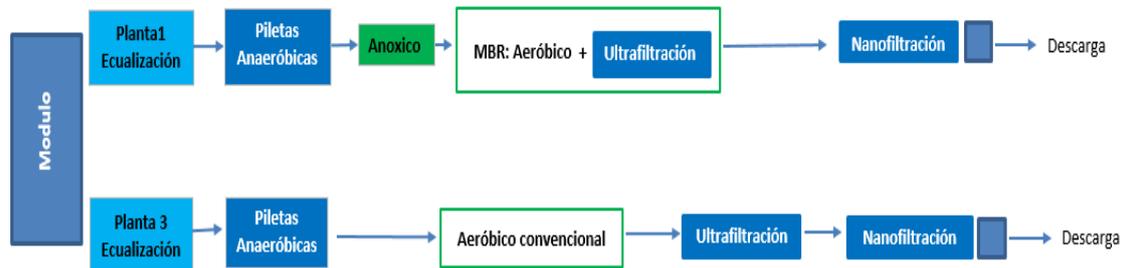


Figura 10. Esquema simplificado del sistema de tratamiento de Planta N°1 y N°3.

2.10. Riego de zonas verdes y de caminos de la zona de estudio

En la actualidad el riego de zonas verdes se realiza con agua que se extrae desde el acuífero Puelche. Cabe aclarar, que las zonas verdes dentro del predio corresponden a la cobertura final de los módulos, parques, jardines, canteros y arbolado.

El presente trabajo de tesis analiza la posibilidad de regar las zonas de cobertura final de los módulos, así como las áreas verdes que estén sembradas con las especies de gramíneas *Lolium multiflorum* y *Cynodon dactylon*.

2.11. Requerimientos de agua de un cultivo

Para realizar una planificación correcta del riego y mejorar la eficiencia de uso del agua, suministrando al cultivo la cantidad suficiente para satisfacer sus necesidades, es indispensable conocer los requerimientos de este. Las especies analizadas en el presente trabajo de tesis son *Lolium multiflorum* en la temporada de otoño-invierno y *Cynodon dactylon* en primavera-verano, ya que son las especies que actualmente se encuentran sembradas en mayor proporción en el predio

Los requerimientos de agua para el desarrollo de un determinado cultivo están directamente relacionados con los procesos de evapotranspiración, que ocurren en las plantas y en el suelo. La cantidad requerida debe cubrirse mediante las precipitaciones o a través del riego. Además, el cálculo de la cantidad de agua regenerada utilizada debe incluir las pérdidas e ineficiencias asociadas a los métodos de riego, así como una cantidad de agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación.

Uno de los parámetros más importantes para determinar el requerimiento de agua de los cultivos es la evapotranspiración (ET). La evapotranspiración es la combinación de dos procesos, la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración por la que el agua se pierde a través de las hojas.

Si bien, existen diversos métodos para calcular la evapotranspiración, la FAO recomienda como procedimiento estándar el método FAO Penman-Monteith (2006), ya

que se obtienen valores consistentes con una gran cantidad de datos reales a nivel mundial.

Cabe mencionar que, la medición de la ET se puede realizar mediante métodos de transferencia de masa, de balance de energía, a partir de la medición de los componentes del balance de agua en el suelo en terrenos cultivados, o mediante el uso de lisímetros. Estos métodos requieren de equipos especializados y de largos periodos de medición, en general son costosos, y los resultados deben ser analizados por personal preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, son importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos.

Por su parte, el procedimiento del cálculo de la FAO define en primera instancia, la evapotranspiración de referencia (ET_o), que es la ET de un cultivo hipotético, con una altura de 0,12 m, una resistencia de la superficie de 70 s/m y un albedo de 0,23; que produce un valor de evaporación semejante a la que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada.

Una vez determinada la ET_o, se puede calcular la evapotranspiración del cultivo en estudio (ET_c), que en este caso será para los cultivos *Lolium multiflorum* y *Cynodon dactylon*. ET_c es la evapotranspiración del cultivo específico bajo condiciones agronómicamente óptimas.

Para la mayoría de los cultivos, ET_o se calcula a través de datos meteorológicos, como la radiación solar, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La evapotranspiración del cultivo, ET_c, se estima como el producto de la

evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc) (FAO, 2006), que varía según el tipo de cultivo y su estado de desarrollo.

$$ETc = Kc \times Eto$$

Donde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

Kc = Coeficiente del cultivo (adimensional)

ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).

El coeficiente de cultivo Kc , representa el efecto combinado de varias características del cultivo: altura, albedo o reflectancia, resistencia a la transpiración y evaporación del cultivo. El Kc también tiene en cuenta la evaporación del suelo, relacionada directamente con la fracción cubierta por el cultivo, de manera que a menor cobertura mayor evaporación.

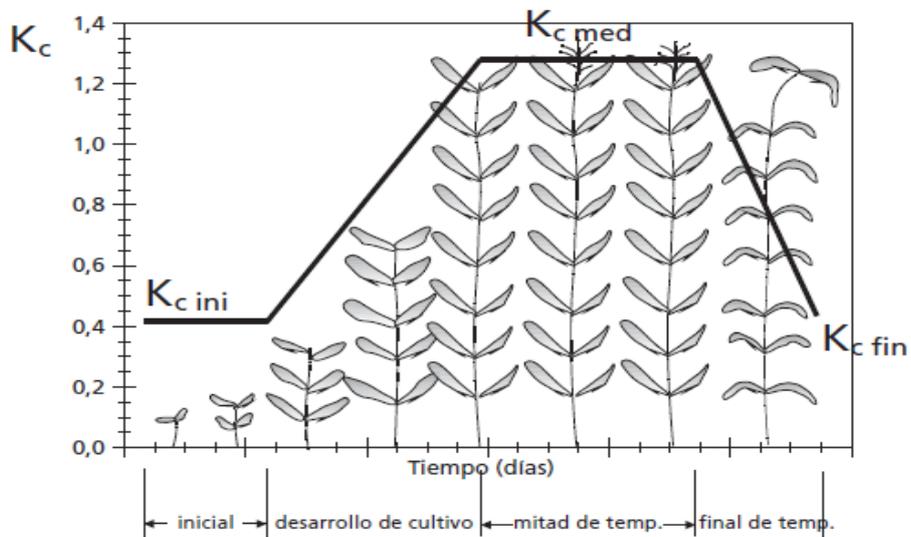
Por otro lado, es necesario conocer los diferentes estadios de desarrollo del cultivo en análisis, puesto que la evapotranspiración va modificándose en función del ciclo de vida de la planta. Por esta razón el cultivo se divide en 4 etapas: inicial, de desarrollo, de mediados de temporada y etapa de madurez. En la figura 13 se muestra la variación típica de Kc en cada etapa.

La etapa inicial ocurre desde el momento de la siembra, hasta que el cultivo cubre una superficie de suelo del 10%; por lo tanto, la evapotranspiración se compone principalmente por la evaporación del suelo. En esta etapa, se requieren niveles óptimos de humedad del suelo y riegos frecuentes.

Por su parte, la etapa de desarrollo ocurre desde que el cultivo cubre un 10% de la superficie del suelo, hasta que alcanza el nivel óptimo de cobertura. Esto suele ocurrir dependiendo del cultivo, cuando las hojas se sobreponen entre sí o cuando se inicia la floración. A medida que el cultivo va cubriendo el suelo, la evaporación se ve cada vez más restringida y la transpiración empieza a ser el proceso más importante.

La etapa de mediados de temporada comprende desde la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. Por último, está la etapa final de temporada, en este momento el valor de K_c dependerá de las prácticas del cultivo, variando desde aquellos que deben dejarse secar en forma natural antes de su cosecha, a aquellos que deben mantenerse regados para conservar las características de los productos comercializados en fresco.

La ET_c también se denomina evapotranspiración de condiciones estándar, dado que las condiciones de crecimiento consideradas son las óptimas. Cuando las condiciones de campo difieren de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ET_c ; estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo del cultivo. A esta corrección se le denomina evapotranspiración real del cultivo o ajustada (ET_{caj}).



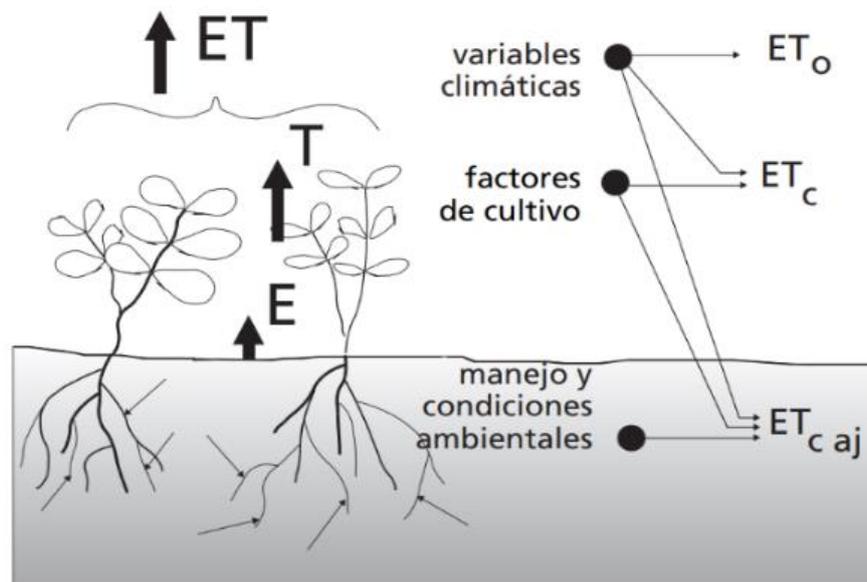
Fuente: FAO, (2006).

Figura 11. Curva generalizada de coeficiente de cultivo K_c

Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo (ET_{caj}) puede desviarse de la ET_c , debido a condiciones como la presencia de plagas y enfermedades, la salinidad o baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Estos factores pueden resultar en un menor crecimiento o densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c (FAO, 2006).

La ET_{caj} se puede calcular utilizando ya sea un coeficiente de estrés hídrico (K_s), o ajustando el K_c a las condiciones de estrés hídrico y salinidad esperable, teniendo en cuenta las condiciones de riego previstas en la zona de estudio (FAO, 2006).

La figura 14, resume los conceptos tenidos en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración.



Fuente: FAO, (2006).

Figura 12. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones ajustadas ($ET_{c\ aj}$).

A manera de resumen, se puede decir que la ET_o es un parámetro relacionado con el clima, que expresa el poder evaporante de la atmósfera. La ET_c hace referencia a la evapotranspiración de un determinado cultivo en condiciones óptimas, con un excelente manejo y adecuado aporte de agua, en donde se logra la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas. La ET_c requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo, esta corrección se denomina $ET_{c\ aj}$.

Como se señaló, los requerimientos de agua de un determinado cultivo están directamente relacionados con los procesos de evapotranspiración, los cuales deben cubrirse mediante agua proveniente de las precipitaciones o a través del riego

Es importante resaltar, que de la precipitación total que llega al suelo, un porcentaje se pierde por escurrimiento, percolación profunda o evaporación. La precipitación efectiva, es aquella que se almacena en la capa del suelo y que puede ser aprovechable por el cultivo para su desarrollo, es decir el agua que infiltra en el suelo y permanece al alcance de las raíces.

Por otro lado, en el caso de hacer uso de aguas con elevada salinidad, se requiere estimar la demanda real de agua del cultivo, la cual tiene en cuenta además de la demanda producto de la evapotranspiración, una cantidad de agua adicional para controlar las sales que pueden acumularse en el suelo. Para ello se calcula un factor denominado *leaching factor* (LF, de sus siglas en inglés) o factor de lixiviación. En el punto 3.5.2. se detalla cómo se obtiene y aplica este factor.

3.DESARROLLO

En esta sección, se describe la metodología usada para evaluar el lixiviado tratado, como eventual reemplazo (total o parcial) del agua de riego utilizada actualmente. Los resultados obtenidos, su análisis e interpretación se presentan en el capítulo 4.

2.6.3. Geología y suelos

2.6.3.1. Hidrogeología

En la zona de estudio, y en gran parte del conurbano bonaerense, el acuífero Puelche es el recurso hídrico más importante de la región, debido a la buena calidad del agua y a los buenos rendimientos que posee; razón por la cual, es el más explotado para consumo humano, riego y uso industrial.

La tabla 19, muestra las unidades geológicas e hidrogeológicas del área de interés. Como descripción general, se puede resumir que el sistema hidrogeológico tiene como límite inferior al techo de la Formación Paraná, dado su tipo litológico (arcillas verdes muy plásticas), que le otorga propiedades acuicludas. Este acuífero Paraná subyacente, es arenoso y tiene alto contenido salino (solo se lo utiliza en algunas industrias y como fuente de alto caudal de agua de baja calidad para sistemas de incendio).

La parte inferior del “sistema activo” como agua de abstracción útil, está representada por el acuífero Puelche, de carácter semiconfinado, por encima del cual se localizan los miembros poco productivos, alojados en sedimentos de la Formación Pampeano de carácter semi libre denominado Pampeano y el acuífero Freático.

Tabla 19. Unidades geológicas e hidrogeológicas de Buenos Aires

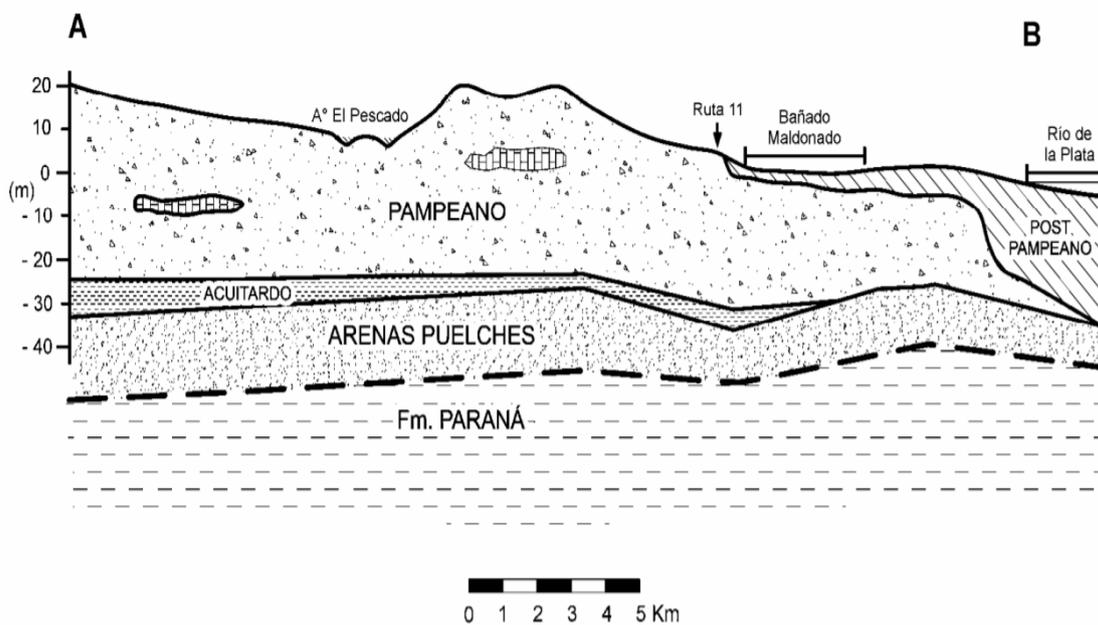
Formación	Espesor (m)	Litología	Comportamiento Hidrogeológico
Post Pampeano (Luján + Querandí)	0 a 33	Arcilla, arena muy fina y arena arcillosa, gris oscura y verdosa. Marino y fluvial.	Acuícludo – acuitardo, hasta acuífero de muy baja productividad (< 1 m ³ /h/pozo). Únicamente en la Terraza Baja. Agua clorurada sódica de alta salinidad (27 g/l).
Pampeano (Ensenada + Buenos Aires)	0 a 45	Limo arenoso y arcilloso, calcáreo (loess), castaño claro. Eólico y fluvial	Acuífero libre a semiconfinado de media a baja productividad (5-30 m ³ /h/pozo). Agua bicarbonatada cálcica de baja salinidad (< 1 g/l); en la Terraza Baja aumenta la salinidad.
Arenas Puelches	20 a 30	Arena cuarzosa fina y mediana, amarillenta a blanquecina. Deltaico.	Acuífero semiconfinado de alta productividad (30 a 160 m ³ /h/pozo). Agua bicarbonatada sódica de baja salinidad (< 1 g/l); en la Terraza Baja aumenta hasta 45 g/l.
Paraná	62	Arcilla plástica verde oscura – azulada y arena blanquecina, fosilíferas. Marino.	Acuícludo en la sección arcillosa y acuífero de alta productividad en la parte arenosa. Agua clorurada sódica de media a alta salinidad (3 a 20 g/l).
Olivos	289	Arcilla rojiza, arenisca y arenisca arcillosa, yesíferas y calcáreas. Eólico, lagunar y fluvial.	
Martín García (Basamento Cristalino)		Aplita y gneis grisáceo muy esquistoso, con vetas aplíticas. Metamórfico.	

Fuente: Auge M, (2006)

La zona no saturada que separa el acuífero pampeano de la superficie topográfica posee un espesor variable, sumamente reducido en los sectores de la planicie aluvial de ríos y arroyos, con valores máximos en las áreas topográficamente más elevadas, y en aquellas en las que se practica una fuerte extracción de agua subterránea a expensas del acuífero Puelche (por el fenómeno de filtración vertical descendente).

El espesor de la zona no saturada fluctúa en mínimos de 0,70 a 2 m en las zonas de terraza baja cercanas al río, y máximos de 7 o más m en sectores topográficamente elevados.

La formación del acuífero Puelche semiconfinado se encuentra a una profundidad de entre 20 y 40 m de profundidad (ver figura 9). En la sección 3.6 se describe en mayor detalle la hidrogeología local.



Fuente: Riquelme, (2010)

Figura 13. Perfil geológico y ubicación de acuíferos importantes

Por su parte, la cuenca del río Reconquista se subdivide en tres subcuencas, la cuenca alta, media y baja (ver figura 10).

En la cuenca alta del río Reconquista, el cauce principal se origina en campos situados al oeste de la Ciudad de Buenos Aires, donde confluyen los arroyos El Durazno y La Choza, sector en el que se encuentra emplazada la represa Ing. Roggero, creada en el año 1971, para controlar las crecidas en la zona aguas arriba de este embalse. Sobre los arroyos La Choza y Durazno, se han construido otras dos represas con la misma finalidad (Lastra, 2007).

Canal Aliviador o Canal Namby Guazú y más tarde, Pista Nacional de Remo. Estos cursos unen sus aguas a las del río Luján el cual desemboca tras pocos kilómetros de recorrido en el río de la Plata.

Sumado a los arroyos ya mencionados, existen otros de menor importancia en cuanto a su caudal, como son los arroyos G. de Laferrere, Saladero, Soto, Villa Ballester, J. L. Suárez, Basualdo y Las Tunas (ver figura 10).

En total el río Reconquista recibe las aguas de 134 afluentes, (algunos con aportes de caudal muy escasos e intermitentes). Sumados, recorren un total de 606 Km. El cauce primitivo tiene una longitud de 82 Km y drena una cuenca de 1.738 km², tiene un caudal medio de 3m³/s aproximadamente, y su velocidad de escurrimiento es normalmente baja por ser un río de llanura. Sin embargo, su caudal puede incrementarse rápidamente después de una fuerte lluvia, pudiendo variar entre 69.000 m³ /día y 1.700.000 m³ /día. En general el escurrimiento de la cuenca y subcuencas es hacia los ríos Paraná y de la Plata (Lastra, 2007).

3.6.3.2. Suelos

La caracterización del suelo, la realizaron profesionales responsables de la construcción de uno de los módulos que conforman el relleno sanitario del área de estudio, quienes observaron una serie de perfiles expuestos en zonas cercanas al río Reconquista y a sectores de barrancas.

Es así, como se puede dividir el suelo de la zona de estudio en dos categorías. En la primera son los suelos de la “terrazza baja”, que se encuentra a lo largo de las márgenes del río Reconquista, son arcillosos y presentan anegabilidad frecuente con el nivel freático cercano a la superficie; es decir, son suelos intrazonales desarrollados bajo un régimen de

humedad ácuico, ya que se encuentran saturados con agua por períodos prolongados de tiempo. En la segunda categoría se encuentran los suelos de la “terrazza media” y de la “terrazza alta”, constituido por un suelo franco limoso en sus primeros 25cm (0- 25 cm), que en profundidad pasa a un suelo arcillo limoso (25-50 cm).

El presente trabajo de tesis no contempla la “terrazza baja” para el riego con lixiviado tratado, debido a que no se encuentra entre las áreas verdes que requieran irrigación. Además, esta terraza no presenta la cobertura final de los módulos/*Capping*, por lo que no se suelen realizar siembras de *Lolium multiflorum* y *Cynodon dactylon* en esta terraza.

3.1. Estimación de la demanda de agua utilizada para riego en la zona de estudio

Al no contar con datos medidos de la cantidad de agua que se extrae en la zona de estudio, debido a la ausencia de caudalímetros en los puntos de extracción, fue necesario utilizar información indirecta para estimar la cantidad de agua utilizada para el riego de zonas verdes. Para ello, se recopiló el número de viajes de los camiones empleados para riego en cada actividad.

De manera semejante, para conocer la cantidad de lixiviado tratado para riego de caminos, se consultó el número estimado de camiones cisterna que se utilizan para este fin. Estos datos se presentan y analizan en la sección 4.1.

3.2. Estimación de la producción de lixiviado tratado

Para estimar la producción de lixiviado tratado de la Planta N°1 y N°3, se tomaron los valores suministrados por la empresa tratadora, durante los años 2016 y 2017. Estos datos se presentan y analizan en la sección 4.2.

3.3. Caracterización del agua usada actualmente para riego y del líquido lixiviado tratado.

Para caracterizar el lixiviado tratado de la zona de estudio, se utilizaron los valores mensuales que fueron suministrados por la empresa tratadora del lixiviado, correspondientes al año 2016 y 2017 de la planta N°3, y del 2017 para la Planta N°1.

La recolección de las muestras se realizó mediante un método de muestreo simple, es decir, se tomó una muestra de lixiviado tratado en el último punto del proceso y se analizó de manera individual. Las mediciones durante el periodo mencionado estuvieron a cargo de laboratorios externos autorizados por el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS).

Los parámetros fisicoquímicos analizados en el lixiviado tratado proveniente de las plantas N°1 y N°3 (ver tabla 20), son los requeridos por la Resolución 336 /2003 del ADA, para el vuelco de efluentes tratados a cuerpos de agua superficial.

Como se mencionó en el punto 2.4.1. y 2.4.2. el lixiviado de un relleno sanitario de RSU suele presentar niveles de CE y cloruros altos. Por el contrario, las concentraciones de metales y compuestos orgánicos volátiles suelen ser bajas. Por estas características del lixiviado, el riesgo de salinización del suelo es alto cuando se usa como fuente de agua para riego.

Dicho lo anterior, se decidió completar el perfil fisicoquímico del lixiviado tratado, sumando mediciones de parámetros asociados a la CE de la muestra, (sodicidad y salinidad). Para esto, se tomaron dos muestras de agua de los pozos N°1 y N°2, que corresponde al acuífero Puelche (agua con la que se riega en la actualidad las áreas verdes en la zona de estudio), cuya ubicación se muestra en la figura 15. Así mismo, se tomaron dos muestras de lixiviado tratado por las plantas N°1 y N°3, mediante un muestreo simple, las cuales fueron divididas en dos partes iguales, para ser enviadas a dos laboratorios distintos. Las determinaciones y la metodología analítica utilizada se resumen en la tabla 21 y 22.

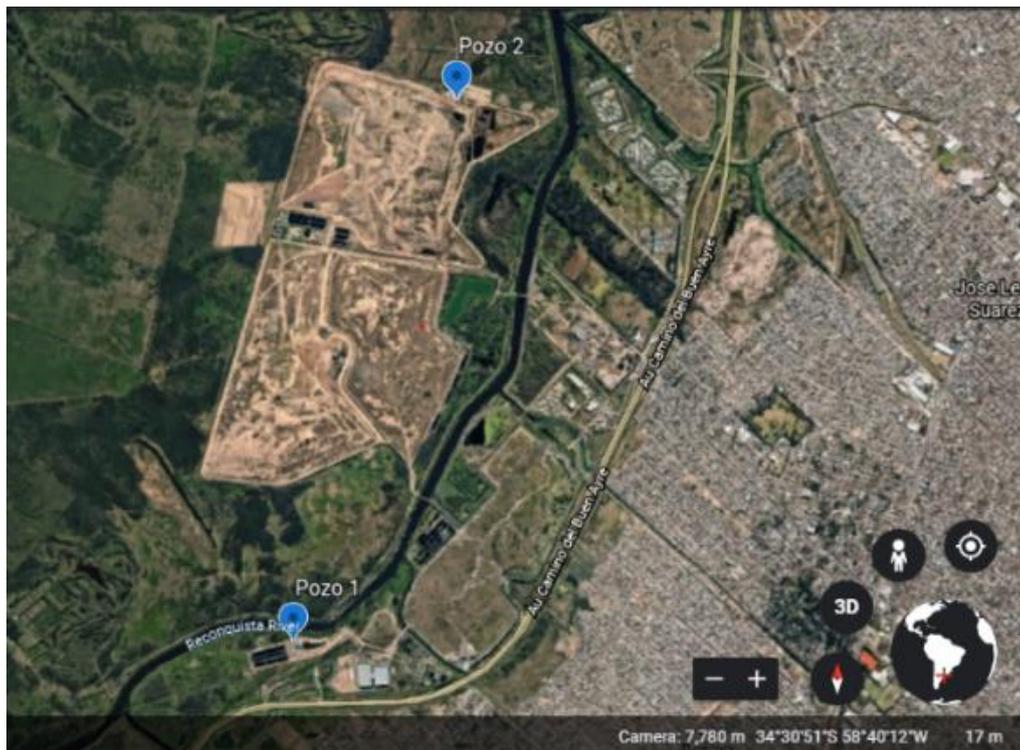


Figura 15. Ubicación de los pozos de muestreo de agua. Buenos Aires, 34 ° 30'51" S y 58°40'12" O. Google Earth (8/7/2020).

Tabla 20. Parámetros analizados en el lixiviado tratado. Res 336/03 ADA

Parámetros	Metodología analítica
pH	SM 4500-H B Ed. 22/23 (#)
Temperatura	SM2550 B Ed.22/23 (#)
Sólidos sedim 10 Min	SM 2540 F Ed. 22/23(#)
Sólidos sedim 2hs	SM 2540 F Ed.22/ 23(#)
Sulfuros	SM 4500 E Ed. 22/23 (#)
S.S.E.E	SM 5520 B Ed.22/ 23 (#)
Cianuros	SM 4500 CN
Hidrocarburos	EPA 418.1
Cloro Libre	SM 4500 CLG Ed.22/23 (#)
Coliformes Fecales	SM 9221
D.B.O.	SM 5210 B Ed. 22/23 (#)
D.Q.O.	SM 5220 D Ed.22/ 23 (#)
S.A.A.M	SM 5540 C Ed.22/23 (#)
Sustancias Fenólicas	SM 5530 C Ed.22/23 (#)
Sulfatos	SM 4110 B Ed.22/23 (#)
Hierro	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Manganeso (soluble)	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Cinc	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Níquel	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Cromo Total	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Cromo Hexavalente	SM 3500 Ay B Ed.22/23(#)
Cadmio	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Mercurio	SM 3112 B Ed.22/23(#)
Cobre	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Aluminio	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Arsénico	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Bario	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Boro	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Cobalto	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Selenio	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Plomo	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Plaguicidas Organoclorados	EPA 508/8270
Plaguicidas Organofosforados	EPA 508/8270
Nitrógeno total	SM 3120 A y B Ed.22/23(#)
Nitrógeno Amoniacal	SM 4500 NH3 C Ed.22/23(#)
Nitrógeno Orgánico	SM 4500 NORG B/C Ed.22/23(#)
Fósforo total	SM 4500 P B/E Ed.22/23(#)

Tabla 21. Matriz de ensayo: agua subterránea (agua de pozo)

Parámetros	Metodología analítica
pH	SM 4500-H B Ed. 23 (#)
CE a 25 °C	SM 2510 B Ed. 22 (#)
Salinidad	SM 2510 B Ed. 22 (#)
Fosfato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Cloruro	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Sulfato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Nitrato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Alcalinidad de Carbonato	SM 2320 B Ed. 22 (#)
Alcalinidad de Bicarbonato	SM 2320 B Ed. 22 (#)
Nitrito	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Magnesio	ISO 14911: 1998
Calcio	ISO 14911: 1998
Hierro	EPA 6020 B
Sodio	ISO 14911: 1998
Potasio	ISO 14911: 1998
Sólidos Disueltos Totales 180 °C	SM 2540 C Ed. 22 (#)

Tabla 22. Matriz de ensayo: Lixiviado tratado

Parámetros	Metodología analítica
pH	SM 4500-H B Ed. 23 (#)
CE a 25 °C	SM 2510 B Ed. 22 (#)
Salinidad	SM 2510 B Ed. 22 (#)
Fosfato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Cloruro	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Sulfato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Nitrato	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Alcalinidad de Carbonato	SM 2320 B Ed. 22 (#)
Alcalinidad de Bicarbonato	SM 2320 B Ed. 22 (#)
Nitrito	SM 4110 B Ed. 22 (#)
Magnesio	EPA 3010 A/ 6010 D
Calcio	EPA 3010 A/ 6010 D
Hierro	EPA 3010 A/ 6010 D
Sodio	EPA 3010 A/ 6010 D
Potasio	EPA 3010 A/ 6010 D
Sólidos Disueltos Totales 180 °C	SM 2540 C Ed. 22 (#)

3.4. Valores fisicoquímicos y biológicos para cumplir

3.4.1. Fisicoquímicos

Una vez caracterizado el lixiviado tratado de las plantas N°1 y N°3 durante el periodo analizado, se compararon los valores medidos, con los estipulados en los niveles guía internacionales de reúso de efluentes tratados para riego según la FAO, OMS, U.S.EPA y Australia (señalados en el punto 2.5.1).

Por su parte, esta misma comparativa se realizó con las normativas nacionales de uso de efluentes cloacales tratados de Puerto Madryn y Mendoza (punto 2.5.2).

Como ya se mencionó en el punto 2.5.2.1, en el caso de Mendoza se tomaron los valores de referencia correspondientes a la categoría de efluentes cloacales con tratamiento secundario.

3.4.2. Patógenos y barreras múltiples

El uso final de un relleno sanitario comúnmente es el desarrollo de la tierra para uso recreativo, como son los campos de golf, parques, parques naturales, campos y senderos de uso público para caminar o andar en bicicleta. Estos tipos de desarrollos son relativamente fáciles de construir y mantener, ya que los asentamientos diferenciales debidos a la descomposición de los residuos no afectan negativamente las instalaciones, como si pudiera suceder con un edificio.

Dicho esto, y teniendo en cuenta el uso actual de las áreas verdes regadas de la zona de estudio, el análisis de los parámetros asociados a los patógenos del lixiviado tratado se realizó tomando los valores de referencia de la categoría “A”, establecida por la OMS como “riego de cultivos que probablemente se comerán sin cocinar, campos deportivos y parques públicos” (ver tabla 8).

Por su parte, debido a que el valor establecido por los niveles guía de la U.S. EPA, es más exigente que el estipulado por la OMS, se tomó también el valor de la tabla 11, que corresponde a la categoría “calidad de agua para reúso urbano restringido a largo plazo”.

A nivel nacional, se tomaron los valores máximos admisibles de las normas de calidad de efluentes cloacales con tratamiento secundario, para reúso agrícola de la provincia de Mendoza (ver tabla14). Además, se hizo uso de los niveles de calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura para el riego restringido, de la legislación de Puerto Madryn (ver tabla 15). Cabe aclarar que, en estos dos casos, como era de esperarse, los valores coinciden con los de la OMS, debido a que suele ser el organismo referente a nivel mundial en el desarrollo de normativas de uso seguro de aguas regeneradas.

Debido a que la tecnología de tratamiento del lixiviado analizado en el presente documento, cuenta con una etapa de ultra y nano filtración, la capacidad de remoción de patógenos es alta. Para tener una estimación de la reducción alcanzada por el sistema de tratamiento de lixiviado de la zona de estudio, se toma como referencia los valores típicos de reducción de patógenos presentados por la U.S. EPA (2012).

Con el fin de obtener un valor conservador, se adopta en todos los casos los valores más bajos de remoción para cada etapa de tratamiento.

Cabe destacar que la OMS (2006), señala que la utilización de aguas regeneradas para su uso en agricultura debe incluir una serie de medidas o barreras múltiples, que buscan disminuir los riesgos para la salud humana. Por lo tanto, previamente a mostrar la reducción que podría alcanzarse mediante el tratamiento del lixiviado en las plantas N°1

y N°3, es necesario presentar otras medidas complementarias que hacen parte del concepto de barreras múltiples, y que pueden ser implementadas en la zona de estudio con el fin de reducir la posibilidad de exposición a patógenos cuando se riega con lixiviado tratado.

En este caso, se ha tenido en cuenta los dos grupos poblacionales (permanentes y no permanentes) de la zona de estudio, descritos en el punto 2.6.1.

1) Tratamiento del efluente

Como primera barrera se encuentra el tratamiento del efluente, en este caso de lixiviado proveniente del módulo. Pensado como barrera, se evalúa la reducción de patógenos y químicos tóxicos a niveles que no excedan los riesgos tolerables, o que combinados con otras medidas permitan alcanzar objetivos basados en metas de salud.

2) Control de vectores

Se debe controlar vectores que puedan contaminar el efluente ya tratado o el agua regenerada, con virus patogénicos, protozoos, bacterias y helmintos.

3) Control a la exposición

Es posible evitar la exposición de personal permanente y temporal, controlando el acceso a la zona de riego, en donde solo los encargados del mantenimiento de las áreas verdes tengan contacto con el líquido, siempre haciendo uso de EPP. Se deben incorporar buenas prácticas de higiene personal, como el lavado de manos con agua y jabón después de tener contacto con el agua regenerada, o con elementos que hayan tenido contacto con la misma. Además, se debe restringir el acceso público a los reservorios del agua regenerada especialmente al personal no permanente.

4) Restricción de cultivos

Esta barrera contempla la utilización de cultivos que no sean destinados al consumo humano, o que serán procesados antes de ser consumidos, por ejemplo, alimentos cocinados o deshidratados. En este caso los cultivos son ornamentales y de protección de la cobertura del relleno, por lo tanto, está implícita la barrera. Sin embargo, vale la pena mencionarla para resaltar los cultivos que no deberían ser regados con este tipo de agua regenerada.

5) Métodos de riego

Se refiere a la utilización de sistemas de riego, que reduzcan la exposición de la población a patógenos o agentes contaminantes. Entre los sistemas, los de mayor riesgo para la salud humana son los sistemas de riego por inundación, en los que puede haber contacto directo con el líquido, y los de aspersión, que posibilitan la dispersión de agentes contaminantes o patógenos. El riego localizado (por goteo) es el sistema que brinda la mejor protección. En el caso del riego localizado y subsuperficial, se puede llegar a reducir la exposición a patógenos entre 2 y 6 logs de reducción.

En la actualidad el sistema de riego para las especies que se contemplan en el presente trabajo de tesis, *Lolium multiflorum* (Ryegrass anual) y *Cynodon dactylon* (Bermuda), es por medio de aspersión.

Como ya se mencionó, los sistemas de riego por aspersión tienen la desventaja de tener un alto potencial para dispersar los agentes contaminantes como virus y bacterias. Sin embargo, los huevos de helmintos y quistes de protozoarios, no suelen ser transmitidos a la población por medio de estos aerosoles.

Con el fin de evitar la exposición de las personas a este aerosol, la OMS sugiere que se deje una zona *buffer*, de entre 50 y 100 m entre las calles o caminos y los puntos de asentamiento humano. En el caso de la zona de estudio, no tiene sentido tomar esta medida, ya que no existen asentamientos humanos a una distancia menor a los 50 m. Sin embargo, se debe asegurar que los puestos de control de vigilancia y las oficinas del predio estén ubicados a una distancia entre 50 y 100 m de las áreas regadas con lixiviado tratado.

Otra medida de reducción de patógenos, cuando se dispone de un sistema de riego por aspersión, es el de usar micro aspersores o el control de la dirección del aerosol. Estas medidas pueden llegar a conseguir 1 log de reducción (OMS, 2006).

6) Decaimiento - *Die off*.

En los cultivos también se puede contemplar el *Die off* o decaimiento de los patógenos, como virus y bacterias. Esta barrera consiste en dejar un tiempo predeterminado entre el riego y la cosecha, para posibilitar la eliminación natural de algunos microorganismos. Se considera que por cada día que se espere entre el riego y la cosecha o consumo, se puede sumar un log de reducción de patógenos dependiendo de las condiciones climáticas (OMS, 2006). En el caso de un clima cálido y seco, se estima una reducción de hasta 2 log por día, mientras que en un clima húmedo y frío, con poca radiación solar directa, es de 0,5 log por día aproximadamente. Por otro lado, los huevos de helmintos pueden permanecer viables en las superficies de los cultivos hasta por 2 meses, aunque pocos sobreviven más de 30 días (OMS,2006).

En la zona de estudio no se cuenta con cultivos comestibles, por lo tanto, no es necesario contemplar el *Die off* como una barrera. Sin embargo, a manera preventiva, se

propone hacer uso de este concepto, aplicándolo entre el riego y el corte de césped, momento en el que el personal de jardinería tiene el mayor contacto con el cultivo regado.

En la figura 16, se muestra la reducción estimada de diferentes patógenos (medida en logaritmos), teniendo en cuenta las etapas de tratamiento con la que cuenta el lixiviado de la zona de estudio. En todos los casos, se tomaron los valores más bajos de remoción de la tabla 12, (punto 2.5.1.5.). Adicionalmente se consideró una reducción de 0,5 logs al contemplar el *Die off*.

Al aplicar estas barreras, se puede estimar que en el caso de *Eschericia coli*, es posible lograr una reducción de 1 log a través de un tratamiento secundario, 4 log por el tratamiento de membranas de ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF), y 0,5 log por dejar un día entre el ultimo riego y el corte del césped o del ingreso de personal en la zona regada. Esto significa que el tratamiento tendría el efecto de reducir 5.5 log, respecto a la concentración inicial de coliformes del lixiviado sin tratar. Cabe aclarar, que el cálculo no considera los EPP, que necesariamente deberán utilizar las personas encargadas del sistema de riego.

Es importante destacar que, las concentraciones de coliformes son muy variables en un lixiviado sin tratar. Por ejemplo, el lixiviado analizado por Simanata, et al. (2012), presenta una población promedio de *E coli* de 9.4×10^3 UFC/100 ml, mientras que, en el caso de Anuar, N. M., & Chan, C. M (2020), el lixiviado sin tratar analizado presentó 2.3×10^6 UFC/100 ml de *E coli*.

Por otro lado, la caracterización microbiológica del lixiviado de un mismo relleno puede variar significativamente en el tiempo, es así como en el lixiviado analizado por Zurbriggen, A.,(2016) se encontraron valores de *E coli* muy distintos entre las muestras

medidas en el mes de noviembre del 2017 (4.3×10^2 UFC/100 ml), con respecto a los de marzo (4.6×10^4 UFC/100 ml).

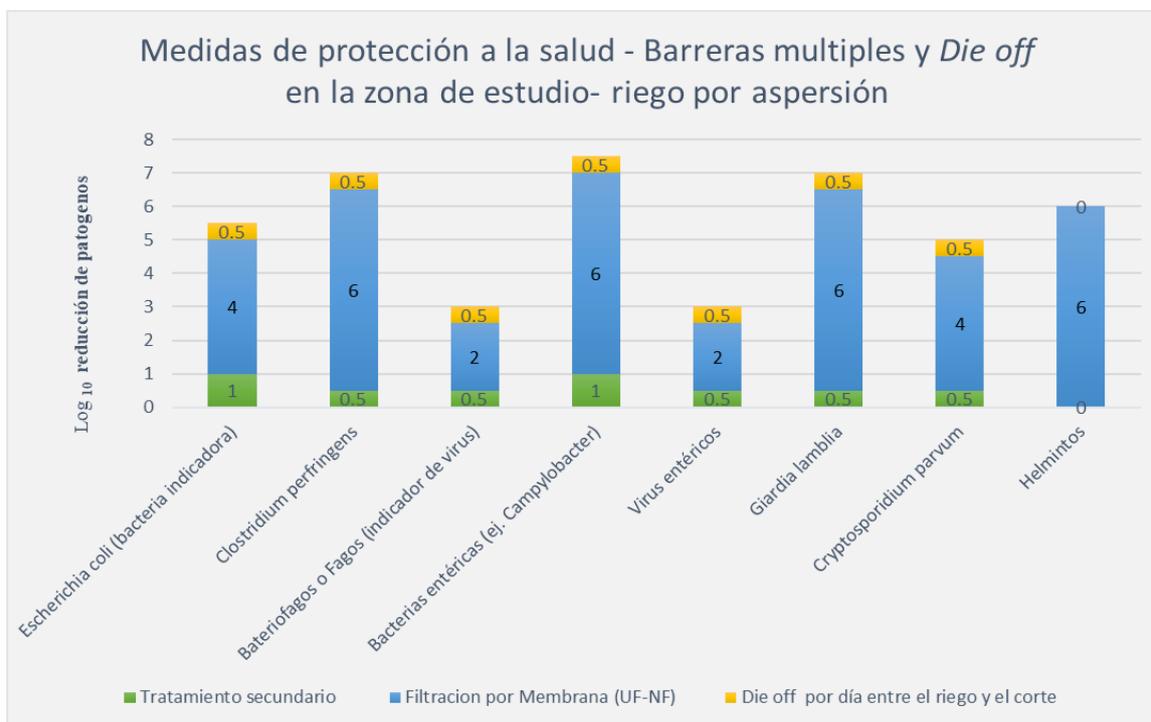


Figura 16. Log de reducción de patógenos en la zona de estudio

Debido a que no se cuenta con mediciones de *E coli* en el lixiviado no tratado de la zona de estudio, se tomó el valor más alto referenciado en fuentes bibliográficas, siendo este el medido por Anuar, N. M., & Chan, C. M (2020). De esta manera, se asume que el lixiviado sin tratar, presenta un valor aproximado de 2.3×10^6 UFC/100 ml. Al contar con una reducción de 5,5 log de *E coli* mediante las barreras ya mencionadas, se logra obtener un valor en el orden de 20 UFC/100 ml en el lixiviado tratado.

En relación con los virus, los sistemas de ultrafiltración pueden alcanzar una remoción significativa entre 2 a 4 log de reducción. Es importante tener en cuenta, que el método más importante en la inactivación de los virus se consigue generalmente mediante

desinfección por UV. Sin embargo, el monitoreo de virus en efluentes es complejo y poco práctico, a pesar de contar con el sistema de medición en tiempo real de la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) (U.S. EPA, 2012). Por esta razón, no se establecen límites sobre organismos patógenos específicos como *Clostridium sp*, *Giardia sp* o virus, en la categoría de uso de efluentes para riego urbano restringido, y su monitoreo se realiza por medio de organismos indicadores como las bacterias coliformes y *E coli* (U.S. EPA, 2012).

De todos modos, considerando los rendimientos esperables para cada una de las etapas de tratamiento del lixiviado de la zona de estudio, se puede asumir que cuenta con una adecuada eliminación de virus, *Clostridium sp* y *Giardia sp*.

3.5. Requerimiento de agua para la zona de estudio

Como se mencionó en el punto 2.11, para calcular el requerimiento de agua de un cultivo, es necesario calcular la evapotranspiración de este.

El cálculo de requerimientos de agua de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, se realizó mediante el *software* de diseño de riego CROPWAT 8.0, desarrollado por la FAO.

Para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) se hizo uso de la ecuación FAO Penman-Monteith. Los datos climatológicos fueron tomados de la base de datos a largo plazo de la estación meteorológica de Buenos Aires (OBS.CENTR) (Latitud 34,58 Sur, Longitud 58.48 Oeste, Altitud 25 m), a través de la base de datos CLIMWAT 2.0.

Una vez calculada la ET_o, se estimó la ET_c mediante el uso del coeficiente de cultivo K_c, correspondiente a las distintas etapas de desarrollo de la especie. Este coeficiente representa el efecto combinado de varias características del cultivo: altura, albedo o reflectancia, resistencia a la transpiración y evaporación. También tiene en

cuenta la evaporación del suelo, relacionada directamente con la fracción cubierta por el cultivo. Los valores de K_c de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, fueron tomados de la zona de estudio a partir de fuentes bibliográficas y del manual de la FAO (2006), “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”. En el punto 4.4.3, se describe el análisis realizado y los valores de K_c usados en el cálculo.

Los datos relacionados con la fenología de las especies vegetales, necesarios para calcular ET_c , fueron definidos mediante la consulta directa a ingenieros agrónomos, especialistas en el cultivo de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio. De esta manera, se logró estimar con mayor precisión las etapas de desarrollo de los cultivos. En la figura 17, se indica la duración estimada para las etapas de desarrollo del cultivo: inicial, de desarrollo, media y final de temporada.

Con respecto al momento de siembra, se encontró que la especie *Cynodon dactylon* puede ser sembrada en otoño acompañada por *Lolium multiflorum*, pero también, puede ser sembrada en primavera. Para calcular la demanda de agua, el Software requiere que se establezca una fecha precisa de siembra, de manera que para la especie *Cynodon dactylon* se utilizó el día 22 de septiembre, fecha que se encuentra dentro del periodo recomendado. En el caso de *Lolium multiflorum* se tomó como día de siembra el 20 de marzo; de esta manera, el periodo de decaimiento de una especie coincide con la etapa de germinación o reactivación de la otra.

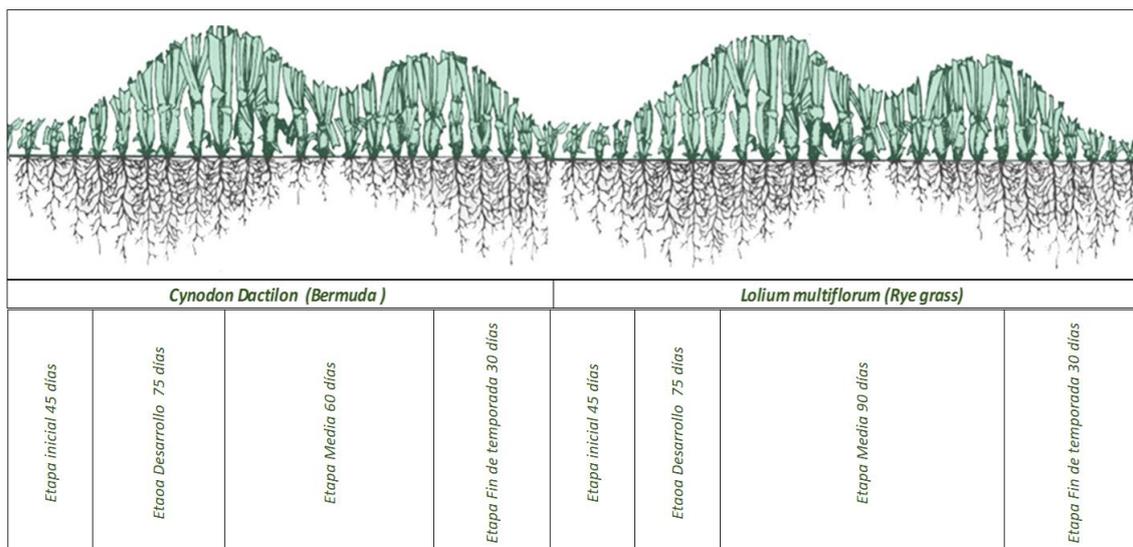


Figura 17. Etapas de desarrollo de *Lolium multiflorum* y *Cynodon dactylon*.

En el punto 2.11. se mencionó que, en condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo (ET_{caj}), puede desviarse de la evapotranspiración estándar (ET_c). Por esta razón, para poder calcular ET_{caj}, se tomó información adicional relacionada con el cultivo, como el factor de agotamiento (p) y el de respuesta al rendimiento (K_y). Además, es necesario contar con los valores de humedad inicial disponible del suelo, la tasa máxima de infiltración de la precipitación y el agotamiento inicial de humedad (expresado como % de agua disponible total o % ADT). Los datos referidos al suelo, fueron obtenidos mediante el programa *Soil Water Characteristics* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Cabe aclarar que ADT, representa la cantidad total de agua disponible en el suelo que un cultivo puede extraer, y cuya magnitud depende del tipo de sustrato y la profundidad de las raíces. Por su parte, el factor de agotamiento (p), es la fracción promedio del total de ADT que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico. Es decir que, define el porcentaje de humedad del suelo que vamos a

permitir que se agote antes de aplicar el riego, y varía según el tipo de cultivo y la etapa de desarrollo, en valores que van de 0 a 1.

Por su parte, el factor K_y , describe la reducción relativa de la productividad en función del descenso de la ET_c generada por la falta de agua. Es decir, indica que tan sensible es el cultivo al déficit hídrico. Debido a que el impacto de la salinidad en el crecimiento y productividad de las plantas, así como la evapotranspiración de los cultivos es un proceso integrado en el tiempo, en general se utiliza el mismo valor de K_y para toda la temporada, prediciendo así, la reducción de la evapotranspiración del cultivo.

Para una gran cantidad de cultivos, el valor de K_y es alrededor de 1, de manera que si se desconoce el valor, es posible utilizar $K_y = 1$. Sin embargo, la FAO también se aconseja usar el valor K_y de un cultivo similar al de análisis, estos valores se encuentran en la tabla 24 del manual FAO (2006). En este caso, debido a la ausencia del valor de K_y para los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, se tomó de dicha tabla el valor correspondiente a la alfalfa ($K_y = 1,1$).

Como se mencionó en el punto 2.6.3.2, el suelo de la “terrace media” y “terrace alta”, es de tipo franco limoso en los primeros 25cm (0- 25 cm), y en profundidad pasa a un suelo arcillo limoso (25-50 cm).

Teniendo en cuenta la profundidad de las raíces de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, y del análisis de los perfiles de suelo de la zona de estudio (punto 3.6.), se determinó, que para estimar el ET_{caj} de los cultivos, se tomaría el suelo arcillo limoso. Es por esta razón que todos los datos obtenidos a partir del programa *Soil Water Characteristics*, (USDA), se realizaron considerando este suelo.

Los resultados obtenidos del CROPWAT 8.0, así como los cálculos realizados para cada uno de los cultivos, se describen en el punto 4.4.

3.5.1. *Leaching factor*

Debido a que los valores de CE del lixiviado son altos, en relación con el agua utilizada en la zona de estudio para el riego de zonas verdes, se requiere estimar el volumen total de agua regenerada, que debe aplicarse para controlar el exceso de sales en el suelo, puesto que su acumulación en la zona de la raíz puede reducir la productividad, y llegar a imposibilitar el desarrollo de la planta.

El *leaching factor* permite determinar la cantidad de agua adicional que se necesita aplicar al cultivo, para que las sales en el suelo sean llevadas por debajo de las raíces de las plantas mediante percolación.

3.5.2. Cálculo de *leaching factor*

Para estimar el *leaching factor* de los cultivos en estudio, se usaron los valores promedio y los máximos de CE que fueron medidos *in situ* para distintas diluciones de lixiviado tratado (ver tabla 23 y 24.).

Además, mediante los resultados obtenidos, se calcularon los valores de CE para otras diluciones (ver tabla 25), con el objetivo de estimar diferentes concentraciones de lixiviado, siempre esperando un rendimiento igual o superior al 90 %. Este porcentaje mínimo de rendimiento se determinó, teniendo en cuenta la proyección del uso que se espera dar a las áreas verdes del relleno sanitario de la zona de estudio.

A partir de esta información, se calculó el *leaching factor* para cada uno de los cultivos analizados en el presente documento. Los resultados se detallan en el punto 4.6.2 y 4.6.4.

Tabla 23. CE en mS/cm de distintas diluciones de agua de pozo (acuífero Puelche) y lixiviado tratado

Fecha	% de lixiviado	CE mS/cm
11-Sep-2019	20%	4,13
	50%	9,21
	70%	11,19
	100%	14,56
	Agua de pozo	1,17
19-Sep-2019	20%	3,32
	50%	8,05
	70%	11,00
	100%	15,03
	Agua de pozo	1,23
26-Sep-2019	20%	3,35
	50%	8,74
	70%	10,68
	100%	14,04
	Agua de pozo	1,22
25-Oct-2019	20%	4,03
	50%	9,09
	70%	10,79
	100%	15,08
	Agua de pozo	1,19

Tabla 24. Valores máximos y promedio de CE en diluciones de lixiviado tratado

% de lixiviado	CE mS/cm	
	Máximo	Promedio
20%	4,13	3,71
50%	9,21	8,77
70%	11,19	10,91
100%	15,08	14,67

Tabla 25. Valores de CE calculados para diferentes porcentajes de lixiviado

% de lixiviado	CE mS/cm
	Calculado
45%	7,23
30%	5,22
25%	4,55

Cabe aclarar que, en los manuales de la FAO, también puede encontrarse *leaching factor* (LF) expresado como *leaching requirement* (LR por sus siglas en inglés).

El *leaching factor* o *leaching requirement* (LR) fue calculado bajo el método de la FAO (1994) “*water quality for agriculture*” siguiendo la siguiente ecuación”.

$$LR = \frac{EC_w}{5(EC_e) - EC_w}$$

LR: requisito mínimo de lixiviación necesario para controlar las sales dentro de la tolerancia del cultivo (EC_e) con métodos de riego de superficie ordinarios.

EC_w: salinidad del agua de riego aplicada en mS/cm.

EC_e: salinidad promedio del suelo tolerada por el cultivo, medida en un extracto de saturación del suelo.

El valor de EC_e se obtuvo de la tabla 4 del manual de FAO (1994) “*water quality for agriculture*”. Cabe aclarar que debido a la ausencia de un valor de EC_e para el cultivo de *Lolium multiflorum*, se tomó el valor de *Lolium perenne* como referencia.

La tabla 26 muestra los valores de EC_e y EC_w, para distintos potenciales de rendimiento de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium perenne*, en función de la salinidad del agua de riego (EC_w) y/o de la salinidad del suelo (EC_e).

Tabla 26. Valores de EC_e y EC_w según la salinidad¹ del agua de riego y del suelo en mS/cm²

Cultivo	100%		90%		75%		50%		0%	
	EC _e ³	EC _w	EC _e	EC _w						
<i>Cynodon dactylon</i>	6,9	4,6	8,5	5,6	11	7,2	15	9,8	23	15
<i>Lolium perenne</i> *	5,6	3,7	6,9	4,6	8,9	5,9	12	8,1	19	13

Fuente: FAO (1994).

Continúa

Tabla 26: continuación.

¹-Adaptado de Maas y Hoffman (1977) y Maas (1984). Estos datos solo deben servir como guía para las tolerancias relativas entre los cultivos. Las tolerancias absolutas varían según el clima, las condiciones del suelo y las prácticas culturales. En suelos yesíferos, las plantas tolerarán

²-aproximadamente 2 mS/cm de salinidad del suelo (ECe) que la indicada, pero la salinidad del agua (ECw) seguirá siendo la misma que se muestra en esta tabla.

³. ECe significa salinidad media de la zona radicular medida por la CE del extracto de saturación del suelo, notificada en miliSiemens por cm (mS/cm) a 25°C. ECw significa CE del agua de riego en mS/cm. La relación entre la salinidad del suelo y la salinidad del agua (ECe = 1.5 ECw) asume una fracción de lixiviación del 15-20 % y un patrón de uso de agua del 40-30-20-10 % desde las zonas superiores a las inferiores de la raíz.

⁴. El potencial de rendimiento cero o ECe máximo indica la salinidad teórica del suelo (ECe) en la que cesa el crecimiento del cultivo.

De esta manera, para calcular la cantidad total de agua requerida por el cultivo, considerando los requerimientos por evapotranspiración (ET) y la cantidad de agua necesaria para lixiviar sales, se utiliza la siguiente ecuación.

$$AW_T = \frac{ET}{1 - LR}$$

AW_T: en inglés *applied wáter*- Demanda Total de agua a aplicar (mm / año).

ET: demanda total anual de agua del cultivo (mm / año).

LR= LF: en inglés *leaching factor*- requerimiento de agua para para lixiviación, expresado en fracción (fracción de lixiviación).

Donde ET, incluye la evapotranspiración del cultivo considerando todos los factores de estrés hídrico y rendimiento analizados (ETcaj).

Finalmente, para calcular la cantidad de agua que debe aplicarse al cultivo (AW), se debe sumar el agua de riego, con la necesaria para lixiviar sales, obteniendo así, la

demanda total de agua (AW_T). A este resultado se le debe restar el aporte de la precipitación efectiva, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$AW = AW_T - \text{Precipitación Efectiva}$$

AW: Cantidad de agua a aplicar al cultivo

AW_T : Demanda total de agua (demanda de agua del cultivo + demanda para lixiviar sales).

3.6. Impacto sobre los acuíferos - hidrogeología local

Al margen de contar en la zona de estudio con un lixiviado tratado, el cual busca cumplir con los parámetros de vuelco a cuerpo superficial según la Res 336/ADA, es necesario definir la potencial afectación de las aguas subterráneas en caso de ser utilizado como fuente de agua para riego.

Cabe aclarar que, el presente documento analiza el efecto del riego sobre los cultivos que hacen parte de la cobertura final de los módulos, y las áreas verdes ubicadas en las terrazas “intermedias y altas” del área de interés.

El análisis hidrogeológico, se realizó mediante el uso de una serie de perfiles de pozos de monitoreo de aguas subterráneas, los cuales fueron suministrados por la empresa encargada de su control. El objetivo fue establecer el impacto del lixiviado tratado para riego, en las aguas subterráneas de la zona de estudio.

De la extensa red de pozos de monitoreo de aguas subterráneas al acuífero Somero (Freático/Pampeano) y al Puelche (ver figura 18 y 19), se seleccionaron los perfiles descriptivos litológicos de 30 pozos (ver figura 20). Estos, fueron elegidos en posiciones aguas arriba, a los lados y aguas abajo del relleno, teniendo en cuenta la geomorfología

de la zona de estudio. De esta manera se verificó el perfil hidrogeológico, y el eventual riesgo de impactos negativos que podría causar el uso de lixiviado tratado para riego en las aguas subterráneas del predio. Una muestra de los perfiles que representa las características generales del área de interés se presenta en el anexo A.8.

Como muestra la numeración (ver figura 18 y 19), los pozos se han perforado como pozos agrupados (tipo *cluster*), donde al instalarse de manera contigua, se pueden monitorear en un mismo punto tanto el acuífero somero (Pampeano) como el Puelche. Por ejemplo, el pozo (NS 64) corresponde al acuífero Puelche y es adyacente al pozo (NP65), el cual llega hasta el acuífero Pampeano. De este modo, se puede contrastar la potencial afectación del acuífero somero por infiltraciones de superficie, con la calidad del Puelche en esa misma ubicación, verificando así, si hubo contaminación cruzada entre acuíferos.

La evaluación que se realizó a los perfiles de cada uno de los pozos buscó determinar la presencia y continuidad lateral de un acuitardo efectivo, entre el acuífero somero y el Puelche. Un espesor menor a 1m de arcillas entre estos dos acuíferos, aumentaría el riesgo de contaminación cruzada vertical, tanto sea por falta total de aislación (si no existe el manto arcilloso, lo cual es posible), o por un espesor escueto que permite la percolación parcial a través de la delgada capa arcillosa.

El resultado del análisis de los perfiles, se describen en el punto 4.8.



Fuente: empresa responsable del monitoreo de las aguas subterráneas del relleno sanitario de la zona de estudio (2017).

Figura 18. Pozos de monitoreo al acuífero Puelche



Fuente: empresa responsable del monitoreo de las aguas subterráneas del relleno sanitario de la zona de estudio (2017).

Figura 19. Pozos de monitoreo al acuífero Pampeano

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Volumen aproximado de agua subterránea extraída para riego de zonas verdes

El riego de áreas verdes dentro del predio se realiza por medio de camiones cisterna o mediante bombas sumergibles, las cuales alimentan los sistemas de riego por goteo o por aspersión. En ambos casos, el agua se extrae desde perforaciones que van al acuífero Puelche.

En la tabla 27, se detallan las diferentes actividades del riego de áreas verdes y una estimación del volumen de agua anual que se aplica a los cultivos.

Tabla 27. Volumen de extracción anual de agua subterránea para riego de zonas verdes

Actividad	Litros/día	Días/año	Litros/año	m ³ /año
Riego	40 000	144	5 760 000	5760
Riego de plantas camión cisterna	10 000	121	1 210 000	1210
Riego de plantas con bombas sumergible	25 000	180	4 500 000	4500
		Total	11 470 000	11 470

Cabe aclarar que, el volumen calculado es un valor aproximado, ya que hasta la fecha no se cuenta con caudalímetros que controlen cada uno de los puntos de acceso al agua de riego. Se cree que en el futuro se contará con métodos más precisos de medición del recurso en la zona de estudio.

Dicho lo anterior, se estima que actualmente se usan para riego de zonas verdes alrededor de 11.470 m³/año de agua del acuífero Puelche,

A continuación, se detalla la cantidad de lixiviado tratado, que puede ser usado para suplir la demanda de agua de riego en la zona de estudio.

4.2. Volumen de lixiviado tratado disponible para riego

En la tabla 28, se muestra los valores referentes a la cantidad de lixiviado que se trató por mes en las plantas de tratamiento N°1 y N°3 durante el periodo 2016 y 2017. Al no contar con valores de junio de 2016, se tomó el valor del mismo mes del año 2017, para calcular el promedio anual de lixiviado tratado.

Como se ha indicado anteriormente, parte de este lixiviado es utilizado en la actualidad para riego de caminos en el predio. La cantidad de líquido utilizado se estimó a partir del número de viajes que realizan los camiones por mes. Finalmente, la diferencia entre el lixiviado tratado y el utilizado para riego, aporta el volumen mensual que es volcado al río Reconquista (ver tabla 28).

La figura 21 muestra gráficamente la cantidad mensual de lixiviado tratado y su destino final durante el periodo 2016 y 2017.

Tabla 28. Volumen lixiviado tratado y su posterior uso durante el año 2016 y 2017

Lixiviado	Expresado en miles de m ³ por mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Lixiviado tratado 2016	63,10	62,85	69,45	61,14	60,62	*	60,94	68,97	62,38	62,81	69,42	65,49
Riego de caminos 2016	30,50	30,25	28,70	28,54	28,02	*	28,34	28,22	29,78	30,21	28,67	32,89
Lixiviado tratado 2017	64,59	64,94	73,43	63,40	72,48	62,35	63,16	71,42	61,77	61,83	70,06	62,44
Riego de caminos 2017	31,99	32,34	32,68	30,80	31,73	29,75	30,56	30,67	29,17	29,23	29,31	29,84
Volcado al Reconquista 2016	32,60	32,60	40,75	32,60	32,60	*	32,60	40,75	32,60	32,60	40,75	32,60
Volcado al Reconquista 2017	32,60	32,60	40,75	32,60	40,75	32,60	32,60	40,75	32,60	32,60	40,75	32,60

*Ausencia del dato.

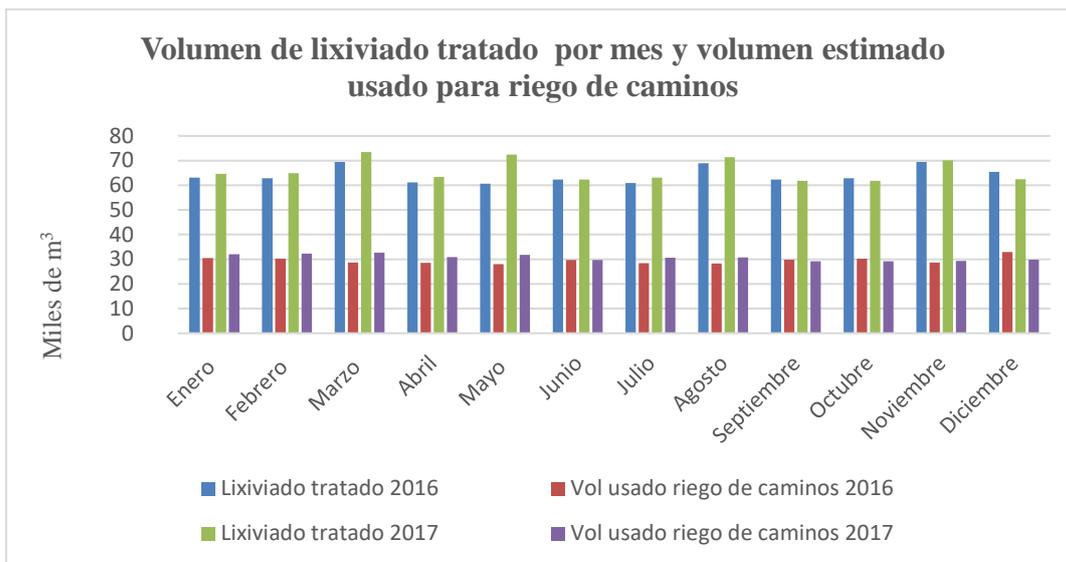


Figura 21. Volumen de lixiviado tratado en el periodo 2016 y 2017 y uso estimado para riego de caminos.

En la tabla 29, se presenta a modo de resumen, los volúmenes promedio anuales correspondiente al lixiviado total tratado, el destinado al riego de caminos y la cantidad restante que se vuelca al río Reconquista. De los 780,689.50 m³/año de lixiviado producidos en las Plantas N°1 y N°3, más de la mitad (419,725.00 m³/año) eventualmente podría estar disponibles para el riego de zonas verdes.

Tabla 29. Volumen promedio anual producción de lixiviado tratado, cantidad usada en riego de caminos y volumen restante

	Promedio en m ³ /año
Lixiviado tratado	780 689,5
Volumen usado riego de caminos	360 964,5
Volumen volcado al río Reconquista	419 725

4.3. Niveles guía de reúso y calidad fisicoquímica y biológica del lixiviado tratado

4.3.1. Caracterización fisicoquímica del lixiviado tratado

La tabla 30, recopila los parámetros analizados que presentaron uno o más valores, por encima de los máximos establecidos por las normativas y niveles guía (que fueron

tomados como referentes en el presente trabajo de tesis), para el uso de aguas regeneradas como fuente de agua de riego.

Teniendo en cuenta los estudios mencionados en el punto 2.4, se decide no solo analizar los parámetros que fueron medidos bajo la Resolución 336/2003 del ADA, sino, además, sumar aquellos que son relevantes para la conservación del suelo, la tolerancia de las especies regadas y la no afectación a las aguas subterráneas. Dichos parámetros se listan a continuación.

- Parámetros relevantes para la estructura del suelo: salinidad y nutrientes.
- Parámetros relevantes relacionados con la tolerancia de las especies *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*: salinidad (CE y RAS), temperatura, pH, cloro y boro.
- Parámetros que pueden afectar las aguas subterráneas: salinidad (CE y RAS), nutrientes (en particular nitrógeno), coliformes fecales.
- Parámetros que pueden afectar cuerpos de agua superficial: salinidad (CE y RAS), DQO, DBO, temperatura, pH, cloro, coliformes fecales, nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Tanto los parámetros listados como los medidos bajo la Resolución 336/2003 son analizados individualmente en lo que resta del capítulo.

Tabla 30. Parámetros relevantes para la caracterización del lixiviado tratado como fuente de agua de riego para la zona de estudio.

<u>Parámetros</u>	<u>Unidad</u>	<u>Puerto Madryn</u>	<u>Mendoza</u>	<u>Australia</u>	<u>U.S.EPA</u>	<u>FAO</u>
		Reúso de efluentes cloacales Tratados para riego Tipo 3	Efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola	Reúso de agua tratada para riego de áreas verdes	Calidad de agua para reúso urbano (Restringido ^a a largo plazo) ^b	Apto para riego de zonas verdes ^c
Conductividad	mS/cm	2,25	2,50	0,65 a 1,3 ^d	-----	Ver tabla 7
pH	Unidades	5,5 a 9,0	5,5-9	-----	6 a 9	-----
Temperatura	°C	-----	45	-----	-----	---
RAS	mg/l	6	6	10-18 ^e	----	Ver tabla 7
DBO5	mg/l	30	30	≤20	≤30	-----
Boro	mg/l	4	1	0,5 ^e	0,75	Ver tabla 7
Cloro libre	mg/l	*	0,5	1 ^f	1	-----
Nitrógeno total	mg/l	*	*	**	-----	Ver tabla 7
Fósforo total	mg/l	*	*	***	-----	-----
Coliformes Fecales	UFC/100ml	1000	1000	<1000	≤200	<1000
D.Q.O.	mg/l	70	70	-----	-----	-----

^a Reúso restringido: se consideran riego de jardines, camellones en autopistas y avenidas, fuentes de ornato, campos de golf; lagos destinados al paisaje y barreras hidráulicas de seguridad; panteones, parques memoriales y abastecimiento de hidrantes.

^b U.S.EPA, 1992.

^c FAO 1992.

^d Tasa de salinidad del agua: baja.

^e 0,5 es el valor límite deseable, sin embargo, los niveles guía de Australia contemplan la tolerancia de las especies a las concentraciones de boro, las cuales pueden variar desde valores ≤ 0,5 hasta 6-8 mg/l.

^f se considera que valores ≤ 1 mg/l no afectarían a la mayoría de los cultivos, sin embargo, la tolerancia varía según la especie.

* Limite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.

** En el caso de nitrógeno total, los niveles guía de Australia clasifican a este nutriente de los efluentes para riego según su potencial como contaminante. Bajo < 50, Medio 50 -100, Alto >100 (DEC 2004). Es importante tener en cuenta que los valores de nitrógeno dependerán también del tipo del cultivo.

*** En el caso del Fósforo total, los niveles guía de Australia clasifican a este nutriente según su potencial como contaminante. Bajo < 10, Medio 10 -100, Alto >100 (DEC 2004). Pueden variar según el tipo de cultivo.

----- No establecido.

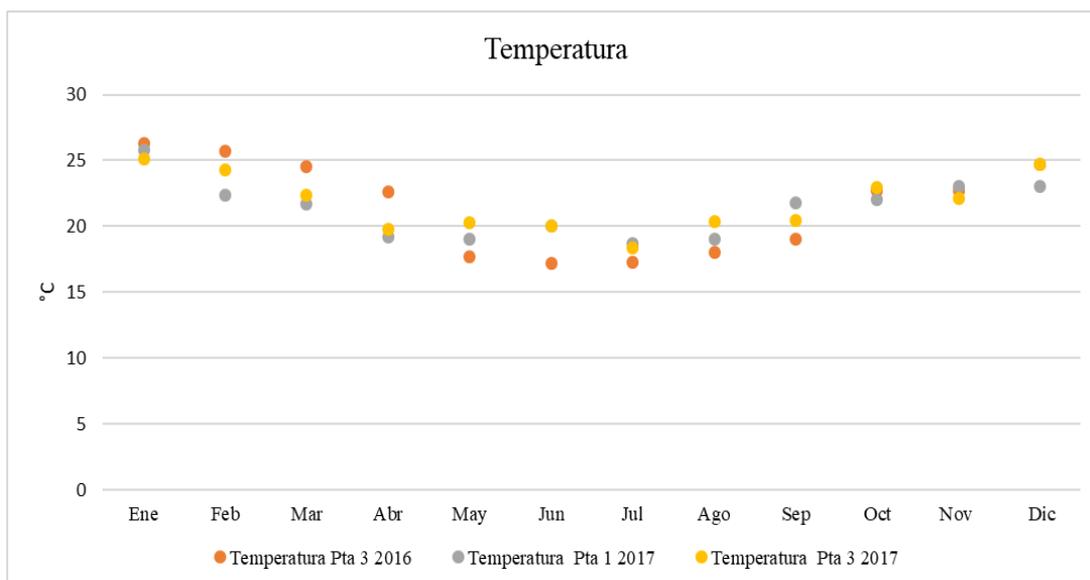


Figura 22. Temperatura del lixiviado tratado por las plantas N°1 y 3, medida en el periodo 2016 y 2017

La figura 22, muestra la temperatura registrada en el lixiviado tratado durante el periodo analizado. Se puede apreciar que el valor máximo medido es de 26°C en el mes de diciembre y de 11 °C en agosto. Cabe resaltar que, la temperatura máxima estipulada por la normativa de Mendoza, que es la única que establece límites para este parámetro (ver tabla 30), es de 45 °C, por lo tanto, el lixiviado tratado cumple con los límites establecidos por esta normativa. A pesar de ello, se considera importante monitorear la temperatura del agua regenerada, debido a que un cambio en el tratamiento o en el ambiente, puede llegar a influir sobre la temperatura final del líquido tratado.

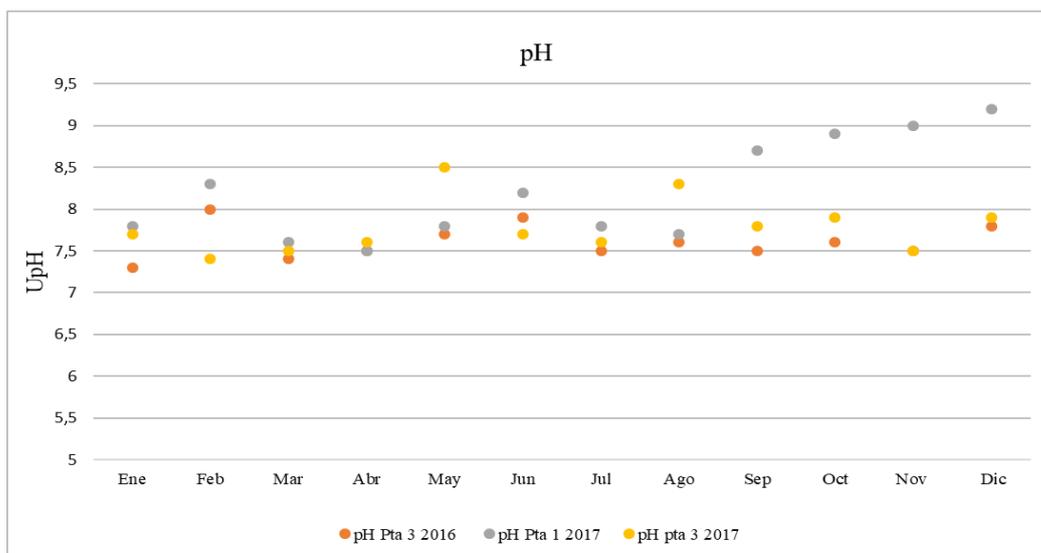


Figura 23. pH del lixiviado tratado por las plantas N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017

El valor máximo de la normativa y niveles guía tomados como referencia es de 9 UpH. Por su parte, el mínimo estipulado es de 5,5 (ver tabla 30).

A pesar de que la mayoría de los valores de pH durante el periodo analizado, se encuentran dentro de los valores recomendados, salvo un valor (9,2 UpH medido en la planta N°1 en el mes de diciembre del 2017), como se aprecia en la figura 23. A pesar de ello, se considera que este parámetro debe ser monitoreado de manera periódica.

Cabe mencionar que el lixiviado presenta una alta variabilidad del pH durante su maduración en el módulo y en su tratamiento, incidiendo de manera significativa sobre el sistema suelo – planta, así como en la especiación de los compuestos químicos. Dicho esto, se recomienda corroborar previamente a regar, que el pH del lixiviado tratado se encuentre dentro de los valores recomendados (5,5 a 9 UpH).

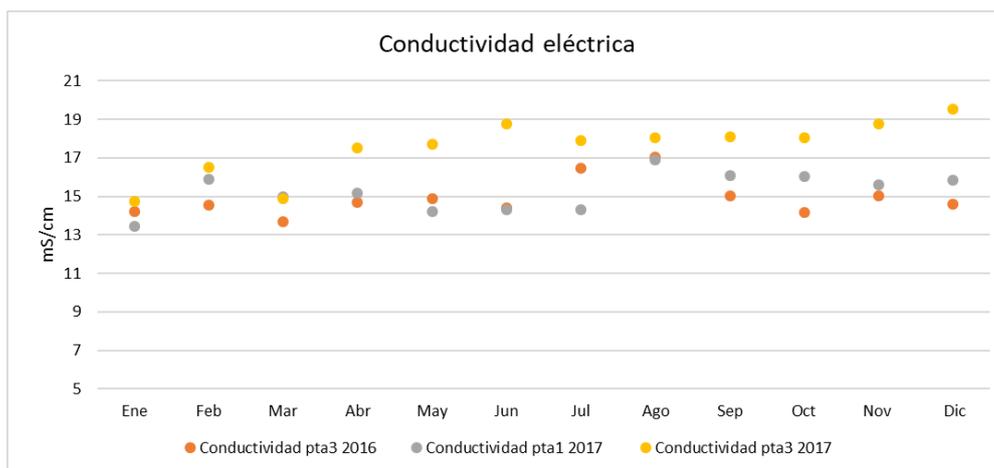


Figura 24. CE del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medida en el periodo 2016 y 2017

La CE es relevante a la hora de analizar aguas regeneradas, ya que brinda información indirecta sobre su salinidad. Al ser un método de medición rápido y de bajo costo, se ha utilizado frecuentemente en estudios referentes al uso de lixiviado para riego de cultivos, debido al impacto que ejercen las sales en el desarrollo de las plantas.

En este caso, la CE máxima registrada durante el periodo analizado es de 19,53 mS/cm y la mínima registrada es de 13,71 mS/cm (ver figura 24).

El valor máximo estipulado por la legislación de Mendoza (ver tabla 30), es 2,50 mS/cm. En el caso de la FAO, las aguas con valores mayores a 3,0 mS/cm, son categorizadas como aguas con grado de restricción severo (ver tabla 7). Por su parte, los valores referenciales de los niveles guía de Australia van desde 0,65 a 1,3 mS/cm. Sin embargo, aclaran que debe tenerse en cuenta el suelo de la zona en la que se va a regar y el grado de tolerancia de la planta. Por ejemplo, las plantas perennes son más susceptibles que las plantas anuales a la CE, probablemente porque la acumulación de sales en el tiempo es mayor que las de periodos cortos de vida. Así y todo, los niveles guía de

Australia, categorizan a las aguas que presentan una concentración mayor a 8,1 mS/cm como demasiado salinas para los cultivos.

Cabe destacar que, estas mismas guías de Australia, indican valores de salinidad máxima del agua de riego que pueden llegar a tolerar diferentes especies, a partir de las características del suelo. Estos valores, se determinan utilizando la ecuación de Ayers y Westcot (1985), la cual tiene en cuenta: la CE medida en el suelo, un crecimiento del cultivo del 80%, y asume que las precipitaciones son limitadas.

Debido a que el suelo de interés para el presente trabajo de tesis es franco arcilloso, y los niveles guía de Australia no contemplan este tipo, se tomaron como referencia los valores tanto de un suelo arcilloso ligero, como el de un franco. Es así, como para el cultivo de *Cynodon dactylon*, sembrado en un suelo franco, la CE del agua de riego debería estar entre 2,7 y 8,1 mS/cm, utilizando un *leaching factor* (LF) del 17 %. En el caso de un arcilloso ligero, los valores varían entre 2,2 y 8,1 mS/cm, con un LF del 12%.

Para *Lolium multiflorum*, los valores de CE del agua de riego admisibles para un suelo franco, con un LF de 17%, se estiman alrededor de 2 mS/cm, y para un arcilloso ligero con un LF de 12%, el valor baja a 1,0 mS/cm.

Teniendo en cuenta los valores estipulados por las diferentes legislaciones y niveles guía mencionados, se puede afirmar que, el lixiviado tratado de la zona de estudio no podría ser usado para riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, debido a que los valores de CE medidos superan los límites recomendados

Por otro lado, cuando en el estudio de Bowman, et al., del año 2002 (punto 2.4.2), se regó con un lixiviado cuya CE era de 3,6 mS/cm, en un suelo conformado por un horizonte "A" franco arenoso, con agregado de materia orgánica, y una cobertura vegetal

compuesta por *Cynodon dactylon* y *Pennisetum clandestinum*, no se detectaron afectaciones en la estructura del suelo, a las especies regadas, ni a los cuerpos de agua en la zona de estudio. Cabe aclarar que dicha CE (3,6 mS/cm), se obtuvo a través de una dilución del 20% de lixiviado no tratado.

Dicho lo anterior, se decide realizar una serie de diluciones con el lixiviado tratado y agua que se utiliza actualmente para regar (agua del acuífero Puelche), con el fin de medir los valores de CE que podrían obtenerse. Los resultados, fueron usados para determinar la factibilidad del uso del lixiviado tratado para riego, sin que se vea afectado el buen desarrollo de los cultivos bajo estudio, ni los acuíferos del área de interés. Los cálculos y su correspondiente análisis se desarrollan en el punto 4.4.

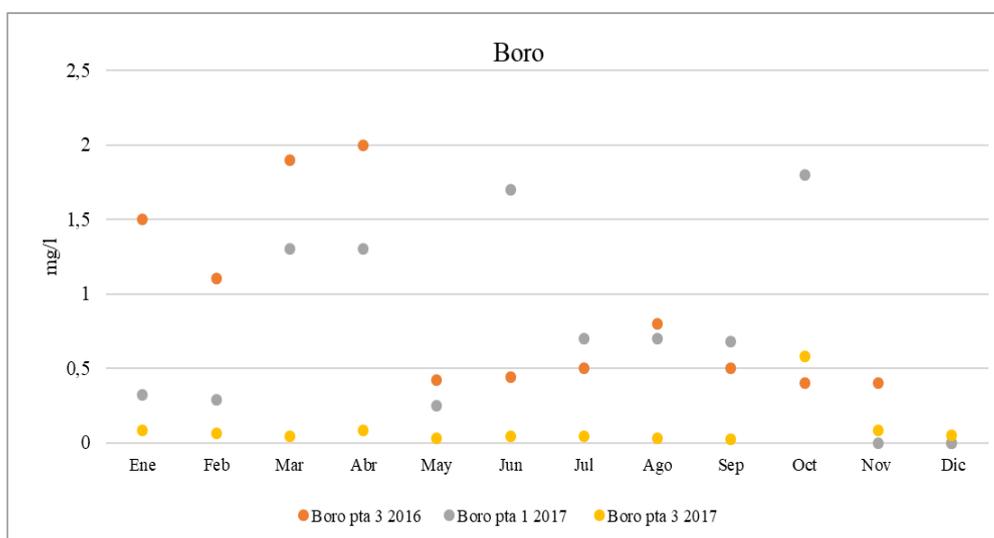


Figura 25. Boro del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N° 1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017

La figura 25 muestra que, para las muestras analizadas, los valores de boro se encuentran por debajo de 2 mg/l. La normativa de Mendoza tiene como límite máximo

1 mg/l, mientras que, para la FAO valores por encima de 3 mg/l implican un agua de riego con grado de restricción de uso severo. En el caso de los niveles guía de Australia, el valor límite deseable es 0,5 mg/l; no obstante, se contempla que la mayoría de las especies vegetales pueden tolerar concentraciones de hasta 8 mg/l, y algunas pocas hasta 15 mg/l.

Se debe tener en cuenta que, el boro es un micronutriente para las plantas con un rango de concentración muy pequeño entre la deficiencia y la toxicidad, que generalmente se da después de ser acumulado en el suelo.

La deficiencia de boro puede ocurrir en suelos de textura gruesa con bajo contenido de materia orgánica, con un pH superior a 7 o recientemente encalados (Agronomy note, 2019). Por su parte, es poco probable que la aplicación de aguas regeneradas con altas concentraciones de boro afecte la superficie foliar de la planta, pero si puede acumularse cerca de la zona de la raíz, generando toxicidad si no es lixiviado a través del suelo, siendo más probable que suceda en los arcillosos por su baja capacidad de lixiviar.

Se considera que *Cynodon dactylon* es muy tolerante al boro. Un ensayo en Louisiana, fertilizó un suelo arenoso plantado con esta especie, con tasas anuales de hasta 3.62 kg por acre (4045 m²) durante 3 años, sin efectos perjudiciales sobre los rendimientos del cultivo (Agronomy note, 2019). Cabe mencionar que, la concentración crítica de boro medida en las hojas superiores es de 4 mg/l, mientras que para el resto es de 5 a 15 mg/l.

En el caso de *Lolium multiflorum*, se encontró que esta especie tiene potencial de ser usada en remediación de suelos contaminados con hasta 50 mg/l de boro (S Albarracín Franco & M de Vian, 2009).

Dicho lo anterior, y considerando que la elevada CE del lixiviado tratado planteó la necesidad de realizar diluciones, se cree que las concentraciones de boro no deberían representar un problema para el desarrollo adecuado de los cultivos. Sin embargo, es importante que se aborde en un trabajo posterior, medir las concentraciones de boro en la dilución a usar, junto con un seguimiento sobre la acumulación de este elemento en el suelo, y su relación con la tolerancia de las especies plantadas.

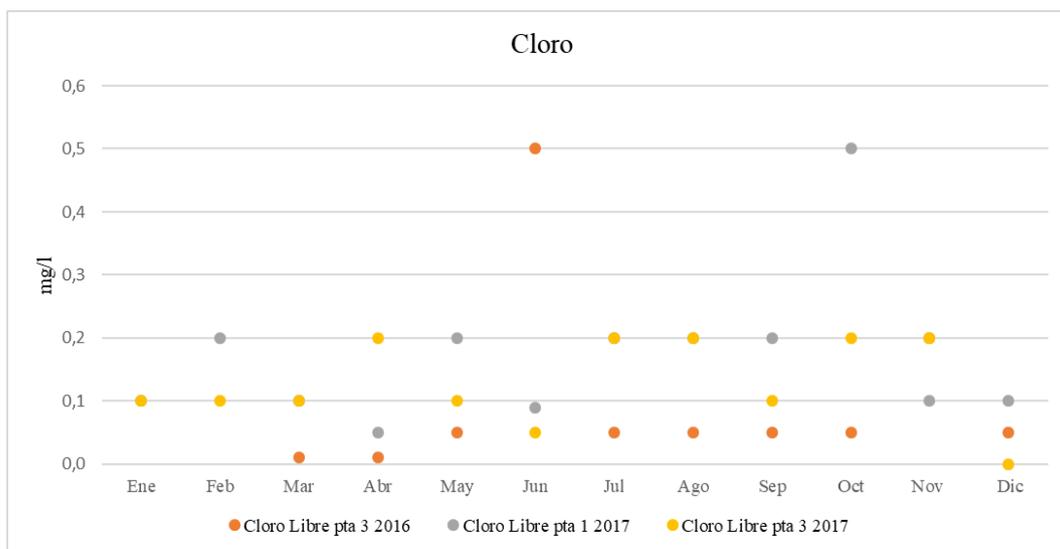


Figura 26. Cloro libre del lixiviado tratado de las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017

Respecto al cloro, la legislación de Mendoza contempla un valor máximo libre para el agua de riego de 0,5 mg/l, mientras que los niveles guía de Australia y U.S. EPA recomendarían una concentración máxima de 1 mg/l.

Las plantas de tratamiento de lixiviado analizadas, cuentan con un sistema de ultra y nana filtración, por lo tanto, no requieren usar cloro en su etapa final para cumplir con los valores bacteriológicos estipulados por la Res 336/2003 ADA. Esto coincide con los

datos observados del periodo analizado (ver figura 26), donde diversos valores registrados están por debajo de los límites de detección del método de medición (<0,5 o <0,01).

Según la información suministrada por los encargados del sistema de tratamiento del lixiviado en la zona de estudio, no se suele hacer uso del cloro como etapa final del proceso. Esporádicamente se lo emplea para el control de algas en los tanques reservorios, que se encuentran a la salida de las membranas de nanofiltración, previamente al vuelco al río Reconquista.

Teniendo en cuenta la información recopilada, tomar el lixiviado tratado desde el permeado de la etapa de nanofiltración, aseguraría regar con agua sin cloro, lo que resultaría óptimo para el cultivo de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*. En el caso de hacer uso de lixiviado tratado proveniente de los tanques reservorios, se recomienda verificar que las concentraciones de cloro libre en el agua regenerada estén por debajo de los 0,5 mg/l.

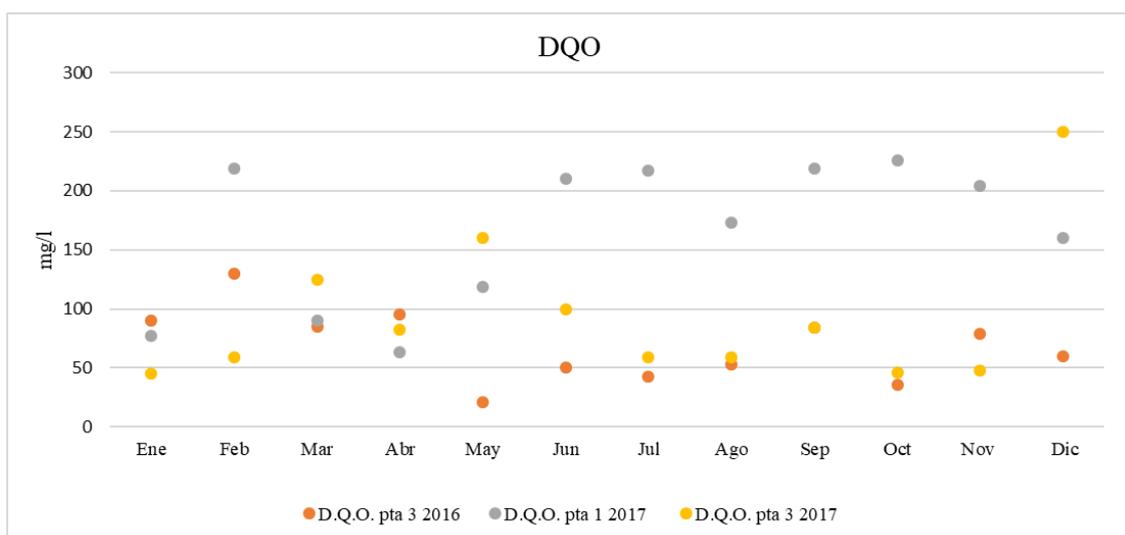


Figura 27. D.Q.O. del lixiviado tratado por las plantas N°1 y N° 3, medido en el periodo 2016 y 2017

Los valores de DQO medidos durante el periodo analizado para cada una de las plantas de tratamiento, se encuentran mayoritariamente por debajo de los 240 mg/l, con excepción del mes de diciembre del 2017 en la planta N°3, con un valor de 250 mg/l (ver figura 27). Por lo tanto, la mayoría de los valores, cumplirían con lo estipulado por la normativa de Mendoza para riego agrícola con tratamiento primario, cuyo valor máximo es 240 mg/l (ver Anexo A.6). Sin embargo, en el caso de contar con un tratamiento secundario, este valor baja (al igual que en caso de la normativa de Puerto Madryn), a un máximo de 70 mg/l (ver tabla30).

Se debe aclarar que, los niveles guía internacionales no estipulan un valor máximo de DQO, y que la normativa vigente de vuelco de efluentes a cuerpo superficial según la RES 336/2003 del ADA, estipula como límite máximo 250 mg/l. Por lo tanto, el tratamiento actual del lixiviado busca reducir las concentraciones de DQO, a valores que estén igual o por debajo de dicho límite.

No obstante, es siempre recomendable vigilar este parámetro, debido a la estrecha relación que tiene con el estado de maduración del lixiviado. Es así como, un lixiviado joven suele presentar un DQO más alto que uno de mayor maduración. En el caso de la zona de estudio, se han encontrado valores en el lixiviado sin tratar en rangos que van desde los 4.000 mg/l hasta los 15.000 mg/l. Esta variabilidad en las concentraciones del DQO, plantea la necesidad de un control periódico de este parámetro.

Dicho lo anterior, se considera importante al igual que en el caso del Boro, contar con valores medidos de DQO en el agua regenerada, puesto que, dependiendo de la proporción de lixiviado a usar, el valor de DQO podría llegar a alcanzar la concentración

máxima que estipula la normativa de Mendoza y Puerto Madryn (siendo estas las más exigentes en cuanto a este parámetro), para el riego de zonas verdes.

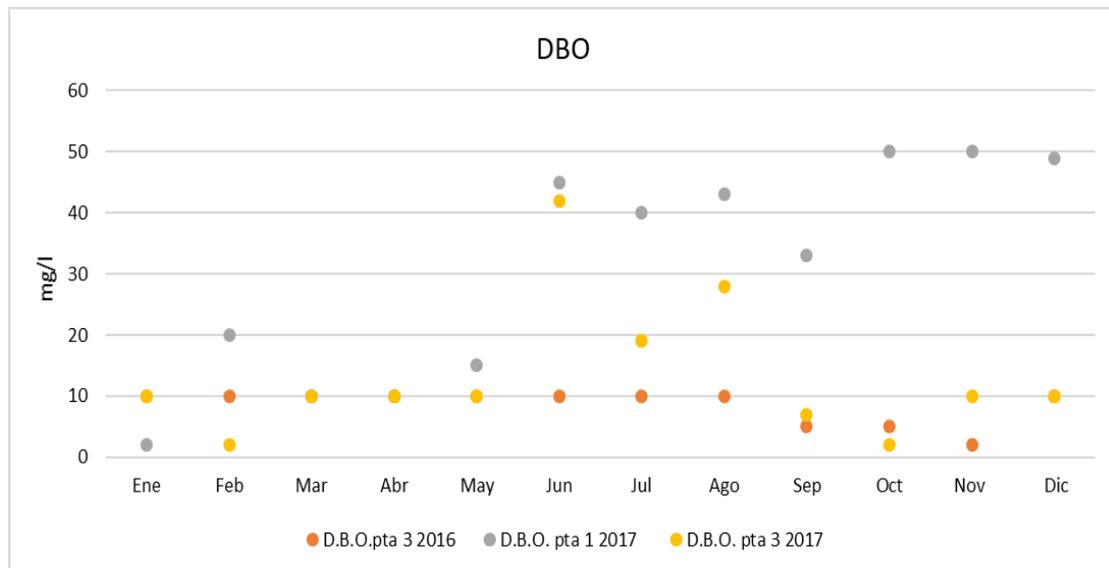


Figura 28. D.B.O. del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el periodo 2016 y 2017

La DBO registrada durante el periodo analizado para cada una de las plantas (ver figura 28), muestra una alta variabilidad con valores que van desde ≤ 5 mg/l hasta 50 mg/l. La normativa de Mendoza y Puerto Madryn, al igual que los niveles guía de U.S. EPA, señalan un límite máximo de DBO de 30mg/l, mientras que los niveles guía de Australia estipulan 20 mg/l (ver tabla 30).

Generalmente, la DBO se utiliza como índice de materia orgánica, ya que, en un ambiente de alta carga, el oxígeno presente en el agua se consume para descomponerlos compuestos orgánicos, creándose un ambiente anaeróbico. Durante el proceso de descomposición, los óxidos en el suelo como hierro (Fe^{3+}), manganeso (Mn^{5+}), y sulfato (SO_4^{2-}), consumen oxígeno para reducir el potencial de óxido-reducción (Hanseok Jeong , Hakkwan Kim , & Taeil Jang, 2016). Finalmente, el hierro generado, el

manganeso y el sulfuro junto con ácidos orgánicos, pueden llegar a alterar la absorción de los nutrientes por parte del cultivo (Hanseok Jeong, et al., 2016).

Debido a que los valores de DBO resultantes del tratamiento son variables, y teniendo en cuenta la importancia que este puede tener en la adecuada absorción de los nutrientes, se considera relevante asegurar que los valores finales de DBO en el agua regenerada (es decir la dilución de lixiviado tratado con agua del acuífero Puelche) sean ≤ 30 mg/l, e idealmente por debajo de 20 mg/l.

La dilución del lixiviado tratado podría ser suficiente para obtener una concentración de DBO, que esté por debajo de los límites máximos mencionados. Sin embargo, se considera importante efectuar mediciones *in situ* sobre el líquido final, así como realizar un control periódico previo a su uso como riego.

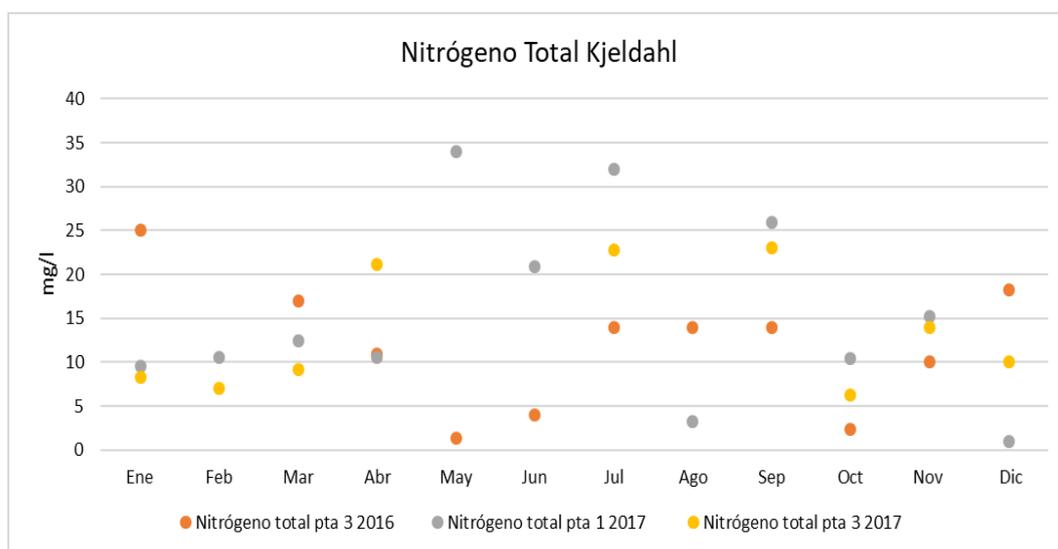


Figura 29. Nitrógeno Total Kjeldahl, del lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3, medido en el periodo 2016 y 2017

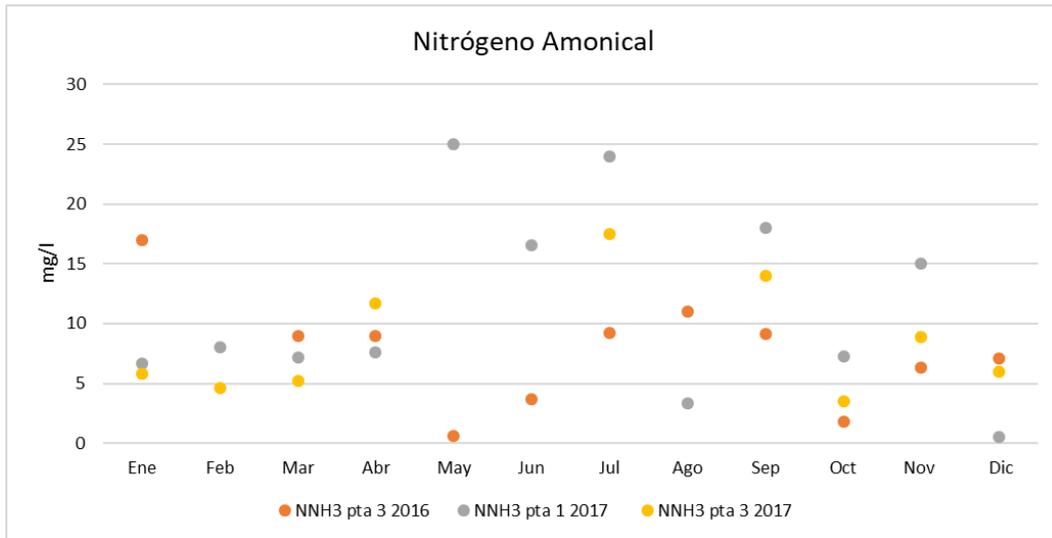


Figura 30. Nitrógeno amoniacal del lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3, medido en el periodo 2016 y 2017

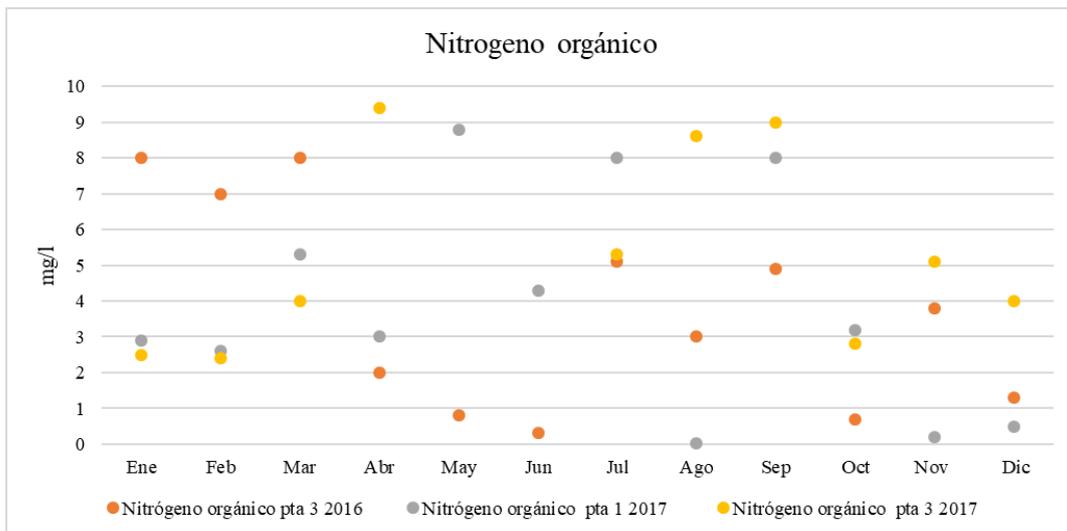


Figura 31. Nitrógeno orgánico, del lixiviado tratado de las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medido en el año 2016 y 2017

Las figuras 29, 30 y 31 muestran las concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl, amoniacal y orgánico, medidos en el lixiviado tratado de las plantas N°1 y N° 3.

La tecnología instalada en las plantas de tratamiento del área de interés busca asegurar valores de nitrógeno total ≤ 35 mg/l, de nitrógeno amoniacal ≤ 25 mg/l y de nitrógeno orgánico ≤ 10 mg/l en el lixiviado tratado. Dichos valores corresponden a los máximos permitidos por la Res 336/03 del ADA, para descarga de efluentes a cuerpo superficial (en este caso al río Reconquista).

Si bien, la normativa nacional y los niveles guía internacionales no estipulan un valor máximo de nitrógeno, ya que el valor dependerá del tipo de cultivo a regar, existen una serie de aspectos que deben ser considerados.

En primer lugar, la mayoría de las plantas requieren nitrógeno en mayor cantidad que cualquier otro nutriente del suelo. El nitrógeno orgánico contribuye a la fertilidad y el amonio y el nitrato a la nutrición de las plantas. Cabe mencionar que el nitrógeno orgánico y el amonio, pueden ser convertidos fácilmente en nitrato por los microorganismos del suelo.

Por lo general, se aplican grandes cantidades de nitrógeno a los cultivos mediante el uso de fertilizantes, razón por la cual, el uso de efluentes como fuente de agua de riego, abre la posibilidad de disminuir el aporte de nutrientes de síntesis química. Sin embargo, como ocurre con todos los nutrientes, los aportes de nitrógeno deben adaptarse a la demanda de las plantas. El exceso de nitrógeno que pueda perderse por escorrentía podría llegar a entrar a cuerpos de agua superficiales, desencadenando posibles procesos de eutrofización. Además, parte del nitrógeno en forma de nitrato, es móvil en el suelo y puede lixiviar a las aguas subterráneas, contaminándolas.

Dicho lo anterior, es importante resaltar que, en el estudio de Bowman et al. (2002) como se mencionó en el punto 3.4.2, se realizó una dilución con 20 % de lixiviado, para

obtener un agua de riego cuya concentración de nitrógeno (NH_4^+) era de $285 \pm 31,8$ mg/l. El resultado fue un valor de nitrógeno (NH_4^+) óptimo para el desarrollo de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Pennisetum clandestinum*, sin producir pérdidas de nitrógeno mediante procesos de escorrentía o lixiviación del suelo.

Los hallazgos de Bowman et al. (2002), coinciden con los registrados por Del Moro, et al. (2014), quienes señalan que mediante una dilución conformada por 25% de lixiviado, con una concentración de NH_4^+ inicial entre 1500 mg/l y 2000 mg/l, puede obtenerse un valor final de 375 a 500 mg/l, alcanzando así, un agua regenerada con fines de riego y fertilización en dosis de 133.5 mm/m^2 para un cultivo de *Lepidium sativum*.

Como se mencionó anteriormente, el valor de CE del lixiviado tratado marca la necesidad de realizar diluciones, por lo tanto, se puede pensar que el valor de nitrógeno de dicha solución será menor a los medidos en el lixiviado tratado durante el periodo 2016 y 2017, estando muy por debajo de los valores mencionados por Bowman, et al. (2002) y Del Moro, et al. (2014).

Por los motivos antes indicados, se considera que el nitrógeno no representa en sí mismo, una limitación para el uso del lixiviado como fuente de agua de riego en la zona de estudio. Sin embargo, debido a que el lixiviado de los rellenos sanitarios de RSU suele presentar alta variabilidad fisicoquímica en el tiempo, es importante hacer un seguimiento al agua final y al suelo, con el fin de controlar posibles pérdidas de nitrógeno (en forma de nitrato) por lixiviación.

Por su parte Macdonald N, et al. (2008), midieron el efecto las lluvias sobre los nitratos (NO_3^-) en el suelo, encontrando que a pesar de que tenían una tendencia creciente durante el periodo de riego, en cuanto llegaban las lluvias las concentraciones bajaban.

Godley, et al. (2004a, 2004b, 2005), informaron efectos similares de corta duración, cuando se intercalaban los periodos de riego con lixiviado durante el invierno, temporada en la que aumentaban las precipitaciones.

Dicho lo anterior, se considera de interés abordar en un trabajo posterior si existe para la zona de estudio, acumulación de este nutriente en el suelo cuando es regado el cultivo con agua regenerada (parte de lixiviado tratado y agua del acuífero Puelche).

Por su parte, estudiar el efecto que tienen las precipitaciones sobre las concentraciones de nitrato en el suelo, midiendo además las pérdidas, en caso de existir, es importante para prevenir impactos negativos sobre el ecosistema.

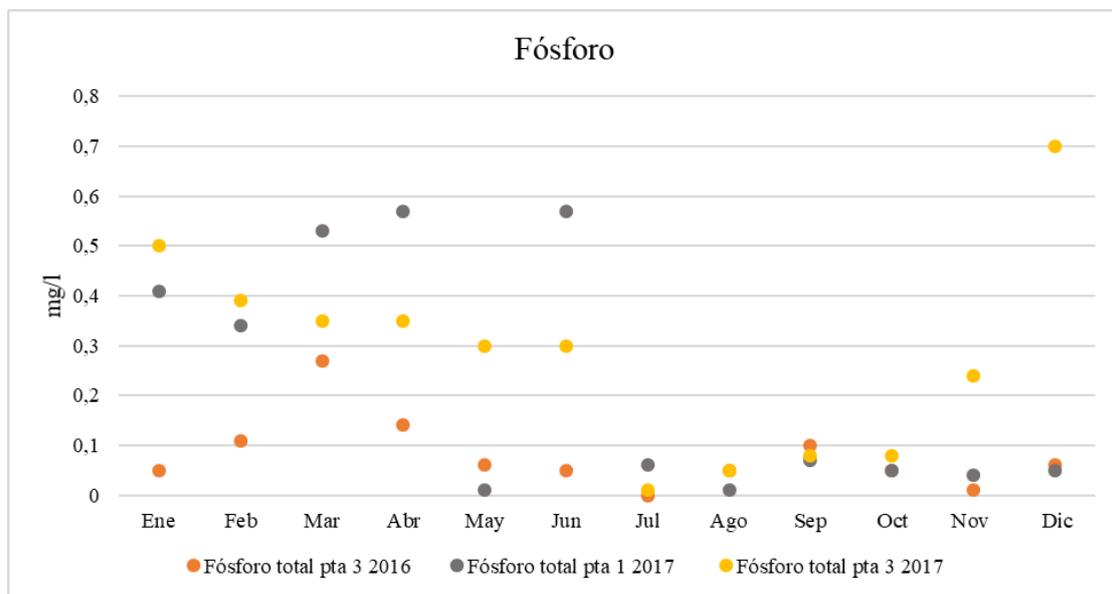


Figura 32. Fósforo total, del lixiviado tratado por las plantas N°1 y 3, medido en el periodo 2016 y 2017

Al igual que el nitrógeno, el fósforo es un nutriente indispensable para las plantas, y por esta misma razón, ni las normativas o niveles guía tomados como referencia estipulan un valor máximo para el agua regenerada.

En este caso, los valores de fósforo medidos durante el periodo analizado se encuentran por debajo de 1mg/l (ver figura 32).

Cabe mencionar, que cuando el fósforo se agrega al suelo mediante el uso de aguas regeneradas, la mayor parte de la fracción soluble se adsorbe en las partículas del suelo, quedando disponible para las plantas. Cuanto más lento percole el agua a través de este, más eficiente es el proceso.

Por lo general, a diferencia del nitrógeno, se lixivia muy poco fósforo de los suelos agrícolas, excepto en suelos arenosos donde se adsorbe menos fósforo y una fracción mayor permanece soluble (Environment Protection and Heritage Council, the Natural Resource Management Ministerial Council and the Australian Health Ministers' Conference., 2006). En la zona de estudio, el suelo es franco arcilloso, por lo tanto, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es bajo.

Es importante resaltar, que el presente estudio no contempla el riego de áreas verdes cerca al río Reconquista, o de las lagunas que se encuentren ubicadas en las “terrazas bajas”, ya que son zonas anegables que no requieren de sistemas de riego para el mantenimiento de la vegetación lindante. Por esta razón, se considera que el riego con lixiviado tratado no representa por sí mismo, un riesgo de contaminación por fósforo para estos cuerpos de agua.

En el caso de los pequeños estanques de agua dulce, construidos en la “terrazza alta”, se recomienda dejar una zona buffer con abundante vegetación, a fin de retener los

nutrientes que puedan llegar a entrar por escorrentía. Adicionalmente, deberá cuidarse que, en caso de hacer uso de aspersores, no lleguen a estar direccionados durante su rotación sobre los espejos de agua.

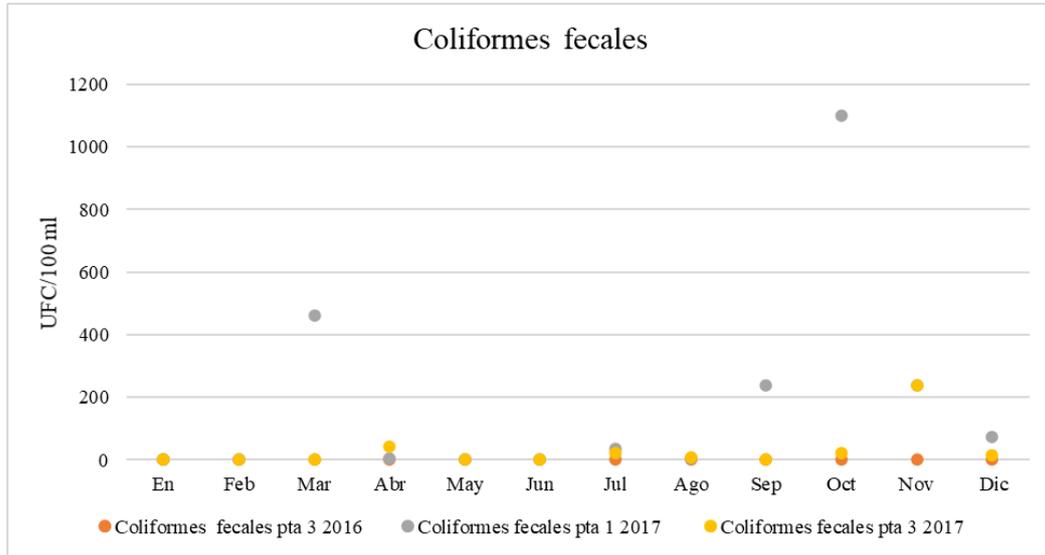


Figura 33. Coliformes fecales del lixiviado tratado por las plantas de tratamiento N°1 y N°3, medidos en el periodo 2016 y 2017

En todas las normativas y niveles guía tomados como referencia, el valor máximo permitido de coliformes fecales es 1000 UFC/100ml, con excepción de la U.S. EPA, cuyo valor estipulado es ≤ 200 UFC/100ml (ver tabla 30).

En la figura 33, se evidencia que la mayoría de los valores registrados durante el periodo analizado, se encuentran por debajo de 200 UFC/100ml. Este valor es esperable debido a que el tratamiento de lixiviado de la zona de estudio cuenta con una etapa de ultra y nano filtración. A pesar de ello, en el mes de marzo del 2017, se obtuvo un valor de 460 UFC/100ml, mientras que en el mes de septiembre y noviembre se registró 240 UFC/100 ml y en octubre 1.100 UFC/100ml.

Es importante resaltar que la estimación de coliformes haciendo uso de las medidas de protección a la salud, descritas y analizadas bajo el concepto de barreras múltiples (punto 3.4.2.), dio como resultado un valor aproximado de 20 UFC/100 ml en el lixiviado tratado.

Dicho lo anterior, se considera importante medir este parámetro sobre la dilución de lixiviado tratado y controlar de manera periódica, los parámetros bacteriológicos del agua regenerada previo a su uso. En caso de no contar con valores aceptables, se podría pensar en emplear cloración en la última etapa del tratamiento, con su posterior control sobre las concentraciones de cloro en el agua final. Por último, hacer uso del concepto de barreras múltiples (desarrollado en el punto 3.4.2.), es clave para minimizar los posibles riesgos a la salud del personal, que pueda estar en contacto con el agua regenerada.

4.3.2. Salinidad

La tabla 31 recopila los parámetros medidos en dos laboratorios, para completar el perfil fisicoquímico del lixiviado tratado y establecer así, la salinidad del líquido (como se describe en el punto 3.3.). Con este objetivo, se tomaron como referencia los estudios efectuados con lixiviados de rellenos sanitarios de RSU (mencionados en los puntos 2.4.1 y 2.4.2), los cuales demostraron que el riesgo de salinización del suelo es alto, cuando se usa lixiviado como fuente de agua para riego. Estos mismos parámetros, fueron medidos en dos muestras de agua del acuífero Puelche, denominadas pozo 2 y pozo 5. A continuación, se detalla el cálculo del balance iónico de los valores obtenidos de cada muestra, con el fin de tomar como válidos aquellos valores que correspondan a un error aceptable del balance iónico (+/- 5%).

Tabla 31. Resultados de parámetros asociados a la salinidad de las muestras de agua de pozo y lixiviado tratado.

Laboratorio	CE	Salinidad	Fosfato	Cloruro	Sulfato	Nitrato	Alcalinidad de	Alcalinidad de	Nitrito	Magnesio	Calcio	Hierro	Sodio	Potasio	TDS^a	
1	pH	mS/cm	ppt	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	carbonato mg/l	Bicarbonato mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l
Pozo 5	7,5	0,9	0,5	0,6	19,5	3	100	Ausente	8	3	22,2	36,6	*	118	10,8	0,6
Pozo 2	7	1,2	0,6	2	43,9	95	90,1	Ausente	9	6	22,7	42,1	*	172	12,8	0,8
pta 1	7,9	16	9,4	3,4	3 128	<1	13	Aausente	44	1 099	96,7	103	0,6	1 939	1 040	10,4
pta3	6,9	17	10	12	3 250	68	10,1	Ausente	8	523	110,7	152,5	2	2 074	1 137	11
Laboratorio 2	CE	Salinidad	Fosfato	Cloruro	Sulfato	Nitrato	Alcalinidad de	Alcalinidad de	Nitrito	Magnesio	Calcio	Hierro	Sodio	Potasio	TDS^a	
	pH	mS/cm	ppt	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	carbonato mg/l	Bicarbonato mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l
Pozo 5	7,8	0,86	0,42	<0,3	16,8	6,3	114	Ausente	350	<0,02	22,1	33,9	<0,10	136	10,5	0,56
Pozo 2	8	1,14	0,56	<0,3	43,1	122	89,6	Ausente	360	<0,02	21,9	36,5	<0,10	203	10,2	0,72
pta1	7,9	14,93	8,7	<25,0	3 120	<25,0	<25,0	Ausente	2 030	**	91,9	111	0,22	2 030	1 110	8,06
pta 3	7,3	15,66	9,1	<25	3 290	62,6	2 600	Ausente	261	**	78,5	61,2	2,49	2 250	1 180	9,96

* No detectado

**Impracticable

4.3.2.1. Balance iónico

El balance de iones verifica que la suma de miliequivalente (meq) de aniones determinados en una muestra, es aproximadamente igual a la suma de los cationes. Dado que las especies químicas se encuentran en equilibrio en el agua, se espera que este balance sume cero, o tenga un error aceptable (+/- 5%); descartando las muestras que lo superen.

La ecuación usada para el balance iónico es la siguiente:

$$(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) / (\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}) \times 100$$

En las tablas 32 y 33, se recopila el cálculo del balance iónico realizado con los resultados obtenidos por el laboratorio 1 y 2 respectivamente. La tabla 34, muestra los valores que fueron tomados como referencia para cada una de las muestras.

Tabla 32. Balance iónico laboratorio 1

	\sum aniones	\sum cationes	% diferencia
Pozo 5	8,18	9,70	8,47
Pozo 2	11,10	12,72	6,76
Pta 1	121,29	129,84	3,41
Pta 3	140,33	137,69	-0,95

Tabla 33. Balance iónico laboratorio 2

	\sum aniones	\sum cationes	% diferencia
Pozo 5	8,87	9,10	1,29
Pozo 2	12,24	11,79	-1,87
Pta 1	148,51	124,12	-8,95
Pta 3	111,57	136,15	9,92

Tabla 34. Resultados de parámetros asociados a la salinidad de las muestras de agua de pozo y lixiviado tratado

Laboratorio	pH	CE	Salinidad	Fosfato	Cloruro	Sulfato	Nitrato	Alcalinidad de	Alcalinidad de	Nitrito	Magnesio	Calcio	Hierro	Sodio	Potasio	TDS
1		mS/cm	ppt	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	carbonato mg/l	Bicarbonato mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l
Pozo 5	7,5	0,9	0,5	0,6	19,5	3	100	Ausente	8	3	22,2	36,6	*	118,8	10,8	0,6
Pozo 2	7	1,2	0,6	2	43,9	95	90,1	Ausente	9	6	22,7	42,1	*	172,3	12,8	0,8
Promedio	7,25	1,05	0,55	1,3	31,7	49	95,05	Ausente	8,5	4,5	22,45	39,35	*	145,55	11,8	0,7
Laboratorio	pH	CE	Salinidad	Fosfato	Cloruro	Sulfato	Nitrato	Alcalinidad de	Alcalinidad de	Nitrito	Magnesio	Calcio	Hierro	Sodio	Potasio	TDS
2		mS/cm	ppt	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	carbonato mg/l	Bicarbonato mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	g/l
PTA 1	7,9	14,93	8,7	<25,0	3 120	<25,0	<25,0	Ausente	2030	**	91,9	111	0,22	2 030	1 110	8,06
PTA 3	7,3	15,66	9,1	<25	3 290	62,6	2 600	Ausente	261	**	78,5	61,2	2,49	2 250	1 180	9,96
Promedio	7,87	14,39	8,33	<25	3016,67	62,6	1 382	530	1 490,33	**	88,67	93,07	1,15	2 130	1 140	8,52

* No detectado

**Impracticable

4.3.2.2. RAS

Con los resultados de laboratorio recopilados en la tabla 35, se realizó el cálculo del índice de Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para cada una de las muestras de agua de riego (pozo 1 y 5) y de lixiviado tratado (planta 1 y 3).

Este índice está asociado a la infiltración del agua en el suelo, debido a que altos contenidos de iones de sodio en las aguas de regadío afectan su permeabilidad. El exceso de iones de sodio desplaza el calcio (Ca) y magnesio (Mg), lo que provoca la dispersión y desagregación del suelo, convirtiéndolo en duro y compacto en condiciones secas y reduciendo así, la infiltración de agua y aire a través de este.

El índice RAS o SAR en inglés, se calculó mediante la siguiente ecuación, en donde Na^+ , Ca^+ y Mg^+ , están expresados en meq.

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca^+] + [Mg^+])/2}}$$

La tabla 35 muestra los resultados de los RAS calculados para las muestras de agua de pozo 1 y 2, con la que se riega en la actualidad las zonas verdes en el área de estudio, y del lixiviado tratado por la planta de tratamiento N°1 y 3.

Tabla 35. Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

Muestra	RAS
Pozo 1	3,82
Pozo2	5,32
Pta 1	34,5
Pta 3	44,89

Los valores de RAS muestran una gran diferencia entre el agua de pozo (Agua del acuífero Puelche) y el lixiviado tratado, siendo hasta 9 veces mayor el valor calculado para este último.

El valor máximo de RAS que indica la legislación de Mendoza es 6, mientras que los niveles guía de Australia estipulan entre 10 y 18 para cultivos con una tolerancia moderada, como por ejemplo el cultivo de Alfalfa.

Dicho lo anterior, los valores de RAS calculados confirman que no es viable utilizar el lixiviado tratado sin diluir para riego.

Con el fin de evaluar la dilución requerida para que el lixiviado tratado sea viable como agua regenerada, se calcula el *leaching factor*. Este cálculo, forma parte del requerimiento final de agua de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* para la zona de estudio, y se desarrolla en los puntos 4.6.2 y 4.6.4.

4.4. Estimación de la demanda de agua de los cultivos

Como se mencionó anteriormente, la zona de estudio cuenta con unas 130 ha de zonas verdes que pertenecen al *capping* y a espacios verdes con fines paisajísticos. Estas superficies, fueron sembradas principalmente con las especies: *Cynodon dactylon* (Bermuda) y *Lolium multiflorum* (Rye grass anual).

Mientras que la demanda de agua por parte de la planta depende básicamente de la especie cultivada y el clima, el requerimiento de agua para riego está relacionado, además, con las precipitaciones, el tipo y características del suelo, la gestión del riego, entre otros aspectos. El cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos en el área de estudio fue realizado mediante los procedimientos descritos en el punto 3.5.

A continuación, se desarrolla cada uno de los cálculos necesarios para estimar la demanda de agua de los cultivos (ET_{caj}).

4.4.1. Evapotranspiración de referencia - E_{To}

La evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}), expresa el poder evaporante de la atmósfera en un punto geográfico y época del año específica, sin considerar, las características del cultivo ni los factores del suelo.

Como fue mencionado en el punto 3.5, la estimación de la E_{To} para la zona de estudio se realizó mediante el programa CROPWAT 8.0, que utiliza la ecuación FAO Penman-Monteith. Los datos climáticos como temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento, insolación y radiación fueron tomados de la base de datos de la estación meteorológica de Buenos Aires (OBS.CENTR), con el fin de calcular la radiación y la E_{To} (ver tabla 36).

Tabla 36. Datos meteorológicos de la estación Buenos Aires (OBS.CENTR), y cálculo de E_{To} expresado en mm/día.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² día	E _{To} mm/día
Enero	19,6	29,9	61	190	10,4	26,8	6,05
Febrero	18,9	28,6	66	173	9,2	23,3	5,11
Marzo	16,9	26,3	72	147	7,6	18,3	3,73
Abril	13,3	22,8	71	147	6,6	13,6	2,63
Mayo	10,4	19,3	78	130	5,5	9,8	1,58
Junio	7,7	15,7	83	130	4,3	7,6	1,03
Julio	7,6	15,4	80	147	4,8	8,5	1,16
Agosto	8,3	17,1	72	190	5,9	11,7	1,94
Septiembre	10	19,3	70	190	7	16,1	2,74
Octubre	12,7	22,1	71	190	7,9	20,4	3,66
Noviembre	15,4	25,2	65	190	8,7	23,7	4,76
Diciembre	18,1	28,2	61	190	10,2	26,9	5,8
Promedio	13,2	22,5	71	168	7,4	17,2	3,35

El promedio de la ETo calculada para un año es 3.35 mm/día, los valores más bajos (1,03 y 1,16 mm/día) corresponden a los meses de junio y julio respectivamente. Por su parte, los valores más altos (5,8 y 6,05 mm/día) son en los meses de diciembre y enero, coincidiendo con la temporada de mayor temperatura, mayor radiación solar, alta velocidad del viento y menor % de humedad.

4.4.2. Precipitación total y efectiva.

El requerimiento de agua de los cultivos depende del balance entre la precipitación y la evaporación. De la precipitación total, un porcentaje se pierde por escurrimiento, percolación profunda o evaporación. La precipitación efectiva, es aquella que puede almacenarse en la capa del suelo, donde puede ser aprovechable por las plantas para su desarrollo. Es decir, la precipitación efectiva es el agua que se infiltra en el suelo y permanece al alcance de las raíces de las plantas.

En la tabla 37 se detallan los valores de precipitación total y precipitación efectiva, obtenidos mediante el programa CROPWAT 8.0 de la FAO, usando el método de precipitación confiable (fórmula *FAO/AGLW*). Este, suele ser recomendado en aquellas zonas que cuentan con agua suficiente para riego, ya que suele arrojar valores de requerimiento de agua mayores a otros métodos, como por ejemplo el. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (USDA) que se aconseja para zonas de déficit hídrico (Adualem.S & Keneni.E, 2020).

Como se muestra en la tabla 37, la precipitación total por año es de 1145,9 mm, mientras que la efectiva es de 631 mm. En la figura 34, se puede observar que la mayor precipitación total y efectiva, corresponde al mes de marzo, mientras que la más baja se da en el mes de junio.

Tabla 37. Precipitación total y efectiva en mm-mes para la zona de estudio

Meses	Prec. Total mm	Prec. Efectiva mm
Enero	119	71,2
Febrero	117,6	70,1
Marzo	134,1	83,3
Abril	97	53,6
Mayo	73,6	34,9
Junio	62,6	27,6
Julio	66,3	29,8
Agosto	69,8	31,9
Septiembre	73,3	34,6
Octubre	119	71,2
Noviembre	108,6	62,9
Diciembre	105	60
Total	1145,9	631

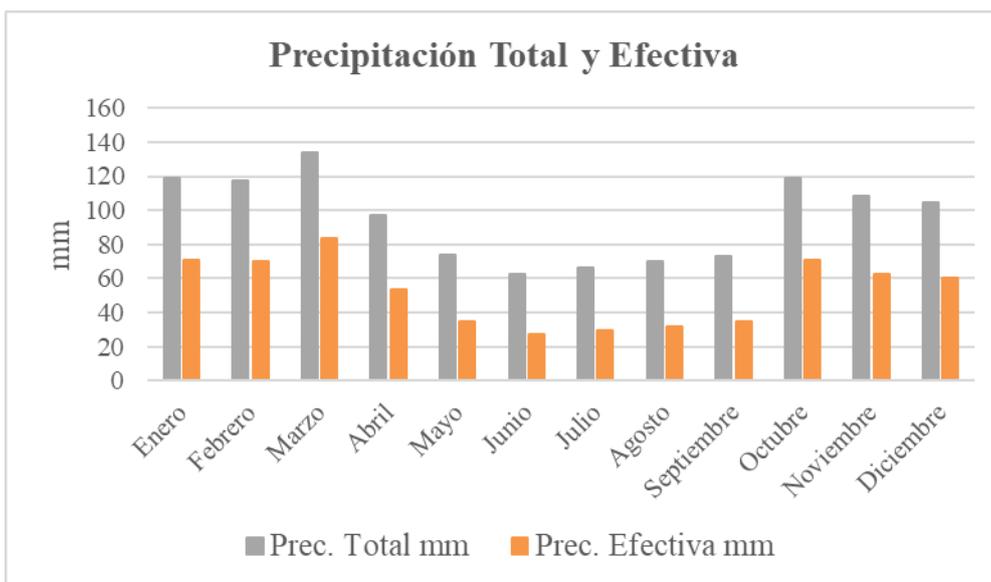


Figura 34. Precipitación total y efectiva mensual en mm

4.4.3. Evapotranspiración del cultivo de referencia ETc - determinación de Kc

Como ya se mencionó, ETc es la evapotranspiración del cultivo específico bajo condiciones estándar, cuando se encuentra exento de enfermedades, con una buena fertilización, que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones tanto del

suelo como del agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas existentes (FAO,2006).

Para el cálculo del ET_c se utiliza ET_o (calculada en el punto 4.4.1) y el coeficiente del cultivo (K_c).

$$ET_c = K_c \times ET_o.$$

Las diferencias en la anatomía de las hojas, las características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la de uno de referencia bajo las mismas condiciones climáticas.

Por su parte, se debe tener en cuenta, que existen variaciones en las características de un determinado cultivo durante los diferentes periodos de crecimiento, y es por esta razón, que los valores de K_c cambian desde la siembra hasta la cosecha.

En un principio, se trabajó con los K_c publicados en el cuadro 12 de la guía de FAO del año 2006 “*Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*”. Sin embargo, al avanzar con el cálculo, se encontró que el requerimiento de agua difería considerablemente del estimado por los profesionales que se dedican tanto al desarrollo de la semilla, como al cultivo de las especies analizadas en la zona de estudio.

Por este motivo, se investigaron otros K_c, y se decidió utilizar el valor medio general para céspedes de estación cálida, referenciados por Monje, R. J. (2006). A partir de este valor medio, se definieron los de inicio y fin de temporada (ver tabla 38), siguiendo la curva generalizada de K_c propuesta por FAO (figura 13). De esta manera, se estimaron

valores de demandas hídricas que representan de manera más precisa, el desarrollo de las especies en la zona de estudio.

Es importante mencionar que la guía de la FAO (2006), aclara que los valores de Kc indicados en las tablas son referenciales, dado que el comportamiento de una misma especie puede variar según la altitud y latitud en la que se encuentra. Por esta razón, la FAO recomienda que, en la medida de lo posible, se acuda a datos de Kc locales o de zonas geográficas similares.

En el caso de *Lolium multiflorum*, se analizaron valores de Kc propuestos por tres autores (ver tabla 38). Para un primer cálculo, se tomaron los de FAO, siendo estos, los mismos que toma Carrazón .J, (2007), y para un segundo, se usaron los sugeridos por Zagaceta, L.H., (2018). Aunque las diferencias entre los resultados no eran significativas, se decide hacer uso de los valores de Kc señalados por FAO y Carrazón. J, (2007), debido a que el valor de ETc en este último caso era mayor, lo que significa un aumento en la demanda de agua por parte del cultivo. Esta situación, se consideró como la más vulnerable para la zona de estudio, debido que se estaría aplicando una mayor cantidad de agua regenerada al sistema planta-suelo, y por lo tanto un posible mayor ingreso de contaminantes al medio.

Tabla 38. Coeficientes de Kc analizados para los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*.

Coeficiente Kc	Inicial	Medio	Final	Promedio
<i>Cynodon dactylon</i> FAO- tabla 12	0,55	1	0,85	0,8
<i>Cynodon dactylon</i> - Monje, R. J.	0,4	0,6	0,3	0,6
<i>Lolium multiflorum</i> - Carrazon. J -FAO tabla12	0,95	1,05	1	
<i>Lolium multiflorum</i> -Zagaceta,L.H.	0,9	1,05	1,06	

La tabla 39, recopila los datos de Kc y la duración de etapas de desarrollo, que fueron utilizados para correr el programa CROPWAT 8.0.

Tabla 39. Datos usados para calcular la Evapotranspiración del cultivo (ETc).

	Valores Kc inicial - desarrollo		Valores de Kc medio	Kc de final de temporada
<i>Cynodon dactylon</i>	0,40		0,60	0,30
<i>Lolium multiflorum</i>	0,95		1,05	1,06
Etapas en días	inicial	Desarrollo	Medio	Final
<i>Cynodon dactylon</i>	45	75	60	30
<i>Lolium multiflorum</i>	45	75	90	55

Como se mencionó en el punto 3.5, los datos referentes a la duración en días, de las etapas de desarrollo de cada uno de los cultivos, los cuales están relacionados con su propia fenología, fueron definidos mediante la consulta a ingenieros especialistas en el cultivo de las especies de gramíneas en Buenos Aires y la zona de estudio. De esta manera, se logró estimar con mayor precisión las etapas de desarrollo de los cultivos del área de investigación.

4.4.4. Información para calcular la evapotranspiración del cultivo ET_{caj}

En el punto 3.5 se mencionó que, para estimar el valor de ET_{caj} de los cultivos de la zona de estudio, se requiere definir previamente una serie de factores y datos referentes al cultivo y al suelo, los cuales se desarrollan a continuación.

4.4.4.1. Factores

El factor de agotamiento crítico (p), recomendado por FAO (2006) es de 0,60, sin embargo, se señala que cuando se cuenta con suelos arcillosos, el valor puede ser reducido entre un 5 y 10 %. Además, FAO menciona también, que se suele tomar el valor de 0,50 para diversos cultivos. Dicho lo anterior, y teniendo en cuenta que el suelo natural del

area de interés es franco arcilloso, se decide tomar el valor de 0,50 para las dos especies (*Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*).

Por su parte, el factor de respuesta al rendimiento (K_y), esta relacionado con la reducción de productividad debida al estrés hídrico por salinidad.

Dado que el impacto de la salinidad en el crecimiento y la productividad de las plantas, así como la evapotranspiración de los cultivos, es un proceso integrado en el tiempo, se utilizó un único valor de K_y correspondiente a toda la temporada. Como se explica en el punto 4.5, el valor de K_y usado para los dos cultivos es 1,1.

4.4.4.2. Datos del Suelo

Los datos referentes al tipo de suelo de la zona de estudio para calcular ET_{caj} , se estimaron mediante el programa *Soil Water Characteristics* de USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). La figura 35, muestra la composición estimada para un suelo arcillo limoso típico, el cual presenta un 34% de arcilla, 33% de arena y un 33% de limo.

A partir de las características del suelo, el programa estima los datos de interés para realizar el cálculo de ET_{caj} , como son la humedad disponible, la tasa máxima de infiltración de la precipitación y el agotamiento inicial de humedad. Estos datos se recopilan en la tabla 40.

Cabe resaltar, que el programa *Soil Water Characteristics* de *USDA*, permite trabajar con los porcentajes de arcilla y arena precisos de un determinado lugar cuando son conocidas.

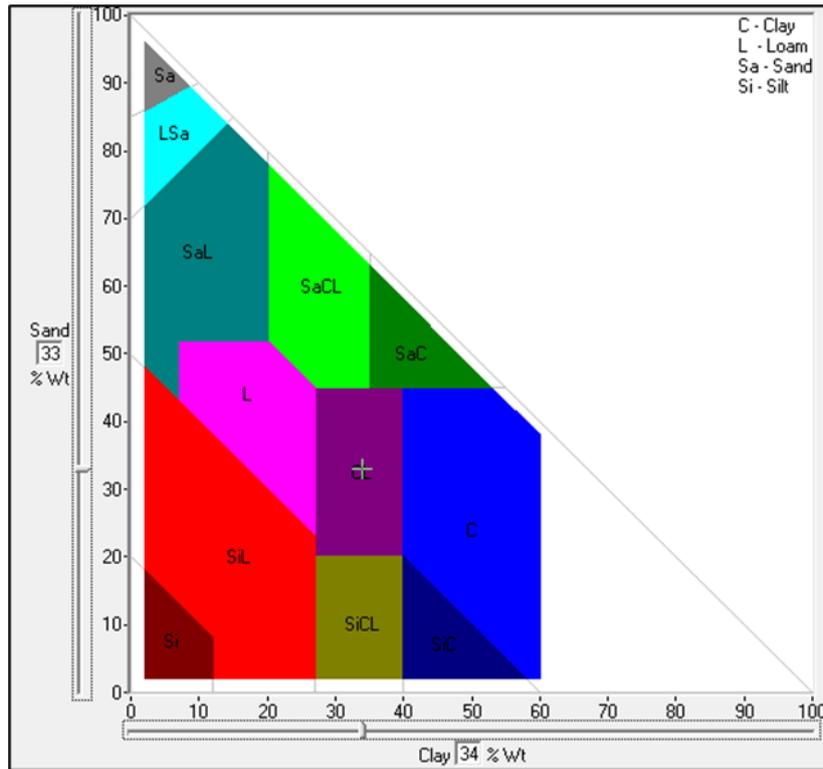


Figura 35. Suelo arcillo limoso. *Soil Water Characteristics (USDA)*.

Tabla 40. Datos correspondientes a un suelo arcillo limoso típico

Humedad de suelo disponible	140 mm/metro
Tasas máximas de infiltración De la precipitación	109 mm/día
Profundidad radicular máxima	30 cm
Agotamiento inicial de humedad de suelo (% ADT)	14%
Humedad de suelo inicialmente disponible	120.4 mm/m

4.5. Requerimiento de agua del cultivo - ET_{caj}

Una vez definidos los factores asociados al cultivo (agotamiento crítico y de rendimiento K_y), y los datos referentes al suelo de la zona de estudio (tabla 41), se calculó la evapotranspiración del cultivo ET_{caj} utilizando el programa CROPWAT 8.0.

Haciendo uso del valor de precipitación efectiva y ETcaj, se puede estimar el requerimiento de riego del cultivo mediante la siguiente ecuación.

$$\text{ETcaj} - \text{Precipitación efectiva} = \text{Req. Riego (mm/dec)}$$

4.5.1. *Cynodon dactylon*

Es de mencionar que, para correr el programa CROPWAT 8.0, se estableció como fecha de siembra del cultivo *Cynodon dactylon* el 22 de septiembre, y como fin de ciclo el 19 de abril, fecha en la cual, el cultivo entra en latencia dando lugar al desarrollo de *Lolium multiflorum*.

La Tabla 41, muestra el valor de ETcaj, la precipitación efectiva y el requerimiento de riego del cultivo para periodos de diez días (expresado comúnmente como decadía o decadiarios).

Para determinar el requerimiento de riego, se calculó la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ETcaj) y la precipitación para cada decadía. Los periodos en los que la precipitación efectiva resultó mayor que la evapotranspiración, el programa asumió un requerimiento de riego igual a cero mm.

La evapotranspiración total estimada para el cultivo desde septiembre hasta abril es de 491.2 mm/ha, siendo la precipitación efectiva 68.2 mm/ha para este mismo periodo. Por su parte, el requerimiento de riego estimado, considerando la suma de los periodos distintos de cero, es 87,9 mm/ha para todo el periodo del cultivo, por lo tanto, para las 130 ha de zonas verdes que pueden requerir riego para el mantenimiento de *Cynodon dactylon*, se necesitan 11.427 mm de agua.

En la figura 36, se gráfica la precipitación efectiva calculada para la zona de estudio, la evapotranspiración y el requerimiento de riego del cultivo, en mm por cada decada.

Mediante los resultados obtenidos, se estima que un cultivo de *Cynodon dactylon* en el área de estudio, requiere de riego a partir de mediados del mes de noviembre hasta finales del mes de febrero. Por el contrario, entre principios de marzo y mediados de noviembre, la precipitación efectiva podría llegar a suplir la demanda de agua por parte del cultivo, por lo que no necesitaría ser regado.

Tabla 41. Valores de ETcaj, y requerimiento de riego en mm/ década para *Cynodon dactylon*.

Mes	Década	Etapas	Kc coef	ETcaj mm/día	ETcaj mm/dec	Prec, Efec mm/dec	Req, Riego mm/dec
Sep	3	Inic	0,4	1,22	11,0	13,1	0,0
Oct	1	Inic	0,4	1,34	13,4	21,1	0,0
Oct	2	Inic	0,4	1,46	14,6	25,8	0,0
Oct	3	Inic	0,4	1,61	17,7	24,2	0,0
Nov	1	Des	0,4	1,78	17,8	21,8	0,0
Nov	2	Des	0,43	2,04	20,4	20,8	0,0
Nov	3	Des	0,45	2,32	23,2	20,5	2,7
Dic	1	Des	0,48	2,62	26,2	19,9	6,4
Dic	2	Des	0,51	2,94	29,4	19,3	10,1
Dic	3	Des	0,54	3,15	34,7	20,8	13,8
Ene	1	Des	0,56	3,4	34,0	22,9	11,1
Ene	2	Med	0,59	3,63	36,3	24,3	12,0
Ene	3	Med	0,6	3,48	38,3	24,0	14,3
Feb	1	Med	0,6	3,25	32,5	23,1	9,5
Feb	2	Med	0,6	3,07	30,7	22,7	8,0
Feb	3	Med	0,6	2,79	22,3	24,4	0,0
Mar	1	Med	0,6	2,52	25,2	27,6	0,0
Mar	2	Med	0,6	2,24	22,4	29,8	0,0
Mar	3	Fin	0,54	1,82	20,0	25,8	0,0
Abr	1	Fin	0,43	1,3	13,0	20,8	0,0
Abr	2	Fin	0,34	0,89	8,0	15,6	0,0
					491,2	468,2	87,9

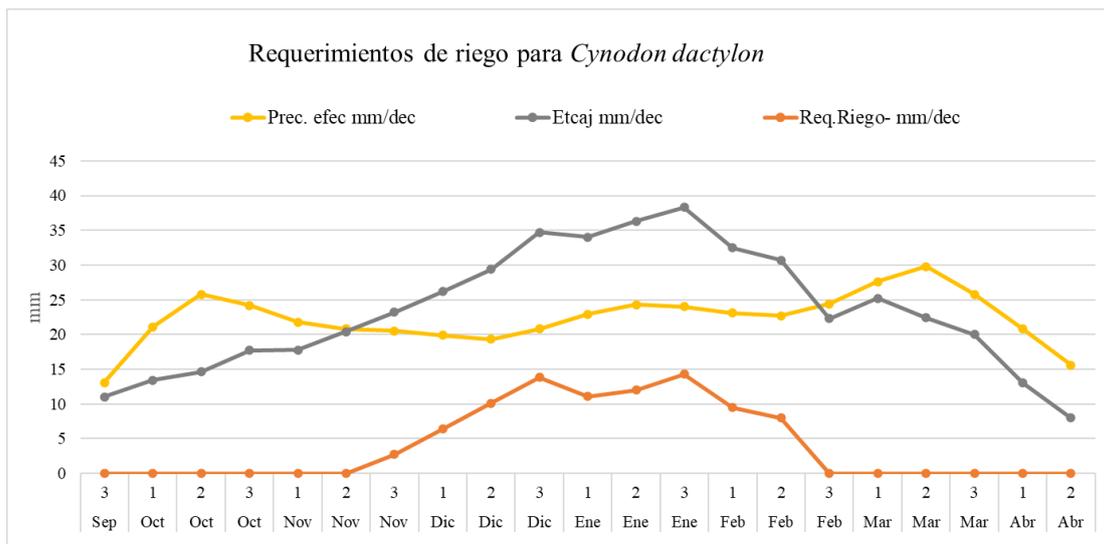


Figura 36. Requerimiento de riego de *Cynodon dactylon* para la zona de estudio.

4.5.2. *Lolium multiflorum*

En el caso de *Lolium multiflorum*, la fecha de siembra utilizada para correr el programa CROPWAT 8.0 fue 20 de marzo, y para final de temporada 9 de diciembre. La tabla 42 muestra los valores de ETcaj, y los requerimientos de riego del cultivo para cada decada.

El valor calculado de evapotranspiración total del cultivo es 710,5 mm/ha y la precipitación efectiva es 393,6 mm/ha. El requerimiento de riego estimado, para suplir la demanda de agua del cultivo es 317,9 mm/ha. Esto quiere decir, que para las 130 ha proyectadas como áreas verdes, se requerirá de 41 327mm de agua.

En el caso de *Lolium multiflorum* la demanda de riego es mayor que *Cynodon dactylon* ya que es una de las especies de césped de invierno con mayor requerimiento hídrico. En la tabla 42, se puede apreciar que esta especie necesita riego durante todas sus etapas de desarrollo, en menor medida durante el mes de junio y de julio (ver figura 37). Por el contrario, en el mes de noviembre y primeros días de diciembre su requerimiento

aumenta. A partir de esta última fecha hasta a los primeros días de marzo, las condiciones climáticas no son aptas para su desarrollo, dando lugar al crecimiento de *Cynodon dactylon* como única especie.

Tabla 42. Valores de ETcaj y requerimiento de riego en mm/ década para *Lolium multiflorum*

Mes	Decada	Etapa	Kc coef	ETcaj mm/día	ETcaj mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Mar	2,0	Inic	1,0	3,6	3,5	3,0	0,5
Mar	3,0	Inic	1,0	3,2	35,2	25,8	9,4
Abr	1,0	Inic	1,0	2,9	28,5	20,8	7,6
Abr	2,0	Inic	1,0	2,5	25,0	17,4	7,6
Abr	3,0	Inic	1,0	2,2	21,6	15,5	6,2
May	1,0	Des	1,0	1,8	18,4	13,4	5,0
May	2,0	Des	1,0	1,5	15,3	11,1	4,2
May	3,0	Des	1,0	1,4	15,1	10,5	4,6
Jun	1,0	Des	1,0	1,2	12,1	9,7	2,3
Jun	2,0	Des	1,0	1,0	10,4	8,8	1,6
Jun	3,0	Des	1,0	1,1	11,0	9,2	1,8
Jul	1,0	Des	1,0	1,2	11,5	9,7	1,9
Jul	2,0	Med	1,1	1,2	12,1	9,9	2,2
Jul	3,0	Med	1,1	1,5	16,4	10,2	6,3
Ago	1,0	Med	1,1	1,8	17,7	10,4	7,3
Ago	2,0	Med	1,1	2,0	20,4	10,6	9,8
Ago	3,0	Med	1,1	2,3	25,5	10,9	14,6
Sep	1,0	Med	1,1	2,6	26,0	10,2	15,8
Sep	2,0	Med	1,1	2,9	28,8	10,0	18,8
Sep	3,0	Med	1,1	3,2	32,0	14,6	17,4
Oct	1,0	Med	1,1	3,5	35,2	21,1	14,2
Oct	2,0	Fin	1,1	3,9	38,6	25,8	12,8
Oct	3,0	Fin	1,1	4,3	47,0	24,2	22,8
Nov	1,0	Fin	1,1	4,7	46,6	21,8	24,8
Nov	2,0	Fin	1,1	5,1	50,5	20,8	29,7
Nov	3,0	Fin	1,1	5,4	54,1	20,5	33,6
Dic	1,0	Fin	1,1	5,8	52,0	17,9	32,1
					710,5	393,6	317,9

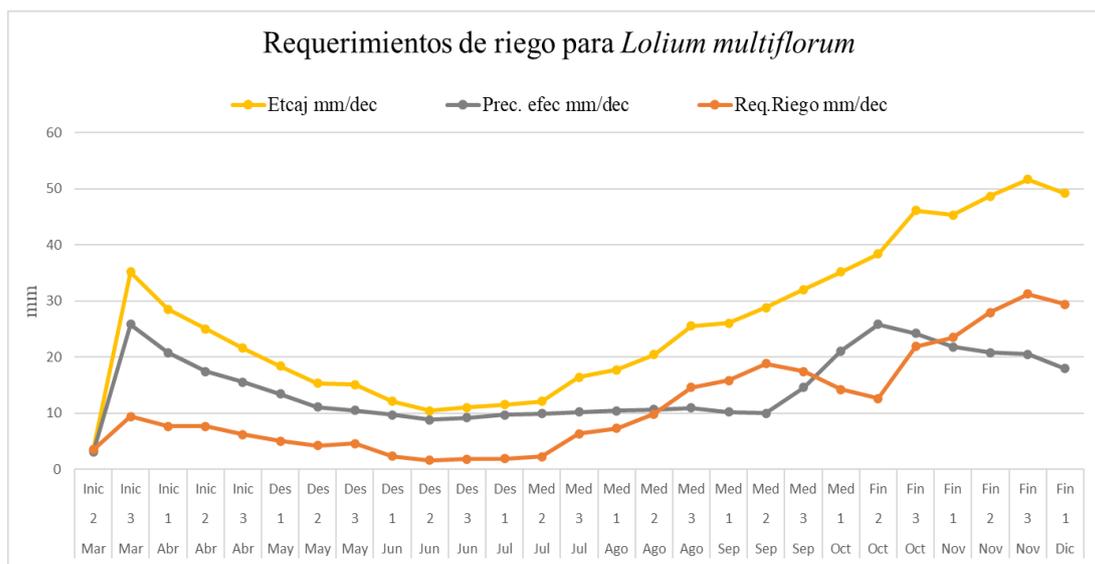


Figura 37. Requerimiento de riego de *Lolium multiflorum* para la zona de estudio

4.6. Requerimiento de agua de riego

4.6.1 Proporción de lixiviado utilizado en el agua de riego

Una vez calculados los requerimientos de agua para los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* para la zona de estudio, es necesario tener en cuenta los posibles efectos asociados al riego con lixiviado.

En el punto 4.3 se determinó que, debido al elevado tenor de salinidad y la relación RAS, el lixiviado tratado sin diluir no es viable para el riego de las especies analizadas en este trabajo.

Sin embargo, como ya se mencionó en el punto 3.5.1, cuando se prevé una excesiva acumulación de sales solubles en el suelo, es posible aplicar más agua de la que necesita el cultivo para sus propios requerimientos. Esta cantidad extra de agua mueve una porción de las sales por debajo de la zona de la raíz, mediante percolación profunda, en un fenómeno llamado lixiviación.

Como ya se mencionó anteriormente, para determinar la cantidad total de agua requerida, se calcula el factor *leaching factor* (LR).

Cabe mencionar que, el balance de sales en el tiempo debe ser tal, que la remoción de estas por lixiviación sea igual o mayor que la cantidad incorporada con el agua aplicada, de lo contrario, las sales se acumularán y eventualmente llegarán a concentraciones que hagan inviable el desarrollo del cultivo.

En la tabla 43, se detallan los valores de CE de una serie de diluciones con distintos porcentajes de lixiviado tratado y agua del acuífero Puelche. Los valores de CE para las muestras con 20, 50, 70 y 100% de lixiviado, fueron medidos en campo, mientras que los de las mezclas del 25%, 30% y 45% fueron estimados a partir de los primeros.

Con los resultados obtenidos, se calculó el LR para un potencial de rendimiento del cultivo por encima del 90%, siguiendo la metodología detallada en el punto 3.5.2. De esta manera, en los siguientes apartados se calcula el LR y la cantidad de agua requerida para riego (AW), considerando este rendimiento.

Tabla 43. Valores de CE de distintas soluciones en mS/cm.

% de Lixiviado	CE mS/cm		
	Valor máximo	Valores promedio	Valor calculado
20%	4,13	3,71	3,88
50%	9,21	8,77	7,90
70%	11,19	10,91	10,58
100%	15,08	14,67	14,60
25%			4,55
30%			5,22
45%			7,23

4.6.2. Leaching factor (LR) para el cultivo *Cynodon dactylon*

La tabla 44, muestra el resultado del cálculo de LR y los rendimientos de cultivo estimados mediante la tabla 26, para los valores de CE de la tabla 43.

Tabla 44. LR de *Cynodon dactylon*, según % de lixiviado tratado del agua regenerada.

LR potencial rendimiento	LR (E _{cw} máximo)	LR (E _{cw} promedio)	LR (E _{cw} calculado)	Potencial de rendimiento del cultivo
20% de lixiviado	0,14	0,12		100%
50% de lixiviado	0,14	0,13		50%
70% de lixiviado	0,11	0,1		0%
100% de lixiviado	0,15	0,15		0%
25% de lixiviado			0,15	100%
30% de lixiviado			0,14	90%
45% de lixiviado			0,15	75%

Las soluciones de lixiviado tratado del 100%, 70% y 50 %, fueron descartadas para los cálculos, ya que, el potencial de rendimiento del cultivo *Cynodon dactylon* sería del 0%, debido a la alta salinidad del agua regenerada.

Dicho lo anterior, se consideró una dilución entre el 20% o 25% de lixiviado, asegurando de esta manera, un potencial de rendimiento del cultivo del 100%.

Como puede verse, a medida que aumenta la proporción de lixiviado tratado, baja el potencial de rendimiento de cultivo, es así, como en el caso de una dilución del 30% de lixiviado tratado y 70 % de agua del acuífero Puelche, el potencial de rendimiento del cultivo baja a un 90%. Por su parte, para una dilución con partes iguales de lixiviado tratado y agua del acuífero Puelche, el potencial de rendimiento es de tan solo un 50 %.

En la tabla 45, se detalla la demanda de agua de riego (AW) del cultivo *Cynodon dactylon* con una dilución del 20% de lixiviado tratado. El cálculo se realizó por decada para todo el desarrollo del cultivo, siguiendo la metodología FAO.

Tal como se señaló en el punto 3.5.1, la demanda total de agua del cultivo (AW_{Total}), se calcula a partir de la evapotranspiración del cultivo (ET_{caj}) y el *leaching factor* (LR).

$$AW_T = \frac{ET_{caj}}{1 - LR}$$

Finalmente, si se quiere calcular la cantidad total de agua que debe aplicarse como riego (AW), tiene que considerarse la demanda total de agua (AW_T), menos el aporte de la precipitación efectiva

$$AW = AW_T - \text{Precipitación Efectiva}$$

En la tabla 46, se muestran los resultados para una dilución conformada por 25 % lixiviado tratado y 75% agua del acuífero Puelche, también con un potencial de rendimiento del 100%.

En el caso de ser de interés por algún lector, en el anexo A.9 y A.10 se presentan los resultados de AW con diluciones de lixiviado del 30 % y 45%, cuyos potenciales de rendimiento del cultivo son 90% y 75 % respectivamente.

Tabla 45. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo de *Cynodon dactylon* ¹

Lixiviado 20 % - potencial de rendimiento 100%				
Mes	AW _T mm/decadía ECw máximo	AW _T mm/decadía Ecw promedio	AW máximo	AW promedio
Sep	12,7	12,5	-0,4	-0,6
Sep	15,5	15,2	-5,6	-5,9
Sep	16,9	16,6	-8,9	-9,2
Oct	20,5	20,1	-3,7	-4,1
Oct	20,6	20,2	-1,2	-1,6
Oct	23,6	23,2	2,8	2,4
Nov	26,9	26,4	6,4	5,9
Nov	30,3	29,8	10,4	9,9
Nov	34	33,4	14,7	14,1
Dic	40,2	39,5	19,4	18,7
Dic	39,4	38,7	16,5	15,8
Dic	42	41,3	17,7	17
Ene	44,3	43,5	20,3	19,5
Ene	37,6	37	14,5	13,9
Ene	35,5	34,9	12,8	12,2
Feb	25,8	25,4	1,4	1
Feb	29,2	28,7	1,6	1,1
Feb	25,9	25,5	-3,9	-4,3
Mar	23,2	22,7	-2,6	-3,1
Mar	15,1	14,8	-5,7	-6
Mar	9,3	9,1	-6,3	-6,5
	568,6	558,4	138,6	131,3

¹ Cantidad de agua de riego (AW) en mm/decadía que debe ser aplicada para evitar acumulación de sales, regando con riego de una solución con 20% lixiviado tratado y 80% agua del acuífero.

Tabla 46. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo de *Cynodon dactylon* ¹

Lixiviado 25 % - potencial de rendimiento 100%		
Mes	AW _T mm/decadía ECw	AW
Sep	13,0	-0,1
Sep	15,8	-5,3
Sep	17,2	-8,6
Oct	20,9	-3,3
Oct	21,0	-0,8
Oct	24,1	3,3
Nov	27,4	6,9
Nov	30,9	11,0
Nov	34,7	15,4
Dic	40,9	20,1
Dic	40,1	17,2
Dic	42,8	18,5
Ene	45,2	21,2
Ene	38,3	15,2
Ene	36,2	13,5
Feb	26,3	1,9
Feb	29,7	2,1
Feb	26,4	-3,4
Mar	23,6	-2,2
Mar	15,3	-5,5
Mar	9,4	-6,2
		146,2

¹ Cantidad de agua de riego (AW) en mm/decadía que debe ser aplicada para evitar acumulación de sales, regando con riego de una solución con 25% lixiviado tratado y 75% agua del acuífero.

4.6.3. Cantidad total de agua requerida por el cultivo *Cynodon dactylon*

Como ya se mencionó anteriormente, el cálculo de requerimiento de agua del cultivo a través de la evapotranspiración (ET_{caj}), no es suficiente cuando se hace uso de fuentes que presentan un alto contenido de sales, algo que es común en las aguas regeneradas provenientes del lixiviado de un relleno sanitario de RSU. En estos casos,

debe considerarse aplicar una cantidad adicional de agua para mantener el balance de sales en la zona de la raíz.

La tabla 47, muestra la cantidad de agua requerida en la temporada que estaría activo el cultivo *Cynodon dactylon* para la zona de estudio. Dado que se espera tener un ciclo de cultivos por año, estos valores pueden ser considerados como cantidad anual de agua requerida para el cultivo en análisis.

La cantidad de agua total que debe ser usada (AW) para evitar un efecto negativo sobre el sistema planta – suelo, es de 180.700 m³ para las 130 ha contempladas. Por su parte, el valor promedio diario estimado, considerando los 90 días en los que se requiere riego (de los 210 días del ciclo total del cultivo), es de 2.007 m³/día de agua regenerada. Este cálculo se realizó considerando, una solución de 20% de lixiviado tratado para una superficie de 130 ha sembradas con *Cynodon dactylon*, y estimando un potencial de rendimiento del 100% para este cultivo.

Cabe aclarar que la elección de calcular AW, usando un agua regenerada compuesta por un 20% de lixiviado tratado, se debe principalmente a que la CE fue medida sobre esta dilución, y no estimada a través de los valores obtenidos en campo. Sin embargo, es importante mencionar que, según los cálculos, es factible hacer uso de una solución que contenga un 25% lixiviado tratado, logrando así alcanzar, al igual que en la dilución del 20%, un potencial de rendimiento del 100%.

Corroborar los valores de CE para la dilución 25 %, deberá abordarse en un estudio posterior.

Tabla 47. Resultados de requerimiento de agua del cultivo *Cynodon dactylon*.

Agua requerida por el cultivo (Etcaj)	491	mm/ha temporada ¹
	4.910	m ³ /temporada ²
	638.300	m ³ /130 ha temporada
Agua de precipitación efectiva	468	mm /ha temporada
	4.680	m ³ /ha- temporada
	608.400	m ³ /130 ha-temporada
AW _T : Agua total a aplicar a la planta (ETc _{aj})+ LR)	569	mm /ha temporada
	5.690	m ³ /ha- temporada
	739.700	m ³ /130 ha-temporada
AW: Agua regenerada que debe ser aplicada. (AW _T – Precipitación efectiva)	139	mm/ ha temporada
	1.390	m ³ /ha- temporada
	180.700	m ³ /130 ha temporada
Requerimiento de Agua regenerada³ (AW) por día - superficie total (130 ha)	2.007	m³/ día

¹Calculado según procedimiento de la FAO (2006).

²Temporada estimada: 210 días, periodo de riego 90 días.

² 1 mm = 10 m³/ha.

³ Agua regenerada: 20% lixiviado tratado 80% agua del acuífero Puelche para un potencial de rendimiento del 100%.

4.6.4. Leaching factor (LR) para el cultivo *Lolium multiflorum*

La tabla 48, muestra el LR calculado de *Lolium multiflorum* para los valores de CE de diferentes diluciones (presentados en la tabla 43), y el rendimiento de los cultivos estimados mediante la tabla 26. No se incluyen las diluciones de 50, 70 y 100% de lixiviado tratado, debido a que representan un potencial de rendimiento del 0% para esta especie.

Tabla 48. LR de *Lolium multiflorum*, según el % de lixiviado tratado del agua regenerada

	LR Ecw máximo	LR Ecw promedio	Calculado
20% de lixiviado - potencial 90%	0,14		
20% de lixiviado - potencial 100%		0,15	
25% de lixivado - potencial de 90%			0,15
30% de lixiviado - potencial 75%			0,13

A partir del LR y la evapotranspiración del cultivo (ET_{caj}) se estimó la demanda de agua total (AW_T) que requiere el cultivo de *Lolium multiflorum*. Luego, considerando la precipitación efectiva durante la temporada de desarrollo del cultivo, se determinó la demanda de riego (AW).

En la tabla 49 se presenta la demanda real de riego del cultivo (AW), calculada para un agua regenerada de 20% lixiviado tratado. Cabe mencionar que, en el caso del cultivo *Lolium multiflorum*, dependiendo de si se toman los valores máximos o promedio de CE medidos en campo, los potenciales de rendimiento varían entre 90% y 100% respectivamente.

En este caso, con el fin de ser conservadores, se decide calcular el requerimiento total de agua que necesita el cultivo, haciendo uso de los valores máximos medidos en campo. Es así, como se estima que con un agua regenerada compuesta por un 20% de lixiviado y el volumen restante agua del acuífero Puelche, el valor de AW es 428,8 mm/ha año para el cultivo de *Lolium multiflorum*, con un potencial de rendimiento 90%.

Tabla 49. Cantidad de agua de riego (AW) que debe ser aplicada al cultivo *Lolium multiflorum* ¹

Mes	AW ECw máximo POTENCIAL 90%	Lixiviado 20 %		
		AW Ecw promedio POTENCIAL 100%	AW máximos	AW promedio
Mar	4,1	4,1	1,1	1,1
Mar	40,8	41,5	15,0	15,7
Abr	33,0	33,6	12,2	12,8
Abr	28,9	29,5	11,5	12,1
Abr	25,0	25,5	9,5	10,0
May	21,3	21,7	7,9	8,3
May	17,7	18,1	6,6	7,0
May	17,5	17,8	7,0	7,3
Jun	14,0	14,3	4,3	4,6
Jun	12,0	12,3	3,2	3,5
Jun	12,7	13,0	3,5	3,8
Jul	13,3	13,6	3,6	3,9
Jul	14,0	14,3	4,1	4,4
Jul	19,0	19,4	8,8	9,2
Ago	20,5	20,9	10,1	10,5
Ago	23,6	24,1	13,0	13,5
Ago	29,5	30,1	18,6	19,2
Sep	30,1	30,7	19,9	20,5
Sep	33,3	34,0	23,3	24,0
Sep	37,0	37,8	22,4	23,2
Oct	40,8	41,5	19,7	20,4
Oct	44,7	45,6	18,9	19,8
Oct	54,4	55,5	30,2	31,3
Nov	54,0	55,0	32,2	33,2
Nov	58,5	59,6	37,7	38,8
Nov	62,6	63,9	42,1	43,4
Dic	60,2	61,4	42,3	43,5
			428,8	444,9

¹ Cantidad de agua de riego (AW) en mm/decadía que debe ser aplicada para evitar acumulación de sales, regando con riego de una solución con 20% lixiviado tratado y 80% agua del acuífero

4.6.5. Cantidad total de agua requerida por el cultivo *Lolium multiflourm*

La tabla 50 muestra la cantidad de agua requerida por el cultivo *Lolium multiflorum* para la zona de estudio. Al igual que *Cynodon dactylon*, se estima un ciclo

de cultivo por año, por lo tanto, se considera que los valores de cantidad de agua requerida corresponden a un periodo anual.

La cantidad agua total que debe ser usada (AW), para evitar un efecto negativo sobre el sistema planta – suelo, es en el caso de *Lolium multiflorum* 557.700 m³, para las 130 hectáreas contempladas. Es decir que, por día se estima un requerimiento promedio de 2.105 m³/día de agua regenerada (compuesta por un 20% lixiviado tratado), para una superficie de 130 ha, con un potencial de rendimiento del cultivo del 90%.

Tabla 50. Requerimiento de agua del cultivo *Lolium multiflorum*

Agua requerida por el cultivo (Etc _{aj})	710	mm /ha temporada ¹
	7.105	m ³ / ha temporada ²
	923.650	m ³ /130 ha temporada
Agua de precipitación efectiva	394	mm /ha temporada
	3.940	m ³ /ha- temporada
	512.200	m ³ /130 ha-temporada
AW _T : Agua total a aplicar a la planta (Etc _{aj}) + (LR)	823	mm/ha temporada
	8.226	m ³ / temporada
	1 069.380	m ³ /130 ha temporada
AW: Agua regenerada que debe ser aplicada para riego.	429	mm/ ha temporada
	4.290	m ³ / temporada
	557.700	m ³ /130 ha temporada
Requerimiento de Agua regenerada³ (AW) por día - superficie total (130 ha)	2.105	m³/ día

¹Calculado según procedimiento de la FAO (2006)
Temporada estimada: 265 días,

² 1 mm = 10 m³/ha

³ Agua regenerada: 20% lixiviado tratado 80% agua del acuífero Puelche para un potencial de rendimiento del 90%.

4.7. Requerimiento de agua de riego anual para la zona de estudio

Cynodon dactylon se cultiva desde el mes de septiembre a abril, sin embargo, solo se requiere hacer riegos con agua regenerada desde el tercer decada de noviembre hasta fin de marzo. El resto del periodo se satisface con el agua proveniente de las precipitaciones.

Por su parte, *Lolium multiflorum* se cultiva desde el segundo decada de marzo hasta el primer decada de diciembre, requiriendo riego durante todo este periodo.

Según el esquema de siembra propuesto en esta tesis, se requiere hacer riegos para una u otra especie, salvo en el tercer decada de noviembre en donde se riegan ambas, debido a que cultivo estaría expresado tanto por *Cynodon dactylon* como por *Lolium multiflorum*. Es decir, solo durante este periodo el riego debería corresponder al de la especie de mayor demanda, o al cultivo que se quiera tener en mejores condiciones.

A efectos prácticos, para estimar el requerimiento anual de agua regenerada (AW) para la zona de estudio, se decide sumar los requerimientos por temporada de ambas especies. Es así, como *Cynodon dactylon* requiere alrededor de 180,700 m³/temporada de agua regenerada, mientras que *Lolium multiflorum* 557.700 m³/temporada para el riego de 130 ha. Por lo tanto, se requiere aproximadamente 738.400 m³/año de agua regenerada para suplir la demanda de los cultivos, esperando un potencial de rendimiento de 90% para *Lolium multiflorum* y 100% en el caso de *Cynodon dactylon*.

A pesar de haber tenido acceso a una estimación del agua utilizada en el riego de áreas verdes de la zona de estudio (11.470 m³ año), es importante señalar que estos valores no son comparables con los resultados obtenidos en esta tesis, dado que el área regada actualmente, es inferior a la estimada como zonas verdes a futuro (130 hectáreas), ya que la totalidad de los módulos no se encuentran clausurados, y una parte de los que sí lo están, no se destinan a los fines paisajísticos proyectados. Además, tampoco fue posible obtener información confiable de la cantidad de agua utilizada hoy en día en el riego de zonas verdes, ya que no se cuenta con caudalímetros en los puntos de extracción al acuífero.

Es importante remarcar que, los cálculos estimados en el presente documento de tesis contemplan:

1. Uso de agua regenerada de un lixiviado tratado como fuente de agua de riego.
2. Cantidad de agua necesaria que evite que la planta entre en estrés hídrico.
3. 130 hectáreas de áreas verdes sembradas con *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*
4. Un potencial de rendimiento del cultivo del 100% para *Cynodon dactylon* y del 90% para *Lolium multiflorum*.
5. Barrido de sales del suelo con el fin de evitar acumulación cerca de la raíz de la planta, con el fin de no comprometer el desarrollo del cultivo.

Todas estas razones, pueden explicar las disparidades de los datos reportados con los calculados en el presente trabajo.

En relación con el sistema de riego, y a los aspectos relativos al concepto de barreras múltiples detallado anteriormente en el punto 3.4.2, el presenta trabajo de tesis contempló que el riego de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* se seguirá realizando, como hasta la fecha, mediante un sistema de aspersion. Corresponderá a trabajos posteriores analizar el tipo y programación de riego a lo largo de los meses de cada temporada.

Es menester resaltar que, para hacer un uso eficiente del recurso, se debe regar con el propósito de cubrir específicamente las necesidades de los cultivos, evitando además que se genere un exceso de agua regenerada que pueda percolar hacia las napas. A continuación, se desarrolla el análisis de este concepto en mayor detalle.

4.8. Evaluación del impacto a los acuíferos de la zona de estudio

De la evaluación de los perfiles de los “pares de pozos” agrupados Somero y Puelche, descritos en el punto 3.6, se logró verificar que existe un manto arcilloso continuo de entre 4 a 6 m de espesor, con algunos sectores que pueden llegar hasta los 8m, tanto en la terraza alta (por ejemplo, NS46-NP 47; arcilla entre 22 y 27 m de profundidad, espesor 5 m), como en la terraza baja (por ejemplo NS 88-Np87; arcilla entre 12 y 16 m de profundidad, espesor 4 m), con presencia de materiales arcillosos Post Pampeanos.

Esta correlación de un manto arcilloso de buen espesor y continuo, indica que el riesgo de afectación el acuífero Puelche por una eventual degradación del somero es muy bajo. Básicamente, el mayor riesgo de contaminación cruzada está en la potencial construcción defectuosa de algún pozo (por no aislar adecuadamente el espacio anular en los pozos al Puelche que atraviesan el acuitardo arcilloso). Esto se puede afirmar, debido que la aislación natural del sector ha sido verificada mediante la red de pozos seleccionados y evaluados en esta tesis.

En base a datos de CE a los que se tuvo acceso, se observó que el acuífero freático Pampeano presenta valores que van en el rango de 1,2 a 1,5 mS/cm. En el caso del Post Pampeano marino, las conductividades se encuentran entre los 2,3 a 2,7 mS/cm y el

Puelche, de 0,5 a 1 mS/cm. Estos datos denotan las distintas calidades de agua de los acuíferos presentes en el área de estudio.

Teniendo en cuenta los valores antes mencionados, se puede decir que el acuífero Freático Pampeano presenta una CE promedio de 1,3 mS/cm. Sin embargo, se encontró en un pozo somero de la terraza baja al Post Pampeano marino, una CE mayor (2,2 mS/cm). Con respecto a las muestras de agua del acuífero Puelche, en las áreas de terraza alta y media, la CE es de alrededor 1mS/cm. Por otro lado, los pozos de terraza baja de Post Pampeano marino con Puelche llegan a tener una CE de hasta 2,7mS/cm.

Esto denota, una mínima diferencia de calidades de aguas respecto de sus contenidos salinos entre el acuífero somero (freático/Pampeano) y el acuífero Puelche en el área de terrazas media y alta. Sin embargo, se evidencia un marcado incremento de salinidad en la terraza baja (origen marino) con conductividades cercanas a 2mS/cm, e incluso superiores en ambos acuíferos a orillas del río Reconquista.

La aplicación de agua regenerada compuesta por 100% lixiviado tratado (cuya CE promedio es de 14 mS/cm) para el riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, podría afectar la calidad del acuífero somero, en particular si se riega a una tasa mayor a la evapotranspiración del cultivo, debido a la infiltración que conlleva a la recarga de dicho acuífero.

Se debe resaltar que, la posible recarga al acuífero somero con el consecuente aumento de la CE (y salinidad) de sus aguas, aumentaría el riesgo de afectación del acuífero Puelche subyacente, aunque solo pueda suceder mediante un pozo de monitoreo mal construido. Por esta razón, la práctica evaluada y propuesta en este trabajo de tesis, de utilizar un agua regenerada compuesta por 20% lixiviado tratado, permitiría obtener

un líquido con una CE del orden de 3-4 mS/cm, por lo que el impacto al acuífero somero por una eventual infiltración sería despreciable.

Además, se debe tener en cuenta que, en caso de una eventual recarga al acuífero somero, la cantidad de agua regenerada infiltrada debería ser mínima, ya que el volumen aplicado, es producto del cálculo de demanda de agua de cada uno de los cultivos, más un lavado de sales que busca desplazarlas solamente de la zona de la raíz.

Por otro lado, gran parte de la superficie a regar corresponde a la cobertura final de los módulos *capping*, por lo que la mayor parte del agua regenerada percolaría dentro del mismo relleno, hasta alcanzar el fondo de celda impermeabilizado con geomembrana, bentonita y suelo. Una vez que el nivel del líquido (entre agua generada y lixiviado propio de los residuos mismos), alcanza un máximo de 30 cm dentro de la celda del módulo, es extraído y tratado como un lixiviado más en las plantas de tratamiento descritas en el punto 2.9. Este mismo proceso, sucede cuando entra agua de lluvia al módulo.

En cuanto al control de las aguas subterráneas, se aconseja que se realice haciendo uso de los 65 pozos tipo “*clusters*” (es decir, pares de pozos que van al acuífero Pampeano y al Puelche) que hacen parte de la red de monitoreo con la que cuenta el predio en la actualidad, y que evalúa la afectación de ambos acuíferos por parte de la actividad del relleno.

Por otro lado, la eventual descarga del acuífero somero al río Reconquista con salinidades algo más elevadas por el riego, no implica un cambio en la situación actual de este cuerpo de agua, ya que, al momento, el vuelco de lixiviado tratado es justamente a dicho río, sin dilución previa.

5. CONCLUSIONES

Para determinar si el lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3 del relleno sanitario de la zona de estudio, puede ser usado como agua regenerada para el riego de los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, fue necesario analizar cinco aspectos cruciales: el volumen y las características del lixiviado tratado, las normativas nacionales y los niveles guía internacionales de uso de aguas regeneradas para riego, las especies de cultivos a regar y su demanda hídrica en la zona de estudio, el sistema hidrogeológico del área de influencia y los requerimientos para protección de las personas que tengan contacto directo e indirecto con el agua regenerada.

A continuación, se muestran las conclusiones del análisis de los resultados obtenidos.

En primer lugar, es necesario mencionar que, según la información reportada, se utilizan aproximadamente 11.500 m³/año de agua del acuífero Puelche para el riego de áreas verdes dentro de la zona de estudio. Por otra parte, según los cálculos realizados en el presente trabajo de tesis, para cubrir la demanda hídrica de los cultivos (ET_{caj}) de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*, suponiendo que se rieguen las 130 ha proyectadas como espacios recreativos y paisajísticos del predio, es necesario aportar unos 12.015 m³/ha año. Teniendo en cuenta la ausencia de datos confiables sobre el volumen de agua que se extrae (debido a que no se cuenta con caudalímetros), y el número de hectárea regadas actualmente, se concluye que los resultados no son comparables entre sí.

Por su parte, se estima que unos 420.000 m³/año de lixiviado tratado son volcados al río Reconquista, por lo tanto, dicho volumen podría ser fuente de agua de riego de los

cultivos analizados. Sin embargo, del análisis del lixiviado tratado durante el periodo 2016 y 2017, se concluye que no es posible utilizarlo directamente como fuente de agua para el riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*. Para llegar a esta conclusión, se recopilaron las mediciones de los parámetros definidos por la Res 336/2003 del ADA, y se analizaron los valores obtenidos, en relación con la normativa nacional de referencia (Puerto Madryn y Mendoza), así como la de Australia y los niveles guía de la U.S.EPA y la FAO. Adicionalmente, se midieron parámetros asociados a la salinidad del líquido.

A pesar de lo dicho, el análisis de los resultados encontrados, indica que es factible hacer uso de un agua regenerada compuesta por una solución de 20 % de lixiviado tratado, y un 80 % de agua del acuífero Puelche. Cabe resaltar que este porcentaje de lixiviado (20%), está en el orden de lo señalado por Bowman, et al., (2002) como óptimo, con una CE menor o igual a 3,6 mS/cm. Este valor, coincide con el medido sobre la dilución propuesta en el presente trabajo de tesis (3 a 4 mS/cm).

El volumen estimado de agua regenerada para cubrir el requerimiento de los cultivos en la zona de estudio (AW), es de 738.400 m³/ año para las 130 ha contempladas. Es menester resaltar que, para llegar a este valor se tuvo en cuenta la demanda de agua de cada uno de los cultivos (ET_caj), un potencial de rendimiento del 100% para *Cynodon dactylon*, del 90% para *Lolium multiflorum*, la precipitación efectiva y un lavado de sales (LF), con el fin de evitar su acumulación en la zona de la raíz.

Mediante el uso de la solución propuesta de lixiviado tratado, y siguiendo las estimaciones de riego para cada uno de los cultivos, se logra cumplir con los estándares analizados de calidad de agua para este fin, sin que se vea afectado el buen desarrollo de los cultivos, ni los acuíferos de la zona de estudio.

Dicho lo anterior, se debe resaltar la importancia de controlar el agua regenerada de manera sistemática, con el fin de asegurar que parámetros como CE, pH, cloro libre, DQO y DBO, se encuentren dentro de los límites establecidos en el presente trabajo de tesis, con el fin de asegurar que su uso como agua de riego, no afecte los sistemas ambientales involucrados en la zona de estudio

En lo que respecta al nitrógeno y fósforo, las normativas y niveles guía no estipulan valores máximos. Esto se debe a que dichos nutrientes son importantes para el desarrollo de las plantas, y su requerimiento varía significativamente, dependiendo de la especie de cultivo y la zona a regar. A pesar de ello, los valores de nitrógeno medidos en el lixiviado tratado durante el periodo del 2016 y 2017, se encuentran por debajo de las concentraciones máximas estipuladas en los estudios de Bowman, et al., (2002) y Del Moro, et al., (2014), para no impactar de manera negativa los sistemas acuáticos naturales del área de interés.

Cabe señalar que, el lixiviado de un relleno sanitario, suele presentar variaciones en la concentración de nitrógeno a medida que envejece. Por esta razón, a pesar de que la demanda de nitrógeno por parte de las plantas suele ser alta, se debe controlar que no se produzcan pérdidas que afecten a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos del área de influencia. Por tal motivo, se recomienda hacer controles periódicos al agua regenerada propuesta, a la napa freática y los cuerpos de agua superficial del predio.

Es importante, además, medir nitrato en el agua regenerada, ya que no se cuenta con valores en el lixiviado tratado, al no ser requerido por la Res 336/2003 del ADA.

En lo que concierne al uso del agua regenerada cerca de las lagunas artificiales de las terrazas media y alta, se recomienda dejar una zona *buffer* alrededor de estas, evitando

así, potenciales ingresos de fósforo y de nitrógeno que puedan llegar a desencadenar procesos de eutrofización.

En el caso del boro, que puede resultar tóxico para las plantas, se evidenciaron algunos valores altos en el lixiviado tratado. Se recomienda realizar un estudio en el que se midan las concentraciones de este analito en el agua regenerada a usar, y se evalúe la tolerancia por parte de los cultivos en estudio.

Con respecto a los indicadores de contaminación bacteriológica, los resultados de coliformes fecales son bajos, debido a que el tratamiento de lixiviado cuenta con un sistema de ultra y nano filtración. Las muestras analizadas cumplen con los valores estipulados por la normativa de Mendoza y Puerto Madryn, así como con los niveles guía de Australia y FAO (≤ 1000 UFC/100 ml). En el caso de la U.S. EPA, el 90% de las mediciones cumple con el valor recomendado (≤ 200 UFC/100ml) para riego en áreas urbanas.

Pese a que los valores de coliformes fecales son aceptables para riego de zonas verdes, con el fin de minimizar el riesgo a la salud humana, se recomienda aplicar el concepto de barreras múltiples de la OMS. De esta manera, se deben realizar controles biológicos frecuentes a los puntos de acopio del agua regenerada, utilizar sistemas de micro aspersores en la medida de lo posible, dejar pasar un día entre el riego y el corte de césped (*die off*) y evitar la circulación de personal ajeno al equipo de mantenimiento de áreas verdes durante el riego. Es decir, el área regada debe ser manejada bajo el concepto de carácter restringido.

Por su parte, se considera que hacer uso del agua regenerada propuesta, no generaría un impacto negativo sobre las reservas hídricas subterráneas de la zona de

estudio, ya que, al haber estimado el volumen de agua a usar a partir de los requerimientos de los cultivos, no se espera un aporte excesivo de agua que pueda recargar al acuífero somero. Además, en caso de una eventual infiltración, la afectación sería prácticamente despreciable, debido a que la CE en los pozos de la terraza baja del Post Pampeano marino, que está en contacto con el acuífero Puelche (2.7 mS/cm), llega a valores cercanos al promedio de los del agua propuesta para riego (3 a 4 mS/cm).

Sumado a lo dicho, según los perfiles de los pozos analizados del área de estudio, existe un manto arcilloso continuo, de entre 4 a 6 m de espesor, entre el acuífero somero y el acuífero Puelche. Las características de este manto determinan que el riesgo de afectar el acuífero más profundo (Puelche), con el agua propuesta para riego, sea muy bajo.

Es importante tener en cuenta que el control de la calidad del agua del acuífero Pampeano y Puelche, puede realizarse mediante la red de pozos de monitoreo (65 pozos tipo “clusters”) con la que cuenta el predio en la actualidad, previniendo así una posible afectación, ya sea por parte de la actividad propia del relleno o por la propuesta planteada en el presente trabajo de tesis. Dicho esto, dentro de los parámetros a medir se aconseja sumar contaminantes prioritarios (fijados por U.S. EPA), con el fin de reducir riesgos de un impacto negativo sobre las aguas de estas reservas de agua.

Cabe resaltar que, gran parte de la superficie a regar corresponde a la cobertura vegetal superior de los módulos. Por lo tanto, la mayor parte del agua de riego utilizada en estos sectores percolaría dentro de las celdas sin entrar en contacto con el suelo ni los acuíferos subyacentes.

Finalmente, vale la pena remarcar que, usar lixiviado tratado como parte del agua de riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio, significaría

una reducción de unos 150.000 m³/año de agua extraída del acuífero Puelche, el cual tiene un papel esencial durante los periodos de déficit hídrico estacional y como abastecimiento de agua potable.

6. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

A continuación, se enumeran temáticas y mediciones que son consideradas de interés para que sean abordadas en futuros estudios.

- Corroborar en campo los valores de CE para una dilución de 25 % de lixiviado tratado.
- Medir nitrato en la fracción suelo y en aguas subterráneas.
- Realizar ensayos en campo, que busquen establecer el efecto que tiene el agua regenerada propuesta, sobre la estructura del suelo a largo plazo.
- Medir y correlacionar la concentración de boro en el agua regenerada con la tolerancia por parte de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*.
- Incorporar dentro de los análisis de monitoreo de calidad de agua de los acuíferos mediciones de contaminantes prioritarios recomendados por U.S. EPA.
- Estudiar el efecto de las precipitaciones en la concentración de sales y nutrientes en el suelo.
- Estudiar el posible efecto beneficioso del reciclado de nutrientes cuando se riega con lixiviado, compensando la necesidad de aplicar fertilizantes suplementarios.
- Analizar alternativas de métodos y programación de riego para cada uno de los cultivos.
- Establecer cuál es el mejor momento para aplicar el agua para lixiviación de sales en el suelo, con el fin de optimizar el recurso hídrico.

- Analizar alternativas de especies de cobertura, cuyo consumo total de agua sea menor a las usadas actualmente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abdulhussain A. , A., Guo , J., Liu Zhi , P., Pan Ying, Y., & Wisaam S., A.-R. (2009).
Review on Landfill Leachate Treatments. *American Journal of Applied Sciences*,
Pg. 672-684.
- Adualem.S, & Keneni.E . (2020). Impact of effective rainfall on net irrigation water
requirement:The case of Ethiopia. *Water Science* , 155'163.
- Agronomy note. (2019, 10). *Boron aplication for BermudaGrass*. Obtenido de
<https://agriculture.borax.com/USBorax/media/assets/agronomy-notes/boron-bermudagrass.pdf?ext=.pdf>
- Anuar, N. M., & Chan, C. M. (2020). Adsorption of Escherichia coli from landfill
leachate using Dredged marine soil as Geosorbent. *ELsevier*. Vol 31, Pg, 278-
281. Johor, Malaysia.
- Ardila, A., Alba, N., & Saldarriaga , J. (2013). Formulación de un índice global de calidad
de aguas residuales para riego. *4(3)*, 11-26. Recuperado Agosto 31, 2015,
Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4685760>
- Auge, M. (2006). Hidrogeología de la ciudad de Buenos Aires. *Serie Contribuciones
Técnica Ordenamiento Territorial N° 6*.
- Autoridad del Agua. (2003). *Resolucion N° 336*. Buenos Aires . Recuperado Septiembre
12, 2015, Obtenido de
<http://www.ada.gba.gov.ar/normativa/RESOLUCIONES/RESOL336-2003.pdf>
- B. Maheshwari, M.M. Rahman, & D. Hagare. (2016). *Balanced Urban
Development:Options and Strategies for Liveable Cities* (Vols. 72, DOI
10.1007/978-3-319-28112-4_17). Western Sydney: Water Science and
Technology Library.
- Bowman , M., Clune, T., & Sutton, B. (2002). Sustainable managment of landfill leachate
by irrigation. *Water, Air, and Soil Pollution*, *134*, 81-96.
- Braatz, S., & Kandiah, A. (1996). Utilización de aguas residuales urbanas para el riego
de árboles y bosques. *Unasyuva*(185), 47-56.
- Buenos Aires Ciudad.(s.f). Recuperado 04 08 2022, Obtenido de
<https://www.buenosaires.gob.ar/educacion/escuelas-verdes/el-recorrido-de-los-residuos>

- Carrazón , J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. FAO 2007 .
- CEAMSE. (s.f.). *Gestión integral de residuos sólidos urbanos/área de cobertura* . Recuperado 03 02, 2018, Obtenido de <http://www.ceamse.gov.ar/gestion-integral-de-residuos-solidos-urbanos/#>
- CEPAL. (2018). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Recuperado 05 17, 2018, Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/10/S1700334_es.pdf
- Consejo Hidrico Federal. (2003, Agosto 8). Principios Rectores de Política Hídrica de la Republica Argentina. Recuperado Noviembre 12, 2015, Obtenido de http://www.hidraulica.gob.ar/legales/principios_rectores_de_politica_hidrica.pdf
- DEC. (2004). Use of effluent by irrigation. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/81102353.pdf>
- Del Moro , G., Barca, E., Cassano , D., Di Iaconi, C., Mascolo G, & Brunetti , G. (2014). Landfill wall revegetation combined with leachate recirculation:a conveniente procedure for a managment of closed landfills. *Springer* .
- Deluchi, M., Kruse, E., Laurencena, P., Rojo, A., & Rodrigues, L. (2010). Características de la explotación de aguas subterráneas en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26618/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Departamento General de Irrigación- Mendoza Gobierno. (2016). *Aquabook*. Mendoza. Obtenido de http://aquabook.agua.gob.ar/364_0
- Doria, J. (2013). La reutilización de aguas residuales : Sistemas jurídicos comparados: Unión Europea, España y Argentina. *Revista de Derecho Ambiental*, 153-169.
- EMWASTEWATER. (s.f). *Lesson D1. Guidelines and Standards for Wastewater Reuse*. Recuperado Septiembre 15, 2019, Obtenido de https://cgi.tu-harburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/documents/lesson_d1.pdf
- Environment Protection and Heritage Council, the Natural Resource Management Ministerial Council and the Australian Health Ministers' Conference. (2006). *National guidelines for Water Recycling Managing Health and Enviromental Risk*. Sydney. Obtenido de <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#managing-health-and-environmental-risks-phase-1>
- European Comission. (2013). *A Water Blueprint for Europe*. Obtenido de http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/brochure_en.pdf

- European Commission. (2016). *EU-level instruments on water reuse. Final report to support the Commission's Impact Assessment*, Luxemburgo.
- FAO. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Natural Resources and Environment. Rome: FAO.
- FAO. (1994). *Water quality for agriculture*. Roma : FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 29 rev.1.
- FAO . (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma .
- FAO. (2015). *AQUASTAT-Informe Regional : América del Sur, Centroamérica y Caribe*. Roma,Italia.
- Godley, A., G. Alker, J. Hallet, R. Marshall, and D. Riddell-Black. (2005). Landfill leachate nutrient recovery by willow short rotation coppice: III. Soil water quality. *Arboricultural J.* 28:253–279.
- Hanseok Jeong , Hakkwan Kim , & Taeil Jang. (2016). Irrigation Water Quality Standards for Indirect Wastewater Reuse in Agriculture: A Contribution toward Sustainable Wastewater Reuse in South Korea. *MDPI-WATER*.
- Hernández Loyola, (2017). *Evaluación de un plan de reciclaje y tratamiento de aguas para la ciudad de Rancagua*. . Santiago de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/146290/Evaluaci%C3%B3n-de-un-plan-de-reciclaje-y-tratamiento-de-aguas-para-la-ciudad-de-Rancagua-.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- L. Alcalde-Sanz, & B. M. Gawlik. (2017). *Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge- Towards a water reuse regulatory instrument at EU level*. Luxembourg: EUR 28962 EN, Publications Office of the European Union.
- Lastra, G. L. (2007). *Problemática del Río de la Reconquista y sus consecuencias socio-ambientales*. Obtenido de <http://www.uflo.edu.ar/institucional/files/varios/volumen4/trabajo%207/Tesis%20GLL%20-%20con%20agradecimientos.pdf>
- MacDonald, N., Rediske, R., & Scull, B. (2008). *Landfill cover soil, soil solution, and vegetation response to municipal landfill leachate applications*. Journal of Environmental Quality, USA.

- Massoudinejad., M., Manshour, M., & Yazdanbakhsh, A. (2006). *Study on the reuse of Zamyad factory wastewater treatment plant effluent in irrigation*. Iranian journal of environmental health science and engineering (ijehse). Tehran ,Iran
- Monje, R. J. (2006). *Manejo de céspedes con bajo consumo de agua 2da edición*. (C. d. Junta de Andalucía, Ed.) Viceconsejería. Servicio de Publicaciones y Divulgación. .
- Naciones Unidas- Asamblea General. (2015). Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. Obtenido de <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/RES/70/1>
- NEW WATER. (2007). *New Water Reusing wastewater in the Murray ' Darling Basin* S.A.
- OMS (1989) *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en la agricultura y acuicultura*. España
- OMS (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater* (Vol. 2). Paris: *WHO Library*.
- Ordenanza 6301 (2006). Consejo Deliberante Puerto Madryn- Chubut. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Pescod, M. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture - FAO irrigation and drainage paper 47. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Riquelme , G. (2010). *Tratamiento de aguas residuales domesticas en la provincia de Buenos Aires*. Red de Macrouiversidades de America Latina y el Caribe. Buenos Aires- Argentina.
- Robertson, W.D., A.M. Murphy, and J.A. Cherry. (1995). Low-cost on-site treatment of landfill leachate using infiltration beds: Preliminary field trial. *Ground Water Monit. Rem.* 15:107–115.
- S Albarracín Franco , & M de Vian. (2009). *ASPIDOSPERMA QUEBRACHO BLANCO Y LOLIUM MULTIFLORUM: DOS ESPECIES CAPACES* (Vol. 13). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.
- Sartor , A., & Sifuentes , O. (2012). Propuesta de Ley Nacional para Reuso de Aguas Residuales. *edUTecNe- 18° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente*. Obtenido de http://www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/aidis_ley_reuso_aguas.pdf

- Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (s.f.). *Constitución de la Nación Argentina - Artículo 124 de la Constitución Nacional*. Recuperado Diciembre 7, 2015, Obtenido de <http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/consti/art124.htm>
- Simanata Threedeach, , Wilai Chiemchaisr, Toru Watanabe , Chart Chiemchaisri, Ryo Honda, & Kazuo Yamamoto. (2012). *Antibiotic resistance of Escherichia coli in leachates from municipal solid waste landfills: Comparison between semi-aerobic and anaerobic operations*. Tokio, Japon : Elsevier.
- Sniffen, K. D. (2017). *Use of Algae in a Landfill Leachate Treatment System*. Thesis Ph.D, *Environmental Engineering* . Recuperado 07 05, 2018, Obtenido de Drexel University Libraries: <https://idea.library.drexel.edu/islandora/object/idea%3A7556>
- Suzuki, Y., Ogoshi, M., Yamagata, H., Ozaki, M., & Asano, T. (2002). *Large-area and on-site water reuse in Japan*. Recuperado 06 06, 2018, Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.525.4898&rep=rep1&type=pdf>
- Takeuchi, H., & Tanaka, H. (2020). Water reuse and recycling in Japan — History, current situation, and future. *Keai Chinese Roots Global Impact*, 1-12. Obtenido de <https://committee.iso.org/files/live/sites/tc282/files/Resources/Water%20reuse%20and%20recycling%20in%20Japan-%20history%2C%20current%20situation%20and%20future%20perspectives.pdf>
- Torres Lozada, P., Barba- HO, L., Ojeda, C., Martinez , J., & Castaño, Y. (2014). *Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 17(1), Pg. 245–255. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n1.2014.960>.
- U.S. EPA. (1992). Manual Guidelines for water reuse. *U.S. Agency for International Development*. Obtenido de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004JK8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- U.S. EPA. (2004). *Guidelines for Water Reuse*. Obtenido de <http://www.ehproject.org/pdf/ehkm/water-reuse2004.pdf>
- U.S. EPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, D.C.: EPA/600/R-12/618. Recuperado 11 12, 2019, Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>

- UNESCO, UN-Water. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. . Paris: UNESCO.
- UNESCO. (S.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado 04 03, 2017. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Urbano López de Meneses (2013). El “Water Blueprint” y su influencia en la agricultura española. *vol. 16*, Pg 275-298.
- WWAP. (2006). *2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo- El agua, una responsabilidad compartida* . París: UNESCO.
- WWAP. (2014). *Agua y Energía. Resumen Ejecutivo. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hidricos en el mundo*. Recuperado Diciembre 12, 2015, Obtenido de
- WWAP . (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO. Recuperado Diciembre 12, 2015, Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>
- WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París.: UNESCO.
- Zagaceta, L. H. (2018). *Determinación de la huella hídrica para la producción de pastos en la microcuenca ganadera de la laguna de Pomacochas*. Tesis para optar al grado académico de Maestro en Ciencias en Producción Animal. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- Zurbriggen, A. (2016). *Caracterización microbiológica del lixiviado y lagunas de tratamiento del relleno sanitario de la ciudad de Santa Fe*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

ANEXOS

A.1. Clasificación de los cultivos regados con agua regenerada en Mendoza

RESOLUCIÓN 627/00 HTA, 647 HTA Y 715/00 HTA

Categoría A: cultivos regados con Efluentes con Tratamiento Primario, Abarca fundamentalmente cultivos industriales.

Cultivos no aptos para el consumo humano: Algodón, forestales y viveros.

- 1) Cultivos normalmente procesados mediante calor, secados o envasados con procesos de esterilización antes del consumo humano: frutas y verduras para conserva, semillas oleaginosas, oréganos y otras yerbas aromáticas desecadas, vid para vino, cereales.
- 2) Verduras y/o frutas, exclusivamente para enlatados u otros tratamientos que destruyan los agentes patógenos,
- 3) Cultivos forrajeros secados al sol y recolectados antes de ser consumidos por animales.
- 4) Riego de campos en zonas cercadas y sin acceso de público (viveros, bosques, zonas verdes etc.,).

Medidas Complementarias:

- 1) Los trabajadores rurales que tienen a cargo las labranzas, el riego y la cosecha deben utilizar guantes y calzados, preferentemente botas de goma.
- 2) Debe implementarse un sistema de alerta sobre el peligro de las aguas contaminadas acompañado de una campaña de educación sanitaria.

Categoría B: cultivos regados con efluentes con Tratamiento Secundario, Abarca fundamentalmente cultivos que producen frutas y verduras que se pelan o cocinan antes de ingerirse, o que están sujetos a un período de estacionamiento antes de consumo.

1) Cultivos de pastos y forrajes verdes, no permitiendo que las vacas lecheras pasten en estas tierras, mientras se encuentren humedecidas con el líquido cloacal.

2) Cultivos para consumo humano que no entren en contacto directo con las aguas residuales, no se arranquen del suelo, ni se rieguen por aspersión (árboles frutales, viñas, etc.). Se cuidará que las frutas caídas al suelo y las que toquen la tierra no sean utilizadas en el consumo humano.

3) Cultivos para consumo humano que normalmente se ingieren sólo después de ser cocinados. Estos pueden ser regados con líquido cloacal siempre que el mismo deje de ser aplicado al terreno o vegetales, por lo menos un (1) mes antes de la cosecha y/o consumo del producto (maíz, coliflor, berenjena, etc.). Cultivos para consumo humano cuya cáscara no se come (melones, sandias, pepinos, maní, etc.), tratando que el líquido cloacal no se ponga en contacto con el producto.

A.2. Clasificación de los cultivos regados con agua regenerada en Puerto

Madryn

ORDENANZA N° 6301/06

Tipo 1. Abarca fundamentalmente cultivos industriales y todos aquellos que se encuentren enmarcados en las siguientes categorías o pautas:

- 1) Cultivos no aptos para consumo humano, textiles, forestales y viveros forestales.
- 2) Cultivos procesados mediante calor, secados o envasado con procesos de esterilización, con tratamientos que destruye los patógenos, antes del consumo humano: frutos para conservas, semillas oleaginosas, hierbas aromáticas desecadas, vid para vinos y cereales.
- 3) Cultivos forrajeros secados al sol y recolectados antes de ser consumidos por animales.

Tipo 2. Abarca los cultivos que producen frutas y hortalizas que se pelan y/o cocinan antes de ingerirse o que están sujetos a un periodo de estacionamiento antes de su consumo y todos aquellos que se encuentren enmarcados en las siguientes pautas:

- 1) Cultivos de pastos forrajes verdes para pastaje directo, no permitiendo que el ganado pascie en estas tierras mientras se encuentren humedecidas con el agua regenerada.
- 2) Cultivos cuyas partes vegetales para ello consumo humano no entren en contacto directo con las aguas de reúso, con el suelo, ni se rieguen

por aspersión. Se cuidará que las hortalizas y/o frutas caídas al suelo sean utilizadas en el consumo humano.

Tipo 3. Abarca la siembra de césped, parques y jardines en zonas con acceso al público.

- 1) Riego de todo tipo de zonas verdes como campos de golf, parques, cementerios, etc.,).
- 2) Lavado de automóviles, veredas y calles, combate de incendios y otros usos industriales o n, con similar acceso o exposición al agua.

Tipo 4, Abarca cualquier producto que se consume crudo y que se cultiva en estrecho contacto con el agua regenerada, por ejemplo, achicoria, apio, berro, cebolla de verdeo, frutilla, hinojo, lechuga, perejil, pimiento, rabanito, repollo, radicheta, remolacha, zanahoria etc.

A pesar de que esta legislación solo admite el uso tipo 1 y 2, hace mención que, si se dispone de un mejoramiento progresivo de los parámetros de calidad del recurso destinado a los cultivos del tipo 3 y 4, se puede alcanzar niveles necesarios para la implementación, En caso en que el regante disponga de los recursos técnicos necesarios para alcanzar la calidad de agua requerida para estos últimos tipos 3 y 4, la autorización es otorgada por la Autoridad de Reúso.

A.3. Experiencias de reúso de lixiviado- Estados Unidos de Norte América

Michigan

A continuación, se muestra un extracto del trabajo de MacDonald N, et al.(2008), *“Landfill cover soil, soil solution, and vegetation response to municipal landfill leachate.*

Applications”. En este estudio, los autores analizaron desde el 2003 al 2007 el efecto que tienen el riego por aspersión de lixiviado no tratado en la cobertura vegetal de un relleno sanitario en Michigan.

Dicho estudio, fue realizado en un relleno sanitario de RSU que se encontraba operativo, en contraposición a un sistema experimental o de prueba, debido a que el objetivo era determinar los efectos del riego con lixiviado bajo condiciones *in situ* en la cobertura final del relleno, con el fin de evaluar el impacto a los aspectos fisicoquímicos del suelo, la respuesta de las plantas y la lixiviación de solutos. Dichas observaciones buscaron ayudar a gestionar la aplicación de lixiviados en el sitio de estudio.

La metodología del estudio consistió en sectorizar 3 parcelas de 20 m de diámetro con su respectivo control. Estas fueron regadas aproximadamente 1 vez por semana entre julio y noviembre, con una tasa de 2,14 cm por aplicación en el 2003. En el año 2004, 2005 y 2006, se realizaron controles de rotación de riego y las parcelas fueron regadas una vez cada 3 semanas entre junio y septiembre, con una tasa de 1.01 y 1.44 cm por aplicación.

Se observó que la química de los lixiviados varió significativamente a través del tiempo. Las concentraciones de Carbón Orgánico Total (COT), Cr, Cu, Pb y Zn fueron cada vez menores durante el período de estudio. El promedio anual del pH del lixiviado varió ligeramente alrededor de una media general de 8,03 (ver tabla 1), indicando que el relleno sanitario en estudio se encontraba en la fase metanogénica de la descomposición de los residuos (MacDonald N, et al., 2008).

Aunque las concentraciones de variaron ligeramente a través del tiempo, en el estudio de MacDonald.N, et al. (2008), permanecieron altas durante varios años, incluso

después del cierre de los módulos, como suele suceder en los lixiviados de rellenos sanitarios de RSU (MacDonald N, et al., 2008). Al igual que en otros lixiviados de rellenos sanitarios MacDonald.N, et al. (2008), concluyen que la mayor parte del NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl) es NH_4^+ (ver tabla 1A).

Por su parte, los metales del lixiviado del estudio mostraron bajas concentraciones, siendo esto típico en muchos lixiviados de rellenos sanitarios de RSU en fase de metanogénesis (MacDonald.N, et al., 2008).

El promedio de la CE del lixiviado aumentó ligeramente entre 2003 y 2005 (ver tabla 1A). Los autores de este estudio consideraron que el aumento se debe probablemente a la barrera que genera la cobertura del módulo, haciendo que la infiltración de la precipitación sea menor y, por lo tanto, así mismo, la dilución del lixiviado, encontrando concentraciones de CE más altas en el 2005.

Jones, et al., 2006 (MacDonald N, et al., 2008), llegaron a la conclusión, que la alta CE puede afectar negativamente a la vegetación o a las propiedades del suelo, si el lixiviado se aplica a tasas elevadas o durante largos períodos. Por ejemplo, Bowman, et al. (2002), observaron que la concentración de los lixiviados de los rellenos sanitarios que estuviesen entre 1,4 y 1,7 S/m, debían diluirse a una concentración $< 0,36$ S/m, para evitar daños a la vegetación y a los suelos durante las aplicaciones de lixiviado cerca de Sydney, Australia.

También se determinó que, si la CE del lixiviado continuaba aumentando con el tiempo, el lixiviado podía requerir de una dilución para evitar efectos adversos. Una alternativa mencionada es la de mantener las concentraciones de la solución del suelo a niveles seguros mediante el equilibrio de los riegos con lixiviado y los aportes de agua

provenientes de las precipitaciones (MacDonald.N, et al., (2008). Esto siempre y cuando la CE de los lixiviados se estabilice alrededor de 0,7 S/m.

Entre julio y noviembre de 2003, se aplicaron aproximadamente 32 cm de lixiviado a las parcelas de riego en el relleno sanitario del Condado de Ottawa, Michigan. Esta alta tasa de aplicación fue necesaria debido que se debía extraer lixiviado del módulo con el fin de prevenir la ruptura de la cubierta, pero al final del 2003, la CE del suelo había aumentado considerablemente en las parcelas de riego. Con el fin de reducir la potencial pérdidas por lixiviación de solutos en los subsiguientes años, MacDonald.N, et al., (2008), recomendaron programar las aplicaciones de lixiviados para que coincidieran con los periodos de mayor evapotranspiración (junio y septiembre).

También se recomendó reducir las tasas de aplicación de lixiviado, para mantener las conductividades de la solución del suelo a niveles que no inhibieran el crecimiento de las plantas (MacDonald.N & colaboradores,2008). Para evitar exceder la demanda media insatisfecha de evapotranspiración durante junio, julio y agosto, se realizaron aplicaciones totales del lixiviado que no excedieran de 2,4 cm por fecha de riego o un total de 9,6 cm en cualquier zona de la parcela durante una la temporada de irrigación.

Tabla 1A. Características químicas del lixiviado aplicado en el Relleno Sanitario Sección 12, T6N R13W, Condado de Ottawa, Michigan, 2003-2006.

Parámetro	2003	2004	2005	2006	Valor de P†
pH, log(H ⁺)	8,05 ab (0,17) ‡	8,13 a (0,15)	7,94 b (0,11)	8,00 ab (0,12)	0,018
CE, § mS/cm	5,6b (0,13)	6,4 ab (0,11)	7,2 a (0,11)	6,8 a (0,09)	0,002
NO ₃ -N, mg/l	3,4 (7,3)	2,6 (1,8)	3,3 (2,9)	3,5 (3,5)	0,985
NH ₄ -N, mg/l	296 ab (123)	322 ab (60)	386 a (131)	290 b (47)	0,039
NTK, § mg/l	ND¶	ND	357 (41)	359 (49)	0,92

Fuente: adaptado de MacDonald.N, et al., (2008).

† Probabilidad del ANOVA de una vía, que compara los efectos del año a menos que las concentraciones de los componentes del lixiviado estuvieran esporádicamente por debajo de los límites de detección.

Efectos significativos ($P < 0,05$) en cursiva.

Las medias anuales con diferentes letras difieren significativamente.

‡ Valores son la media y la desviación estándar de la muestra. n = 15 en 2003; n = 5 en 2004; n = 18 en 2005; n = 16 en 2006.

§ Conductividad eléctrica (CE), ortofosfato, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).

ND, no determinado; las muestras no fueron analizadas para NTK en 2003 y 2004.

Se encontró también, que un período de descanso de 3 semanas entre riegos sucesivos con lixiviado puede permitir tasas de aplicación más altas, sin embargo, esto no ha sido probado y requiere de estudios adicionales para determinar si es estas tasas más altas son sostenibles.

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas del suelo, se encontró que el pH no fue afectado significativamente por el riego con lixiviado. La condición ligeramente alcalina del lixiviado y los elevados niveles de deposición de Ca y Mg pueden explicar los ligeros aumentos de pH en las parcelas de regadío en el estudio de MacDonald.N, et al., (2008).

Cabe mencionar que, se han observado aumentos en el pH de 4,7 a 5,8UpH en suelos forestales tratados con lixiviado con un pH de 5,4UpH, llegando a la conclusión que el aumento del pH, representa un efecto benéfico sobre la fertilidad del suelo analizado (MacDonald.N, et al., 2008),

Con respecto a los nitratos (NO_3^-), se encontró que a pesar de que tenían una tendencia creciente en el suelo durante el periodo de riego, en cuanto llegaban las lluvias estas concentraciones bajaban., informaron efectos similares de corta duración, cuando

se intercalaban los periodos de riego con lixiviado durante el invierno, por lo tanto, la dilución resultante de los componentes del lixiviado, reducirían los impactos en la superficie receptora o las aguas subterráneas.

Por su parte, se observó que la CE de la solución del suelo y las concentraciones de NO_3^- en el 2006, no se acercan a los altos niveles observados en las parcelas de riego en los tres años anteriores. Esto se debe a la reducción de las tasas de aplicación de lixiviado, en conjunto con los efectos diluyentes de las altas precipitaciones en julio, septiembre y octubre.

Aunque las concentraciones medias de NO_3^- , se mantuvieron por encima de los criterios de agua potable en las parcelas de regadío, la solución del suelo mostró concentraciones de NH_4 por debajo de 0,3 mg/l en las parcelas en todos los años (ver tabla 2A). Bajas concentraciones de $\text{NH}_4\text{-N}$ en la solución del suelo son el resultado de un proceso de nitrificación, el cual también fue observado por Robertson et al., (1995), Bowman, et al., (2002), y Godley, et al., (2004b, 2005) en estudios de aplicación de lixiviado a suelos.

La eliminación efectiva del NH_4^- es una parte importante del tratamiento porque la toxicidad de los lixiviados está fuertemente relacionada con la concentración de NH_4^- N (Kjeldsen et al., 2002; Ward et al., 2002).

Tabla 2A. Efectos del riego en las concentraciones medias anuales ponderadas por volumen de la solución del suelo para NO_3^- y NH_4^+

Tratamiento	2003	2004	2005	2006
NO_3^- mg/l				
Control	1,1 (0,8) ¶	0,2 (0,05)	0,3 (0,1)	0,02 (0,02)
Riego	138,2 (35,5)	62,7 (61,1)	83,0 (51,7)	14,1 (3,2)
NH_4^+ mg/l				
Control	0,01 (0,01)	0,03 (0,01)	0,35 (0,16)	0,10 (0,03)
Riego	0,07 (0,06)	0,03 (0,02)	0,25 (0,17)	0,16 (0,04)

Fuente: MacDonald N, et al. (2008).

¶Los valores son la media y la desviación estándar de la muestra (n = 3 parcelas).

¶
La CE del suelo aumentó en la superficie de las parcelas irrigadas con lixiviado, comparativamente con parcelas de control. Sin embargo, la CE a 50 cm del suelo en las parcelas irrigadas disminuyeron significativamente en los años consecutivos al 2003, como resultado de la reducción de la cantidad de lixiviado aplicado a partir del 2004.

Los valores de CE se mantuvieron por debajo del umbral de 0,4 S/m lo que evita efectos adversos (MacDonald.N & colaboradores, 2008), pero la CE media de la solución del suelo superaron este valor en 2003 y se acercaron de nuevo en 2005. Estos datos demuestran la necesidad de control del suelo para gestionar la aplicación de lixiviados a tasas que no sean perjudiciales para la cubierta vegetal.

MacDonald.N, et al., (2008), argumentan que el aumento de la biomasa en las áreas regadas con lixiviado, sirvió como una medida eficaz de control de la erosión y ayudó a mantener la integridad de la cubierta del suelo. Sin embargo, las aplicaciones de lixiviado de alta CE pueden causar que la cubierta vegetal se deteriore, reduciendo su efectividad como parte del sistema de tratamiento (Hernández et al., 1999; Bowma,et al., 2002; Jones, Et al., 2006, Watzinger, et al., 2006).

Las altas tasas de aplicación de lixiviado en el 2003 (ver dentro de figura 1A, fig. 1a) proporcionaron mucha más agua que la que necesitan las plantas para transpirar (ver dentro de figura 1A, fig.1b). En cambio, las tasas más bajas de aplicación de lixiviados en 2004 y 2005, permitieron períodos normales de sequía estacional en los que la evapotranspiración real cayó por debajo de la potencial en parcelas de control e irrigadas. En las parcelas de control, el agua disponible en el suelo se redujo por evapotranspiración

más rápidamente que en parcelas irrigadas, y esto sucedió en todos los años (ver dentro de figura 1A, fig. 1c). Las pérdidas estimadas de lixiviación de agua de las parcelas de riego superaron a las de las parcelas de control en 2003 y 2006 (ver dentro de figura fig. 1d). Las elevadas pérdidas por lixiviación en 2003 fueron el resultado de las altas tasas de aplicación de lixiviado, mientras que las elevadas pérdidas por lixiviación en el 2006 se asociaron con abundantes lluvias en el verano y otoño (ver dentro de figura 1A, fig. 1a).

Mantener los suelos por debajo de la capacidad de campo durante los periodos de riego activo, es necesario para reducir al mínimo la escorrentía y las pérdidas inmediatas de soluto por lixiviación (MacDonald.N, et al., 2008).

Este estudio concluye que, es de gran importancia tener en cuenta a la hora de regar con lixiviado, analizar las variaciones que puede tener el suelo en cuanto a su capacidad de almacenaje de agua, la evapotranspiración de los cultivos, y la precipitación como parte indispensable de cualquier sistema de riego con lixiviado.

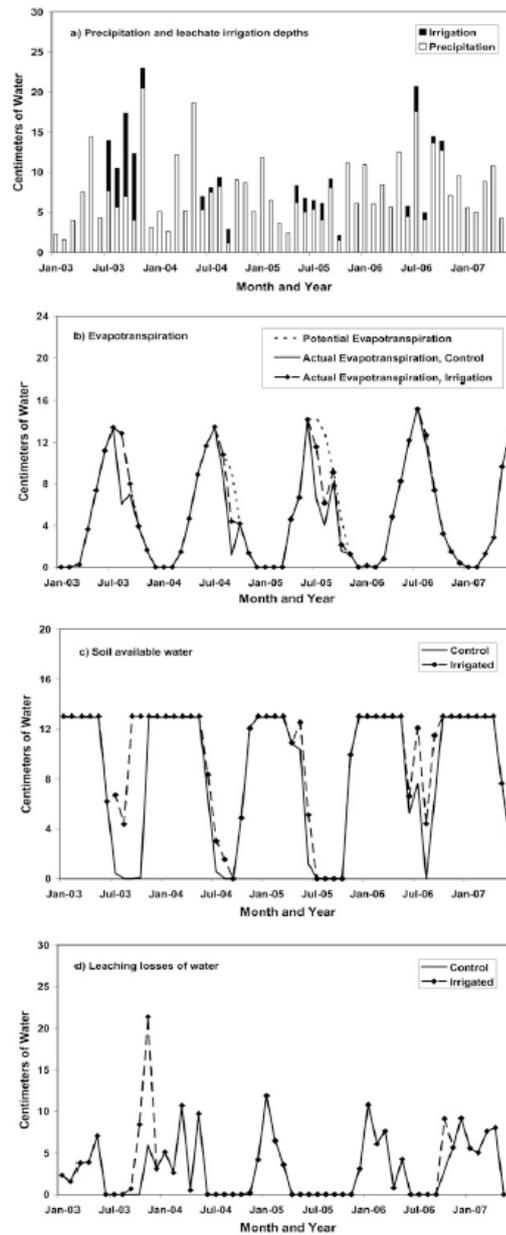


Figura 1A: (a) las profundidades de riego por precipitación y lixiviado. (b) la evapotranspiración, (c) el agua disponible en el suelo, y (d) las pérdidas de agua por lixiviación en las parcelas de control y de riego en el relleno sanitario del Condado de Ottawa, Michigan, desde enero del 2003 hasta junio de 2007. El agua disponible en el suelo y las pérdidas de agua por lixiviación, se calculan para los 50 cm superiores del suelo de la cubierta del módulo del relleno.

A.4. Experiencia de reúso de lixiviado en Australia

A continuación, se muestra un extracto del trabajo de Bowman, et al., 2002, “*Sustainable management of landfill leachate by irrigation*”, quienes estudiaron la aplicación de lixiviado como riego del *Capping* de los módulos del relleno durante dos años. Las especies predominantes de este relleno sanitario en Sydney son dos especies de gramíneas: *Cynodon dactylon* y *Pennisetum clandestinum*.

Dado que uno de los principales problemas asociados al uso de lixiviado, de un Relleno Sanitario de RSU, son las altas concentraciones de nitrógeno (NH_4), ya que presenta un riesgo de contaminación a los ambientes de agua dulce y marinos, el objetivo principal del estudio de Bowman, et al., (2002), consistió en identificar técnicas de manejo del lixiviado, que eviten pérdidas de nitrógeno mediante una biorremediación *in situ*, a través de la maximización del riego en el relleno Sanitario de Newington – Australia, además de un control de salinidad y sodicidad.

Bowman, et al., (2002), resaltan que los procesos de tratamiento para la eliminación del nitrógeno del lixiviado requieren una alta energía y costos económicos, (Bowman, et al., 2002). Por el contrario, el riego con lixiviados utilizando el sistema planta-suelo para manejar el exceso de nitrógeno y las sales disueltas, parece ofrecer una alternativa que sea rentable y de bajo costo energético (Bowman, et al., 2002).

Este estudio destaca que, contar con un sistema de irrigación del lixiviado como medio de biorremediación *in situ*, está limitado por la capacidad del sistema para depurar los contaminantes, en particular el nitrógeno. Si las condiciones del suelo y del estado del nitrógeno son favorables, se puede dar un proceso de desnitrificación que proporcione un importante sumidero de nitrógeno (en Bowman, et al., 2002).

Bowman, et al., (2002) consideraron que, aunque su objetivo principal al regar con lixiviado no tratado es promover la desnitrificación, destacan que hay variables que pueden presentar preocupaciones ambientales. La variación en la composición de los lixiviados, las propiedades físicas y químicas del suelo, las condiciones climáticas y la tolerancia de las especies vegetales, pueden afectar el volumen de lixiviado usado y la sostenibilidad del sistema (Bowman, et al.,2002). Es así, como el interés particular de este estudio, se centró en el efecto de la salinidad de los lixiviados y la sodicidad en el crecimiento y la supervivencia de las especies de césped Bermuda (*Cynodon dactylon*) y Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), además del efecto sobre las propiedades físicas del suelo regado.

Dado que los niveles de umbral de salinidad para Bermuda y Kikuyu son 6,9 y 3,0 mS/cm, respectivamente (Bowman, et al., (2002), y los niveles de salinidad para lixiviados de un relleno sanitario de RSU pueden llegar a superar los 15 mS/cm (Bowman, Clune & Sutton (2002), por lo tanto, el control de la salinidad y la sodicidad deben formar un componente integral de cualquier sistema de riego con lixiviado.

Como el estudio de Bowman, et al., (2002) nace de una serie de investigaciones iniciales de laboratorio que sugirieron que, con una gestión adecuada, el riego por lixiviación podría mantenerse en el tiempo. Posteriormente, un experimento de campo de dos años de duración fue incorporado, realizando riego con lixiviado subsuperficial de las zonas recreativas en el relleno sanitario de Newington, Homebush Bay, Sydney. Este sitio fue seleccionado porque estaba siendo convertido en un parque recreativo para las Olimpiadas de Sydney 2000, el cual genera lixiviados salinos ricos en nitrógeno. Un requisito de la Autoridad de Protección Ambiental local era que las emisiones de lixiviados del sitio no deben contener más de 10 mg/l de NO₃ y 0,1 mg/l de NH₄

(Bowman, et al., 2002), para minimizar la contaminación del adyacente río Parramatta. El ensayo de Bowman, et al, (2002) toma entonces las directrices de la Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC), como los principales criterios para determinar el éxito del ensayo experimental.

Utilizar los nutrientes disueltos en el lixiviado, para mejorar el crecimiento del césped en los espacios recreativos de la zona de estudio, proporcionaba para Bowman, et al., (2002) un recurso valioso. Un componente fundamental del riego con lixiviado es la gestión del nitrógeno para prevenir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

El objetivo principal del estudio de Bowman, et al., (2002) fue identificar las técnicas de gestión para prevenir la lixiviación de nitrógeno, mediante la promoción de la biorremediación *in situ*, mientras se optimiza el riego en el vertedero de Newington, para controlar la salinidad.

Para determinar la idoneidad de cada técnica de gestión, se adoptó un estricto monitoreo que buscaba desarrollar un programa de base agronómica, del protocolo de riego y monitoreo de lixiviado adecuado, que pueda ser utilizado también por los administradores del césped en otros rellenos sanitarios de RSU de la cuenca de Sydney.

El Relleno de Newington estaba situado en una sección recuperada de la costa del río Parramatta en la bahía de Homebush, a 10 km al oeste de Sydney (Australia). El suelo de relleno de la zona es de arcilla compactada y residuos de construcción (espesor 600 mm) y está cubierto por arcilla con suelo vegetal (espesor 200 mm). La capa superior de arcilla arenosa presenta un contenido de materia orgánica de 2,3%, mientras que la capa de arcilla del subsuelo parecía haber sido fuertemente compactada durante

la fase de establecimiento del sitio y contenía menos materia orgánica (1,1%), que la capa superior del suelo. Esta última, se estabilizó con césped, predominantemente Kikuyu y Bermuda.

Las condiciones climáticas (temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, suelo, temperatura, la lluvia y la radiación solar) fueron monitoreadas a intervalos de 0.25 hr y se identificaron varias tendencias importantes. Los datos de temperatura se encontraron altamente correlacionados ($R^2 = 0,97$) entre los dos años de funcionamiento. La media de la temperatura máxima fue 23,4 y 22,2 °C para 1998 y 1999 respectivamente, y la media de la temperatura mínima 14,2 y 13,8 °C para 1998 y 1999 respectivamente. Los datos sobre las precipitaciones se caracterizaron por períodos de precipitaciones de alta intensidad, típicamente dentro de los primeros seis meses del año (ver figura 1B). Sin embargo, se obtuvo una correlación razonable para los datos de precipitación ($R^2 = 0,63$) y de evapotranspiración ($R^2 = 0,68$) entre los dos años (ver figura 1B). La lluvia total durante el ensayo fue de 2830 mm y la evapotranspiración era equivalente a 1692 mm. Las pérdidas por evapotranspiración fueron más altas durante los meses de verano (diciembre a marzo).

Los tratamientos consistían en ciclos de riego para crear pulsos anaeróbicos dentro del sistema y mantener disponible agua del suelo (ASW%) en un 60 a 70% para promover la desnitrificación (Bowman, et al., 2002). Se realizaron cortes del césped con el fin de fomentar su crecimiento y se realizó pulverización con herbicidas selectivos para suprimir el crecimiento de malezas. Se aplicó una cantidad de lixiviado equivalente a 1.435 mm de lluvia durante el experimento y se utilizó agua de baja salinidad de la red de agua de la ciudad para regar la parcela de control (0% de lixiviado). La segunda y tercera parcela de tratamiento recibieron lixiviados diluidos a una concentración del

20 y 50% mediante la aplicación de agua de la ciudad, en pulsos a través del sistema de riego. El tratamiento de 20% se aplicó por pulsación de 2 volúmenes de lixiviados, seguidos de 3 volúmenes de agua de la ciudad.

En el caso del tratamiento de 50% se aplicó pulsando 1 volumen de lixiviados seguido de 1 volumen de agua de la ciudad. Por último, se aplicó lixiviado concentrado (lixiviado no diluido) a un cuarto tratamiento.

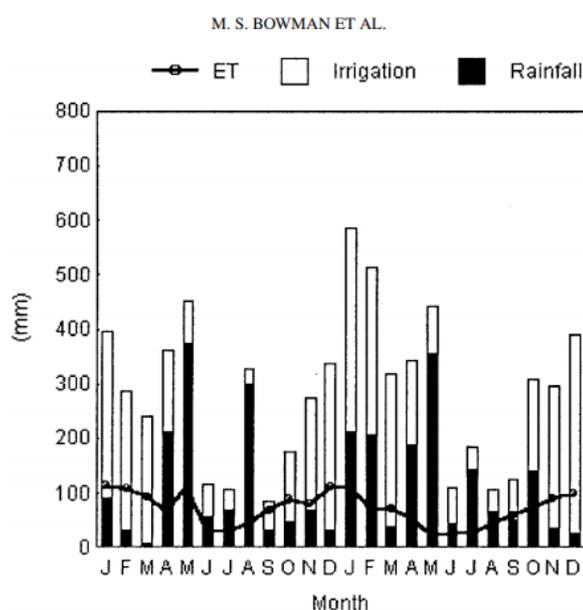


Figura 1B. Precipitación, Evapotranspiración (ET) de información de riego con lixiviado en mm

Los tratamientos se aplicaban por medio de goteo subterráneo lateral (Geoflow Rootguard™ 16 mm, 2 L/ hr,) colocado a intervalos de 1 m y a una profundidad de 150 mm (ver figura 2B). Una bomba eléctrica sumergible alimentada por energía solar. suministraba el lixiviado proveniente de un tanque al 20, 50% y 0% de lixiviado a través de filtros de lecho de arena. El riego fue aplicado como equivalentes de lluvia (mm), el cual fue programado por computadora y corregido según la humedad del suelo y

evapotranspiración para entregar un volumen preciso de solución (± 1 L) a cada parcela de tratamiento.



Figura 2B. Sistema de riego subterráneo Geoflow. tomado de <http://geoflow.com/wastewater/>

El lixiviado del relleno sanitario de Newington tenía una CE de 14-17 mS/cm y contenía 250-330 mg de NH_4/l , niveles de cloruro (6700-8000 mg Cl/l) y sodio (3000-4000 mg Na/l) (ver tabla 1B). por su parte, el agua de la ciudad contenía bajos niveles de sales, baja salinidad e insignificante NH_4 (ver tabla 1B). Dada la fácil disponibilidad de agua de la ciudad, la dilución del lixiviado se consideró una técnica y una gestión adecuada.

Los tratamientos de riego se desarrollaron usando la siguiente ecuación:

$$\text{CE}_{\text{TW}} (\text{mezcla}) = (\text{CE}_{\text{L}} \times \text{X}_{\text{L}}) + (\text{CE}_{\text{TW}} \times \text{X}_{\text{TW}})$$

Donde EC_{TW} (mezcla) es la CE del tratamiento de riego aplicado, CE_{L} y CE_{TW} son la CE de las aguas de riego y X_{L} y X_{TW} eran las fracciones de lixiviado y el agua de la ciudad utilizada (Bowman, et al.,2002)

Los tratamientos de riego tenían valores de salinidad de 0,2, 3,6, 9,1 y 17,6 mS/cm para el control, 20 y 50% y lixiviado no diluido respectivamente.

Tabla 1B. Valor de la media de parámetros medidos para agua de la ciudad y lixiviado sin dilución

parámetro	Unidad	Lixiviado	Agua de la ciudad
pH		6.8±1.2	6.90±0.4
CE	mS/cm	17.6±4.6	0.10±0.04
NH ₄	mg/l	285.0±31.8	0.05±0.01
Cl	mg/l	8172.0±563	15.00±2.2
Na	mg/l	4012.0±830	8.00±1.9
RAS ^a		33	1

^aRelación de adsorción de Sodio.

Bowman, et al., (2002), también utilizaron mediciones de la biomasa de brotes (mensuales) y la media de la distribución de las raíces (anualmente), para determinar la respuesta del césped al riego con lixiviado. Los núcleos del suelo fueron colectados mensualmente y analizados (extracto 1:5 suelo 2 M KCl) para amonio (NH₄), nitrato (NO₃⁺) y el nitrito (NO₂⁻) por el análisis de flujo colorimétrico ALPKEM.

Cl⁻, pH y EC del suelo fueron analizados usando extractos (1:5 suelo - agua). El estado de humedad del suelo fue monitoreado utilizando tensiómetros Soilspec (Electrónica H y TS), sondas de neutrones (CampbellPacific Nuclear) y el seguimiento gravimétrico de los núcleos de suelo. Los parámetros químicos de la solución del suelo fueron monitoreados usando muestreadores de taza de cerámica porosa (Coinda Ceramics, Melbourne, tamaño 7) instalado aproximadamente a 230 mm del emisor, a dos profundidades (300 y 600 mm) y se instalaron seis réplicas en cada una de las cuatro parcelas-

Las muestras de la solución fueron recogidas y analizadas directamente para NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , pH y CE. Los resultados fueron calculados en base al flujo ($\text{L}/\text{m}^2\text{día}$) y la concentración de los solutos que pasaba por el muestreador cada mes, y se usaron determinar N y Cl^- en cada parcela de tratamiento.

Para complementar los datos del muestreador convencional, se construyó un nuevo diseño con un conducto eléctrico de 40 mm, el cual lleva un accesorio de PVC de 3 vías (diámetro 25 mm) que fue utilizado para formar un brazo horizontal al que se fijó la copa de cerámica (ver figura 3B). El brazo vertical del accesorio de PVC, se selló con un tapón de presión (25 mm) para formar un depósito de la que se recogió la solución. El muestreador de taza de cerámica se colocó directamente debajo del emisor a una distancia de 300 mm. Se construyeron tres micro-lisímetros (ver figura 4B), en la zona de estudio, con el fin de coleccionar la solución del suelo de los núcleos de suelo confinados e intactos (diámetro 300 mm \times profundidad 600 mm) para determinar si los muestreadores de taza de cerámica sin confinar obtienen muestras representativas de la solución. El espacio entre la columna intacta y el cilindro de PVC se llenó entonces con gelatina de petróleo licuada caliente (50 °C) para rodear completamente los lados del monolito del suelo (Bowman, et al., 2002).

El riego fue programado mediante una computadora para lograr la misma dilución de lixiviado. El N de la solución fue monitoreado semanalmente. La eficiencia relativa de cada técnica de muestreo de solución se evaluó utilizando Cl^- en el lixiviado como trazador para vigilar el movimiento de la solución. Las diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las medias fueron determinadas por medio de un Análisis de Varianza (ANOVA).

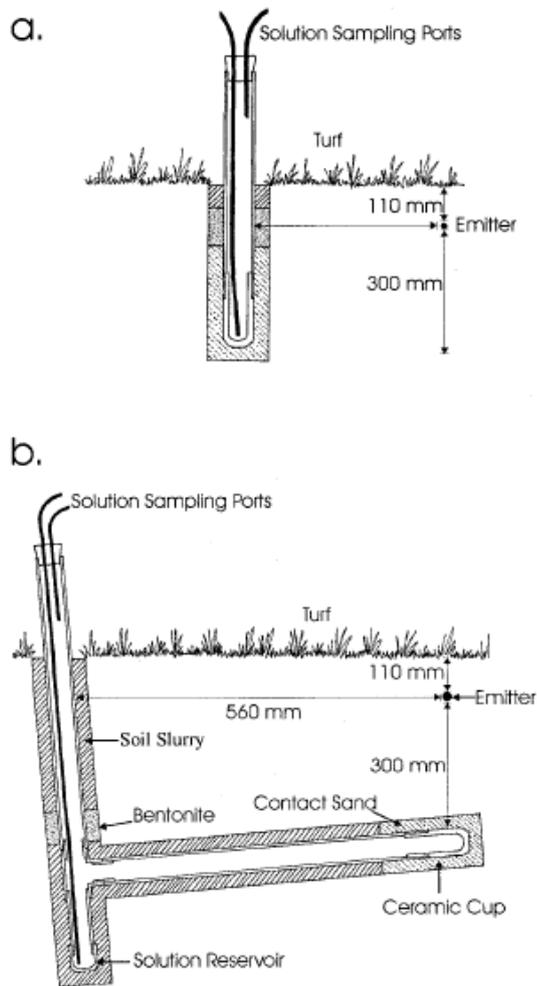


Figura 3B. Comparación de a) sistema de colector de muestras convencional y b) sistema modificado con un brazo que facilita la colecta de la solución

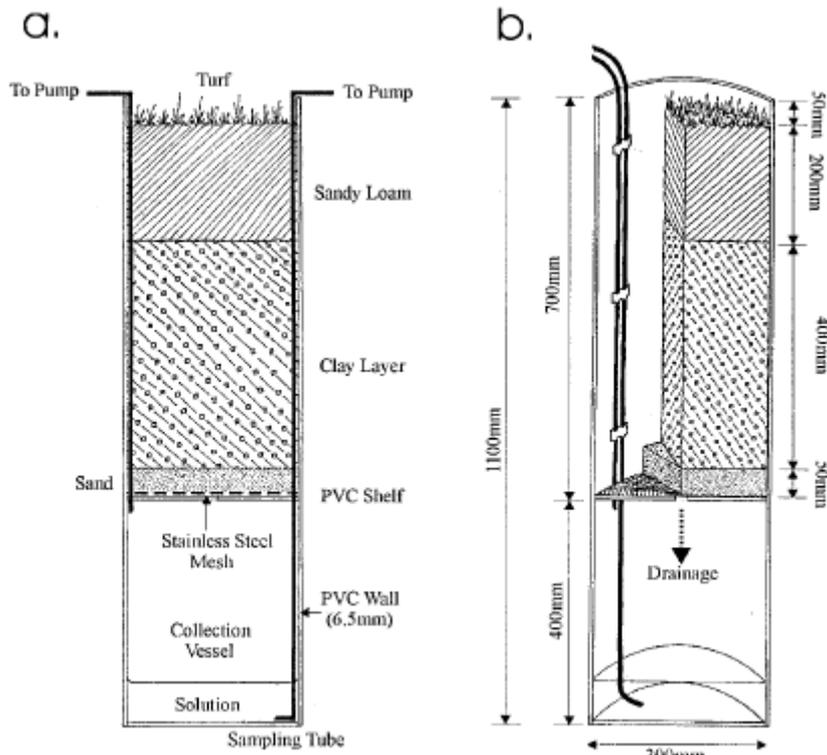


Figura 4B. Esquemas de diseño del micro lisímetro: a) sección transversal del muestreador de solución, la colocación del núcleo intacto y el soporte estructural, y b) vista de corte que destaca las dimensiones y el drenaje de la solución de la columna intacta. La solución se recogió aplicando vacío (-200 mm H₂O)

El protocolo de monitoreo adoptado en la zona de estudio permitió cuantificar con precisión la respuesta del suelo a los tratamientos con lixiviado. Los datos del trazador de Cl⁻ proporcionaron una indicación útil del rendimiento relativo y la capacidad descriptiva de cada suelo. La técnica de muestreo por medio de los micro-lisímetros, recuperaron más Cl⁻ que el aplicado con el riego (102,8, 101,7 y 102,3% para el 20%, 50% y 0%), lo que sugiere que se produjo cierta lixiviación de Cl⁻ preexistente en el suelo.

La tasa de recuperación de Cl⁻ del muestreador convencional en la parcela tratada con un 20% de lixiviado (79,9%) fue particularmente baja en comparación con los muestreadores modificados (95,3%) y los micro lisímetros (102,8%). Estos resultados sugieren que el diseño modificado del muestreador para hacer un seguimiento de la

química de la solución del suelo podría utilizarse con confianza para vigilar las pérdidas de N por lixiviación.

El muestreador modificado de solución de suelo describió con mayor eficacia el movimiento de Cl^- aplicado debido a que facilitó el muestreo continuo de la solución que pasaba por la copa entre los muestreos mensuales. En cambio, los convencionales proporcionaron un registro discontinuo de los cambios en la química de la solución porque el diseño sólo permite la recolección intermitente de muestras, limitando su capacidad de detectar fluctuaciones en la solución, que pueden estar asociadas a las altas precipitaciones o a los momentos de riego. Además, se instalaron muestreadores modificados directamente debajo de los emisores de riego, minimizando un potencial error asociado con el flujo preferencial. En comparación, los muestreadores convencionales se instalaron adyacentes al emisor, aumentando su susceptibilidad a flujo preferencial. Por consiguiente, el diseño modificado ofrece una mejor estimación de la química de la solución del suelo, en particular para la vigilancia del sistema riego subterráneo.

Los muestreadores modificados de solución indicaron que una dilución de lixiviado al 20% reducía más eficazmente el riesgo de lixiviación de nitrógeno que pueda llegar a parar al río Parramatta, el cual se encuentra cerca de la zona de estudio (ver figura 5B). en octubre de 1999 los valores de NO_3^- se acercan a los estipulados por las directrices ambientales de 10 mg/l de NO_3^- (o 3,5 kg de NO_3^- / ha mes) (Bowman et al., 2002). Las pérdidas de nitrógeno en el tratamiento al 20% (106 kg N/ha año) fueron similares a las pérdidas en la solución del suelo de las parcelas de control (80 kg/ha año). Por el contrario, las pérdidas de nitrógeno por lixiviación fueron significativamente mayores ($P \leq 0,05$) en

el tratamiento al 50% (359 kg/ha año) y en el lixiviado no diluido (624 kg/ ha año) que en el control (ver tabla 2B).

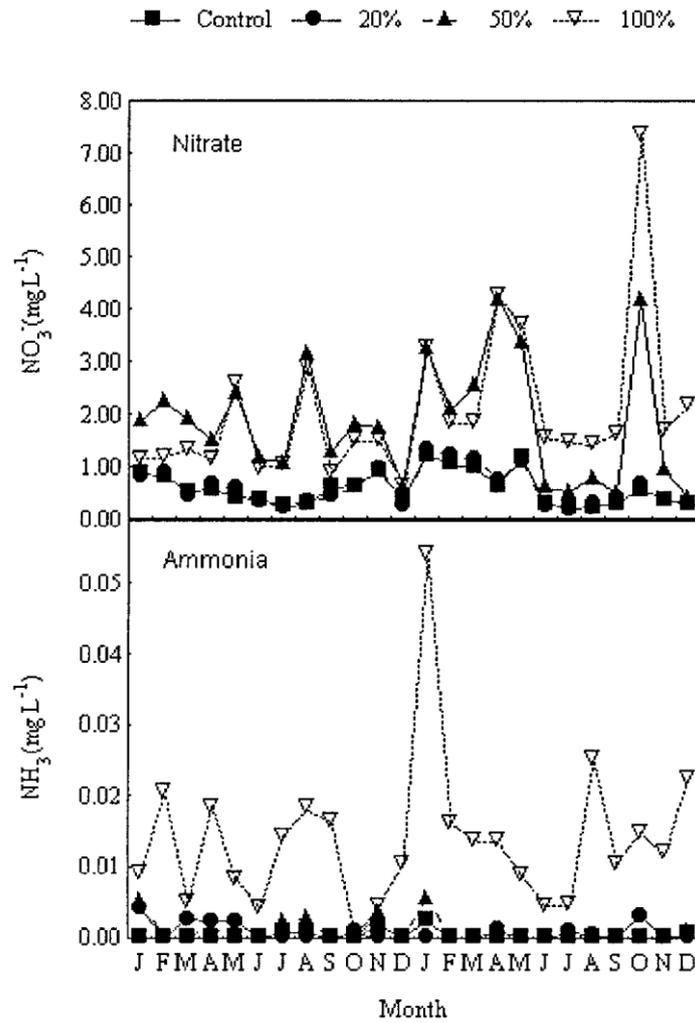


Figura 5B. Lixiviación de Nitrato (mg NO_3/l) y amoníaco (mg NH_3/l) producto del riego en las parcelas regadas con lixiviado. Los datos presentados son la media de muestras triplicadas

Tabla2B. Repartición de pérdidas de nitrógeno aplicado (kg/ ha) en la zona de estudio de Newington entre 1998 y 1999

	Perdidas de nitrógeno	Control	20%	50%	No diluido
1998	Aplicado ^a	121	1216	3337	6082
	Lixiviado ^b	82 (68)	97 (8)	331 (10)	446 (7)
	Inmovilización	24 (20)	559 (49)	1401 (42)	2099 (35)
	Captación- césped	10 (8)	37 (3)	171 (5)	221 (4)
	Pérdida gaseosa ^c	5 (4)	523 (43)	1434 (43)	3316 (55)
1999	Aplicado ^a	139	1431 ^d	3576 ^d	7156 ^d
	Lixiviado ^b	78 (56)	115 (8)	386 (11)	781(11)
	Inmovilización	30 (22)	386 (27) ^d	866 (24) ^d	1973 (28)
	capitación- césped	19 (14)	57 (4)	173 (5)	292 (4)
	Pérdida gaseosa ^c	12 (9)	873 (61) ^d	2151(60) ^d	4110 (57) ^d
media	Aplicado ^a	130	1324	3457	6619
	Lixiviado ^b	80 (62)	106 (8)	359 (10)	624 (9)
	Inmovilización	27 (21)	473 (36)	1134 (33)	2036 (31)
	capitación- césped	5 (11)	47 (4)	172 (5)	257 (4)
	Pérdida gaseosa ^c	9 (7)	698 (53)	1793 (52)	3713 (56)

Los números entre paréntesis son porcentajes (%) del N aplicado.

* Los datos son la media de las muestras triplicadas.

^a Incluye la mineralización de N (kg ha-1).

^b Comprende el nitrógeno mineralizado (NO₃- NH₄⁺, y NH₃) perdido debajo de la zona de la raíz (600 mm).

^c Derivado de los cálculos de balance de masa y asumiendo que las pérdidas se deben a la desnitrificación y la volatilización.

^d Significativo en P ≤ 0,05 para la comparación anual de N.

Aunque el tratamiento al 50% registro valores significativamente ($P \leq 0.05$) mayores de lixiviación, en relación con el tratamiento del 20%, las tasas medidas fueron generalmente <0.01 mg/l NH₃ y <5 mg/l NO₃⁻, o la mitad las directrices medioambientales (Bowman et al., 2002). La lixiviación excesiva en el tratamiento de lixiviado sin diluir (>7 mg/l NO₃⁻ y >0,01 mg/l de NH₃) fue asociado con el fallo del equipo, lo que indica que la fiabilidad del sistema de control es un componente importante en cualquier sistema de riego con de lixiviado.

Las tasas de penetración de nitrógeno en el suelo de la base de las columnas de los micro- lisímetros (profundidad de 600 mm) eran comparables a las muestras obtenidas con la copa de cerámica modificada diseño (figura 6B). Las tasas de lixiviación de nitrógeno en las columnas confinadas también estaban por debajo del límite guía de 10 mg/l de NO_3^- y 0,01 mg/l de NH_3 ((Bowman, et al.,2002) y no fueron significativamente diferentes ($P \geq 0.05$) para el tratamiento del 20% de lixiviado tratado, Esto validó la suposición de que las pérdidas de nitrógeno no eran atribuibles al error de muestreo causado por la variabilidad del suelo. El sistema cerrado proporcionado por los micro- lisímetros proporcionó una medida inequívoca sobre la influencia del suelo en la composición de la solución de lixiviación y confirmó que la lixiviación sólo representaba una pequeña proporción del nitrógeno añadido.

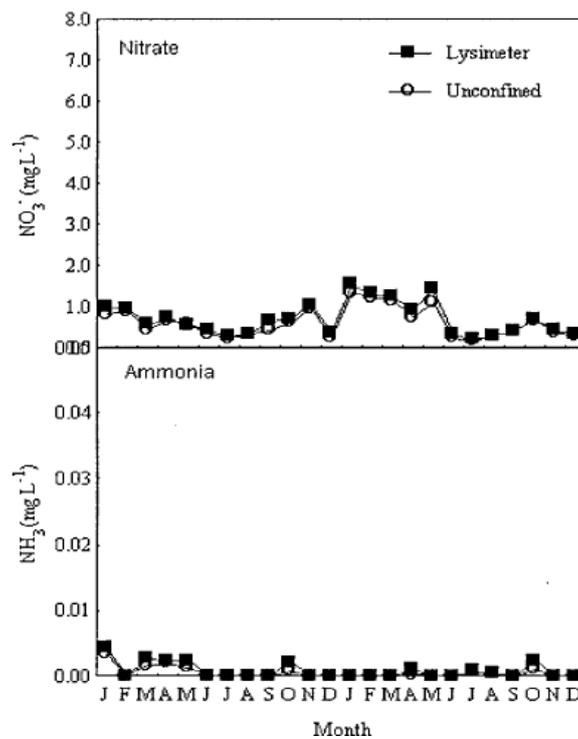


Figura 6B. Comparación de los datos de lixiviación de nitrato (NO_3^-) y amoníaco (NH_3) de los micro lisímetros y las parcelas regadas con lixiviado en dilución al 20%. Los datos presentados son la media de muestras triplicadas.

La pérdida gaseosa de nitrógeno, calculada a partir de las ecuaciones de balance de masa, se ha asociado predominantemente a la desnitrificación con pequeñas contribuciones asumidas por la volatilización. Es importante destacar que la desnitrificación se estimó como el principal sumidero de NH_4^+ aplicado, y representa alrededor del 54% en las parcelas tratadas con lixiviado sin diluir, del 20% y 50% de dilución (ver tabla 2B). La media de NH_4^+ aplicado en la parcela tratada con lixiviado sin diluir fue equivalente a 6619 kg/ ha año, con la mayor proporción de pérdidas atribuibles a la desnitrificación (3713 kg/ ha año). Del mismo modo, una gran proporción del nitrógeno aplicado se perdió por desnitrificación en el tratamiento del 20% (698 kg/ ha año) y del 50% (1793 kg/ ha año) en las parcelas tratadas. Las altas tasas de N aplicado que pasaron por un proceso de desnitrificación (en todos los tratamientos) sugieren que los regímenes de gestión del agua del suelo adoptados fueron exitosos. (Bowman, et al., 2002), afirman que estas tasas son consistentes con las tasas de Pratt & Adriano (1973) quienes informaron pérdidas después de aplicaciones de fertilizantes de N del 53% en un suelo arcilloso y Lund (1979) quien informó de pérdidas de N gaseoso del 45 al 60% del nitrógeno aplicado en una serie de cultivos (Bowman, et al., 2002).

La inmovilización, o la incorporación de nitrógeno en la matriz del suelo, fue la segunda mayor forma de reducción de nitrógeno aplicado y equivalía a una media total de 34% (ver tabla 2). Las cantidades totales de nitrógeno inmovilizado durante 1998 fueron 559 kg de N/ha, 1401 kg de nitrógeno /ha y 2099 kg nitrógeno /ha, para las parcelas tratadas con lixiviados al 20%, 50% y sin diluir respectivamente. Por el contrario, durante

el segundo año de operación, el nitrógeno total inmovilizado fue significativamente más bajo ($P \leq 0.05$) a 386 kg N/ ha, 866 kg N/ha y 1973 kg nitrógeno/ha para las parcelas tratadas con lixiviado 20%, 50% y sin diluir, respectivamente.

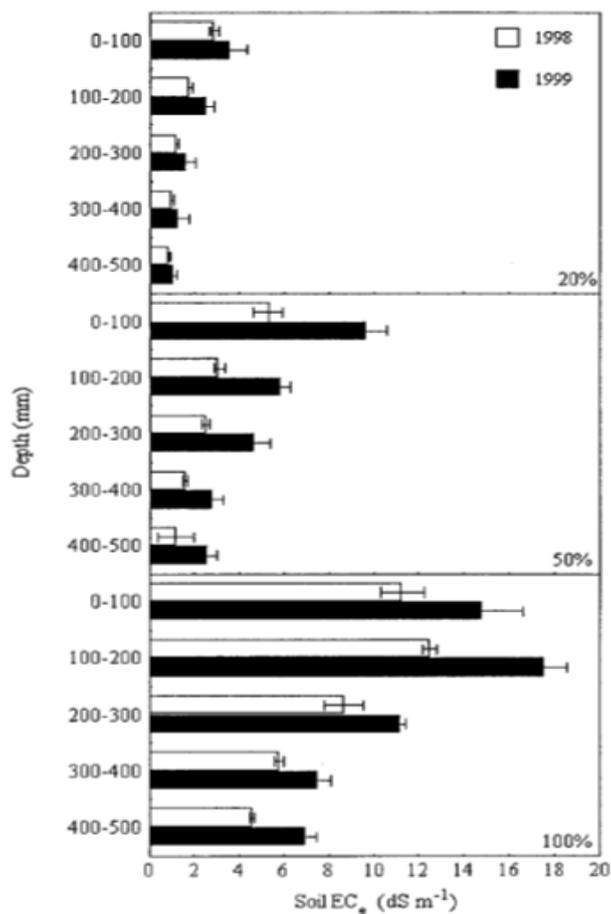
Bowman, et al., (2002) encontraron que la disminución en la capacidad del suelo para inmovilizar el nitrógeno parece sugerir que el sistema suelo - césped se está acercando a la saturación. Sin embargo, si bien la incorporación disminuyó durante el segundo año de riego, el porcentaje de N total lixiviado no fue significativamente diferente ($P \geq 0.05$) del año anterior.

La absorción de nitrógeno por parte del césped fue un sumidero de nitrógeno relativamente menor para todos los tratamientos, con un promedio de alrededor 5,8% anual durante el experimento (ver tabla 2B). Esta tasa concuerda con el nivel de absorción de césped del 7%. Si la capacidad del sistema para "acomodar" N se excedió en gran medida, como parecen indicar los datos de incorporación, se esperaría una lixiviación de nitrógeno significativamente mayor, por lo tanto, parece que los regímenes de gestión del riego adoptados durante el estudio de (Bowman, et al.,2002) favorecieron a las bacterias desnitrificantes del suelo, lo que concuerda con las tasas significativamente más altas ($P \leq 0,05$) de pérdidas de nitrógeno gaseoso en el año 1999.

La salinidad del suelo se controló con mayor eficacia en la parcela tratada con un 20% de lixiviado, lo que fue coherente con el aumento de la producción de biomasa de brotes de césped y la prevención de la degradación física del suelo. Por el contrario, el aumento de la salinidad del suelo en el 50% y los tratamientos sin diluir degradaron la estructura del suelo. Durante 1998 y 1999, los aumentos netos de la CE del extracto del suelo (CEe) equivalieron a sólo 0,5 mS/cm en el tratamiento del 20% a todas las

profundidades (ver figura 7B). En contraste, los tratamientos del 50% y no diluidos mostraron un aumento en los niveles de CEe de aproximadamente 2,4 mS/cm y 3,1 mS/cm, respectivamente.

La acumulación de sal en el tratamiento al 50% de dilución, fue evidente con un CEe en la zona de 0-150 mm de 9,6 mS/cm. En la parcela tratada con lixiviado no diluido, la CEe del suelo en la zona de 0-150 mm superó los 17,6 mS/cm, cayendo a 7 dS m⁻¹ a 600 mm de profundidad (ver figura 7B). El aumento de la CEe del suelo se asoció con la acumulación de Cl⁻. Los aumentos más bajos se registraron en la parcela del 20% (6870 kg/ha año) y los más altos en la parcela tratada sin diluir (36 485 kg/ ha año).



Fuente: Bowman et al, 2002.

Figura 7B. Extracto de suelo saturado ECe (mS/cm) para cada tratamiento. Los datos son la media de 10 muestras

En relación con el aumento de la salinidad del suelo, el riego tuvo un efecto en las propiedades físicas del suelo (ver tabla 3B). En la parcela tratada con lixiviado no diluido, la densidad aparente aumentó de 1,1 a 1,3 g/cm³, la porosidad disminuyó de 6 a 55%, y la clase de estabilidad del agregado (Emerson) disminuyó de 5 a 3. Por el contrario, las propiedades físicas del suelo en las parcelas de tratamiento al 20% no fueron significativamente diferentes del control.

Cambios en las características del suelo asociados al riego con lixiviado se reflejaron en la respuesta del césped (ver tabla 4B). La producción total de biomasa durante el experimento fue significativamente ($P \leq 0.05$) más alto en el control y en el tratamiento al 20% en el segundo año de funcionamiento. La media mensual de las tasas de producción de biomasa en el tratamiento al 20% aumentó de 291 a 430 kg/ha mes, en relación con el control. que arrojó tasas equivalentes a 168 kg/ha en 1998 y 186 kg/ ha en 1999. En contraste, las tasas de producción de biomasa en el 50% y los tratamientos sin diluir disminuyó de 205 y 140 kg/ ha mes en 1998 a 168 y 67 kg/ ha mes durante 1999, respectivamente.

Tabla 3B. Cambios en las propiedades físicas del suelo bajo riego

Propiedades del suelo	año	control ^a	20% ^a	50% ^a	No diluido ^a
Densidad aparente g/cm ³	1998	1	0,9	1,1 *	1,1
	1999	1,1	0,9	1,2	1,3 **
Porosidad (%)	1998	61	65	69	61
	1999	57	66	63	55
Clase de Emerson ^b	1998	5	5	5	5
	1999	5	5	3**	3*

^a Los datos son la media (\pm SD) de las muestras triplicadas.

^b La agregación se basa en el sistema de clasificación de Emerson (1967).

*, ** Las diferencias entre 1998 y 1999 son significativas en $P \leq 0,05$ y $0,01$, respectivamente.

Tabla 4B. Producción de biomasa de césped (kg/ha) y tasas de producción (kg/ha mes) en respuesta al riego con lixiviado

Año	Biomasa kg/ha ^a		Tasa (kg/ha mes) ^a	
	1998	1999	1998	1999
Control	2019±46	2228±31*	168±4	186±6*
20%	3488±38	5157±49*	291±3	430±4*
50%	2455±113	2014±78*	205±9	168±8*
No diluido	1682±74	800±216*	140±6	67±18*

^a Los datos son la media (\pm SD) de las muestras triplicadas.

* Significativo en $P \leq 0,05$ con respecto a la producción de la anterior el año correspondiente.

La degradación observada en las propiedades físicas del suelo en el tratamiento de 50% y en el de no dilución de lixiviado, se asoció probablemente con la acumulación de Iones Na^+ en relación con los de Ca^+ en el suelo.

Bowman, et al., (2002) relacionaron la tendencia de los minerales de arcilla en dispersarse y comprimirse cuando se riega con soluciones con elevadas concentraciones de Na^+ y la restricción del crecimiento de las plantas. El declive estructural observado en las parcelas de tratamiento de lixiviados de Newington al 50% y sin diluir era consistente con la reducción medida de la producción de biomasa del césped.

Por su parte, la disminución medida en la producción de brotes durante 1999 en el tratamiento 50% y el tratamiento sin diluir respecto al tratamiento del 20% sugiere que las especies de césped de Couch y Kikuyu estaba siendo cada vez más intolerante a las aplicaciones de lixiviados no diluidos. Por el contrario, la biomasa de los brotes la producción fue significativamente ($P \leq 0.05$) mayor en el tratamiento al 20% comparado con el control, por lo tanto, la sostenibilidad del riego con lixiviado en Newington parece estar limitada por la salinidad del suelo y la sodicidad, más que por el control de la lixiviación de N mediante desnitrificación.

En conclusión, el estudio de Bowman, et al., (2002) identificó que la programación del riego con lixiviado, teniendo en cuenta la respuesta a la humedad del suelo, la evapotranspiración y el análisis rápido de N de la solución del suelo, permitió el control en tiempo real y a bajo costo de pérdidas de N por lixiviación. Se encontró que la mayor limitación de con el lixiviado de Newington fue su alta salinidad, la cual afectó negativamente al crecimiento del césped y la estructura del suelo cuando se aplicó sin ser diluido. El control adecuado de la salinidad del suelo sólo se logró mediante diluciones con el agua de la ciudad para lograr una concentración de lixiviado del 20% (<3,6 mS/cm). De manera similar, la lixiviación de nitrógeno se controló más eficazmente en tratamiento con dilución al 20% de lixiviado, en el que las aplicaciones de nitrógeno (1400 kg de nitrógeno/ha año) fueron manejadas, sin embargo (Bowman, et al.,2002) consideran que las aplicaciones de nitrógeno que superen este nivel sólo serán viables si la salinidad es adecuadamente controlada.

A.5. Mendoza, normas para vertido de efluentes líquidos industriales para reúso agrícola ANEXO I-B RES, N°778/96 H.T.A

PARAMETRO	UNID.	VERTIDOS EN ACRES CONTROLADOS.	ESPECIFICACIONES SINGULARES Y OBSERVACIONES
A: PARAMETROS ORGANOLEPTICOS			
COLOR	U.C.V.	NO OBJETABLES	Siempre que el mismo, por su intensidad, pueda influir en el proceso de fotosíntesis. En algunos casos se analizarán las estructuras químicas de los compuestos responsables del color.
OLOR		NO OBJETABLES	Para acres, deberá verificarse la no afectación a operarios y/o residentes
SABOR		NO OBJETABLES	Para acres, deberá verificarse la no afectación a operarios y/o residentes
TURBIEDAD	UTN	*	Debe verificarse la causal de la turbiedad en algunos casos. Relacionar con los sólidos sedimentables.
B: PARAMETROS FISICO-QUIMICOS			
ALUMINIO	mg/l	5	El valor se ajustará a los resultados de los análisis de pH del suelo.
AMONIO	mg/l N	*	Los valores serán estrictos si hay asociación con coliformes fecales.
CLORO LIBRE RESIDUAL.	mg/l	*	Deberá fijarse para casos de vuelcos de líquidos que hayan tenido carga microbiana. Debe controlarse y establecerse ante la presencia de sustancias nitrogenadas máximo de cloro residual combinado
CLORUROS	mg/l	600	Este parámetro podrá ser regulado, si no existe posibilidad de efectos corrosivos. Ver tipos de cultivos en cada ACRE.
CONDUCTIVIDAD	uS/cm	-	El valor se determinará conforme índice de peligrosidad final.
DETERGENTES	mg/l	2	No provoca problemas en los cauces, suelos y cultivos. Se analizará el valor fijado para casos particulares.
DUREZA TOTAL	mg/l CO ₃ Ca	*	En industrias con importantes aportes de calcio y/o magnesio, o para vuelcos de concentraciones de lavado de aguas de calderas, resolver en cada caso.
HIERRO TOTAL	mg/l	5	Puede contribuir a acidificación suelo y disminución de P y Mo, esenciales para plantas, para cuyo caso se estudiará el valor a fijar
SODIO	mg/l	400	Verificar afectación a cultivos y caudales máximos a admitir. Se analizarán los contenidos en suelo de sodio intercambiable.
SULFATOS	mg/l	600	Problemas con bacterias sulfuro reductoras. Verificar riesgos de corrosión e interferencias con tratamientos de líquidos residuales.

Continúa

Continuación anexo A.5.

PARAMETRO	UNID.	VERTIDOS EN ACRES CONTROLADOS.	ESPECIFICACIONES SINGULARES Y OBSERVACIONES
ZINC	mg/l	2	Tóxico para muchos cultivos a concentraciones muy variables. Disminuye toxicidad si pH> 6 y suelos textura fina o de carácter orgánico.
pH	UNIDADES DE PH	6.5 a 8.5	Verificar incidencia en cultivos o bebida de ganado o avícola. En algunas industrias se exigirá control continuo.
C: SUSTANCIAS TOXICAS INORGANICAS			
ARSENICO	mg/l	0.1	En ACRES, verificar toxicidad en tipo de cultivos. Fitotoxicidad comprobada 2 mg/l, para ciertas hierbas, 0,5 mg/l para el arroz.
BARIO	mg/l	1	Se analizará el valor fijado para casos particulares.
BORO	mg/l	0.5	Verificar afectación a suelos y cultivos.
CADMIO	mg/l	0.01	Es tóxico para varios cultivos, siendo los límites recomendados bajos debido a su capacidad para acumularse en suelos y en los cultivos hasta concentraciones que pueden ser perjudiciales para las personas.
CIANUROS	mg/l	0.1	Se analizará el valor fijado para casos particulares.
COBRE	mg/l	0.5	Verificar afectación a cultivos y limitar caudales, aconsejándose valores <0.2 mg/l para preservación cultivos.
CROMO HEXA VALENTE	mg/l	0.1	Escasos conocimientos sobre fitotoxicidad, analizándose el valor fijado para casos particulares.
CROMO TOTAL	mg/l	0.5	Idem anterior.
FLUORUROS	mg/l	1	para suelos alcalinos o neutros, puede aceptarse > cantidad de F. en períodos máximos de riegos < de 20 años.
MANGANESO	mg/l	0.2	Toxico para diversas plantas a concentraciones entre unas décimas y unos miligramos por litro, aunque principalmente en suelos ácidos.
MERCURIO	mg/l	0.003	Para Acres justificar valores > 0.001mg/l,
NITRATOS	mg/l N03 ⁻	*	Límite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.
NITRITOS	mg/l N02 ⁻	*	Idem anterior.
PLATA	mg/l	0.05	Límite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.
PLOMO	mg/l	0.5	Verificar afectación a vida acuática y uso p/bebida ganado o avícola. En ese caso, en el recurso Pb< 0.1 mg/l. Puede inhibir crecimiento células vegetales a concentraciones elevadas. Se establecerán valores para casos particulares.

Continúa

Continuación anexo A.5.

PARAMETRO	UNID.	VERTIDOS EN ACRES CONTROLADOS.	ESPECIFICACIONES SINGULARES Y OBSERVACIONES
SELENIO	mg/l	0.02	Límite para determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.
PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS			
COLIFORMES TOTALES	NMP por 100 ml (tubos múltiples)	*	Valores deben ser estudiados en cada caso, según afectaciones en las futuras áreas a irrigar.
COLIFORMES FECALES	NMP por 100 ml (tubos múltiples)	1000	Se puede exigir menor presencia de coliformes, teniendo en cuenta el tipo de cultivo a irrigar.
HELMINTOS	huevos/litro	1	No se permiten en general mezclas de líquidos cloacales con industriales.
DBO	mg/l O ₂	*	En todos los casos, determinarse individualmente. Puede ser más o menos estricto en función de su potencial afectación al recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo.
DQO	mg/l O ₂	*	En todos los casos, determinarse individualmente. Puede ser más o menos estricto en función de su potencial afectación al recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo.
TEMPERATURA	°C	30	Se restringirán caudales a volcar. Casos singulares deben ser analizados.
SOLIDOS SEDIMENTABLES EN DOS HORAS	ml/l	10	Valores deben ser estudiados en cada caso, según afectaciones en las futuras áreas a irrigar.
SOLIDOS SOLUBLES EN ÉTER ETILICO	mg/l	50	Valores deben ser estudiados en cada caso, según afectaciones en las futuras áreas a irrigar Grasas deben ser de origen vegetal o animal.
RAS	nro.	6	El máximo se fijará en función de los análisis de agua y suelo que se hagan en la superficie a irrigar.
FOSFATOS	mg/l	*	Límite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular
SULFUROS	mg/l	1	Límite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.
URANIO	ug/l	1500	Se evaluará en función de cada recurso afectado, sus usos y problemas conexos.
RADIO-226	pico Curie/l	5	Se evaluará en función de cada recurso afectado, sus usos y problemas conexos.

A.6. Mendoza- Norma de calidad de efluente cloacal con tratamiento primario para reúso agrícola

ANEXO I-C RES, N°778/96 H.T.A.

A) PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS			
PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
CONDUCTIVIDAD	µS/cm	2500	1800
PH	Unidades	5,5 - 9	6.5 - 8,0
TEMPERATURA	°C	45	30
RAS.	Nº	6	4
SOLUBLES EN ÉTER	mg/l	100	40
SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN 10'	ml/l	0,5	<0,5
B) SUSTANCIAS TÓXICAS INORGÁNICAS			
ANIONES			
SULFATOS	mg/l	600	400
CLORUROS	mg/l	500	400
FLUORURO	mg/l	1	0,6
SULFUROS	mg/l	1	0.5
CIANUROS	mg/l	0.1	0.05
CATIONES			
SODIO	mg/l	500	250
MANGANESO	mg/l	0.5	0.2
BARIO	mg/l	2	1
BORO	mg/l	1	0.5
HIERRO TOTAL	mg/l	5	3
ALUMINIO	mg/l	5	2
ARSÉNICO	mg/l	0.1	0.05
CADMIO	mg/l	0,01	<0.01
COBRE	mg/l	1	0.5
CROMO (+6)	mg/l	0.1	0,05
CROMO TOTAL	mg/l	0.5	< 0.5
ZINC	mg/l	3	2
NÍQUEL	mg/l	0.5	0,2
MERCURIO	mg/l	0,005	0.001
PLOMO	mg/l	0.5	<0.5
SELENIO	mg/l	0.05	0.02

Continua

Tabla A6: continuación

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE RECOMENDADO
COBALTO	mg/l	0,1	0,05
DETERGENTES	mg/l	3	1
HIDROCARBUROS TOTALES	mg/l	50	10
CLORO LIBRE RESIDUAL	mg/l	0.5	<0.5
FENOLES	mg/l	0.5	<0.5
C) NUTRIENTES			
POTASIO	mg/l	*	*
NITRATOS	mg/l	*	*
NITRITOS	mg/l	*	*
NITRÓGENO AMONIACAL	mg/l	*	*
NITRÓGENO TOTAL	mg/l	*	*
FOSFATOS	mg/l	*	*
FÓSFORO TOTAL	mg/l	*	*
D) PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS Y ORGÁNICOS			
BACTERIAS AERÓBICAS	Ufc/ml	*	*
ESCHERICHIA COLI	N°/100 ml	105	1000
PSEUDOMONAS AERUGINOSAS	N°/100 ml	*	*
HELMINTOS	huevos/1000 ml	1	< 1
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.)	mg/l	240	70
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O.)	mg/l	170	100
E) ELEMENTOS RADIOACTIVOS			
URANIO	ug/l	1500	1500
RADIO 226	pico curie/l	5	5
(*) : Limite a determinar según afectación al acuífero, estableciéndose valores para cada caso en particular.			
Nota: Los valores que figuran en la presente tabla, serán revisados anualmente.			

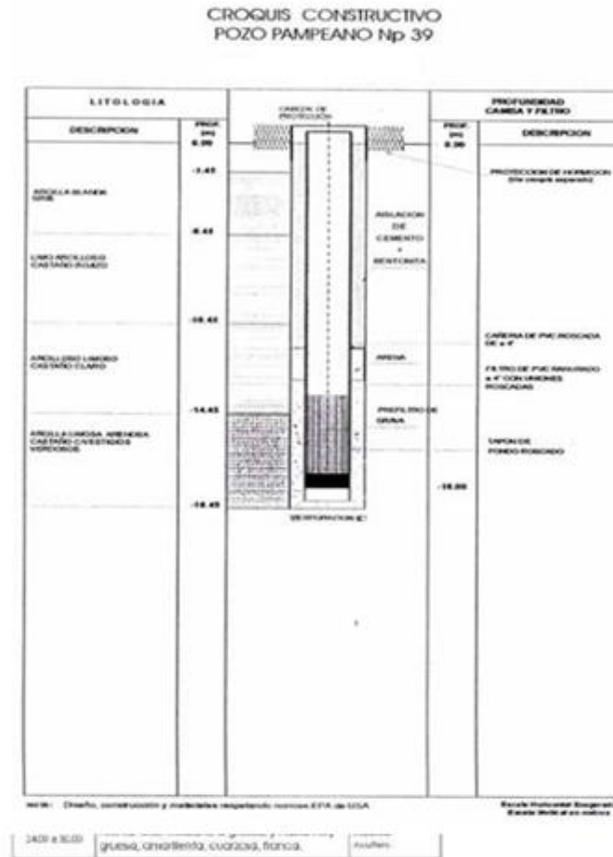
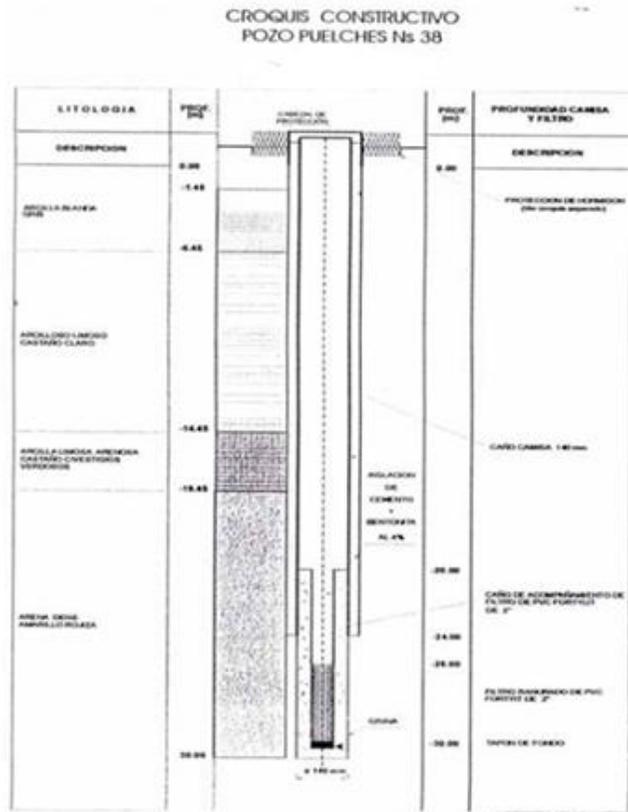
A.7. EPA - reúso de agua para riego

Límites recomendados para reúso de agua como riego a largo plazo y corto plazo, (EPA,2004).

Parámetros	Unidad	Límites recomendados para reúso de agua como riego (a largo plazo) EPA g	Límites recomendados para reúso de agua como riego (a corto plazo) EPA g
Aluminio	mg/l	5	20
Arsénico	mg/l	0,10	2,0
Boro	mg/l	0,75	2,0
Cadmio	mg/l	0,01	0,05
Cobalto	mg/l	0,05	5,0
Cromo hexavalente	mg/l	0,1	1,0
Cobre	mg/l	0,2	5,0
Hierro	mg/l	5,0	20,0
Plomo	mg/l	5,0	10,0
Manganeso	mg/l	0,2	10,0
Molibdeno	mg/l	0,01	0,05
Níquel	mg/l	0,2	2,0
Selenio	mg/l	0,02	0,02
Zinc	mg/l	2,0	10,0
Berilio	mg/l	0,10	0,5
Fluoruro	mg/l	1,0	15,0
Litio	mg/l	2,5	2,5
pH	UpH	6,0	6,0
Cloro libre	mg/l	1,0	1,0

A.8. Perfiles representativos del análisis hidrogeológico de la zona de estudio

Ns 38 - Np 39



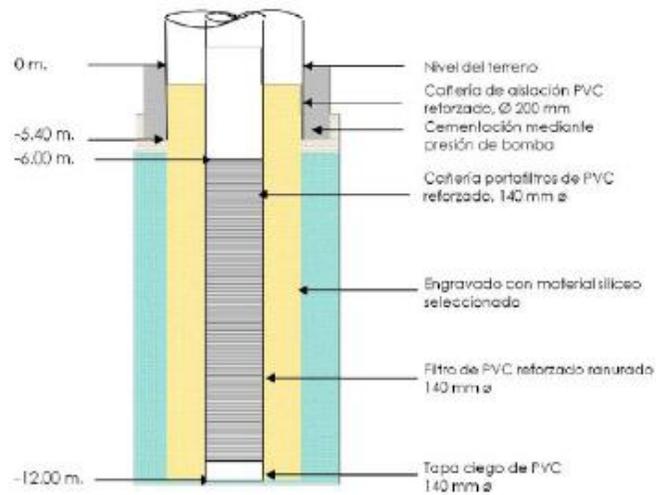
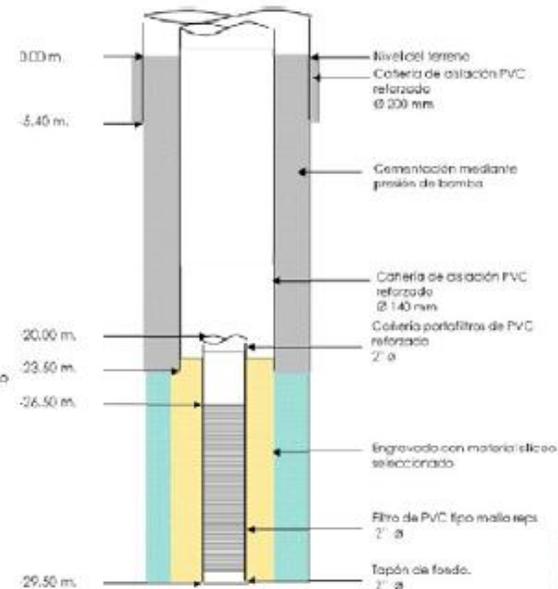


Gráfico sin escala

Np 85

Np 85 - Ns 86



Ns 86

ANEXO 1. POZOS DE RECONOCIMIENTO - MUESTREO EN BOCA DE POZO.

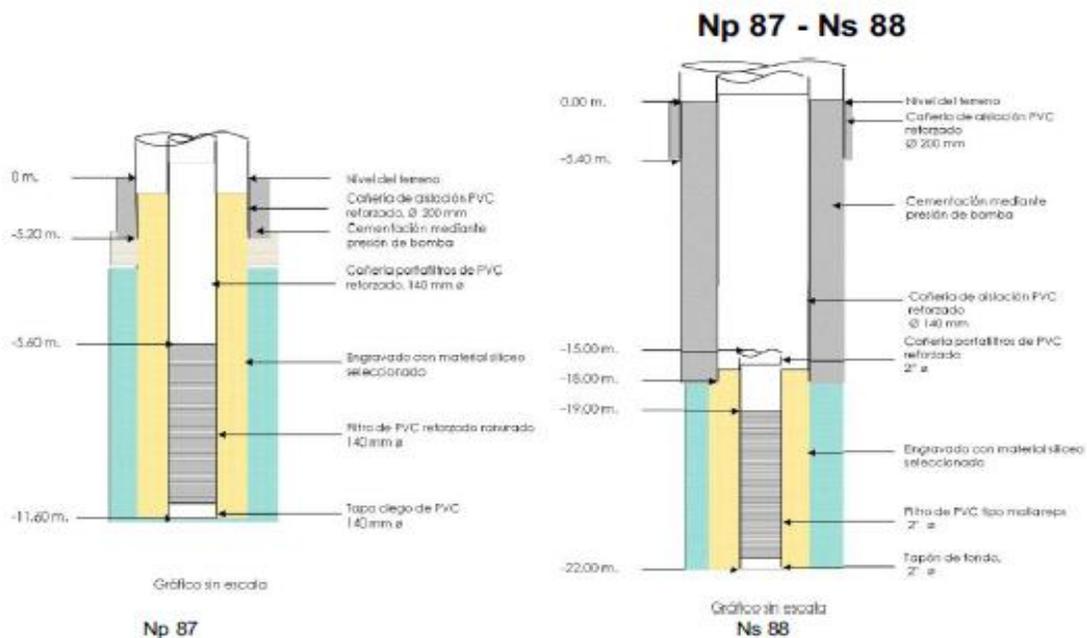
Descripción macroscópica de sedimentos, por el método "lacti-viudad".

Profundidad (m.b.n.t.)	Litología
00.00 a 03.00	Suelo vegetal, arcilla plástica gris-azulada, gajos chicos.
03.00 a 06.00	Arcilla plástica, gris-azulada oscura, con fracciones de valvas de bivalvos. Gajos medianos.
06.00 a 09.00	Limo arcilloso, castaño, con gajos medianos de arcilla plástica gris subordinados.
09.00 a 12.00	Limo arcilloso, castaño, con gajos medianos de arcilla plástica gris subordinados.
12.00 a 15.00	Arcilla plástica castaño-verdosa clara, gajos chicos con manchas de fósfo de Hierro y fracciones de conchillas blanquecinas.
15.00 a 18.00	Arcilla plástica gris-verdosa clara, gajos medianos y grandes.
18.00 a 21.00	Arcilla plástica gris-negruzca, gajos medianos a grandes, franca, con fracciones de conchillas blanquecinas.
21.00 a 24.00	Arcilla plástica gris-negruzca, gajos medianos a grandes, franca, con fracciones de conchillas blanquecinas.
24.00 a 25.00	Arena, muy fina o fina, pardo-amarillenta, con arcilla grásica subordinada.
25.00 a 26.00	Arena fina, amarillenta, franca, algo arcillosa.
26.00 a 27.00	Arena, mediana o gruesa, y muy gruesa, amarillenta, cuarzoza (con calcaredonia y ópalo), leldespática, franca.
27.00 a 28.00	Arena, mediana o gruesa, y muy gruesa, amarillenta, cuarzoza (con calcaredonia y ópalo), leldespática, franca.
28.00 a 29.00	Arena, mediana o gruesa, y muy gruesa, amarillenta, cuarzoza (con calcaredonia y ópalo), leldespática, franca.
29.00 a 30.00	Arena, mediana o gruesa, y muy gruesa, amarillenta, cuarzoza (con calcaredonia y ópalo), leldespática, franca.

3) PERFIL SEDIMENTOLÓGICO AJUSTADO

Corresponde a la interpretación litológica, por correlación, entre las muestras obtenidas en el pozo de reconocimiento.

Profundidad (m.b.n.t.)	Litología	Correlación Litológica
00.00 a 03.00	Arcilla plástica gris-azulada, clara, gajos pequeños. Hacia la base medianos y más oscuros.	RP18L01E Acuífero
06.00 a 12.00	Limo arcilloso, castaño, con gajos medianos de arcilla plástica gris subordinados.	RP18L01E Acuífero
12.00 a 18.00	Arcilla plástica castaño-verdosa a gris-verdosa, con manchas de óxido de Hierro y fracciones de conchillas blanquecinas.	RP18L01E Acuífero
18.00 a 24.00	Arcilla plástica gris-negruzca, gajos medianos a grandes, franca.	RP18L01E Acuífero
24.00 a 30.00	Arena, fina, mediana o gruesa, y hasta muy gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.	R18C1E Acuífero



Np 87

Ns 88

3) PERLE SEDIMENTOLOGICO AJUSTADO

Corresponde a la interpretación hidrogeológica, por correlación, entre las muestras obtenidas en el pozo de reconocimiento.

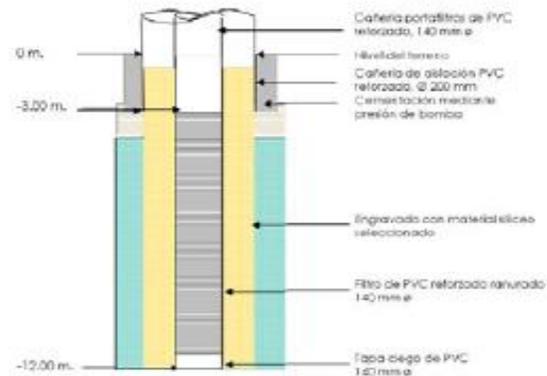
Profundidad (m.b.n.t.)	Litología	Caracterización litológica
00.00 a 01.00	Suelo vegetal, arcilla plástica gris-amarilla, en parte consolidada, frías.	(RP)UCHE Acuífero
01.00 a 02.00	Arcilla plástica gris-amarilla, en parte consolidada, frías.	(RP)UCHE Acuífero
02.00 a 03.00	Arcilla plástica gris-amarilla, en parte consolidada, frías.	(RP)UCHE Acuífero
03.00 a 04.00	Limo arenoso cementado, pardo, con arcilla plástica gris subordinada.	(RP)UCHE Acuífero
04.00 a 05.00	Limo arenoso cementado, pardo, con arcilla plástica gris subordinada.	(RP)UCHE Acuífero
05.00 a 06.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.	(RP)UCHE Acuífero
06.00 a 07.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.	(RP)UCHE Acuífero
07.00 a 08.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.	(RP)UCHE Acuífero
08.00 a 09.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.	(RP)UCHE Acuífero
09.00 a 10.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.	(RP)UCHE Acuífero
10.00 a 11.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, y arcilla gris plástica subordinada.	(RP)UCHE Acuífero
11.00 a 12.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, y arcilla gris plástica subordinada.	(RP)UCHE Acuífero
12.00 a 13.00	Arcilla plástica gris oscura y clara, con fracciones de calcáreo duro.	(RP)UCHE Acuífero
13.00 a 14.00	Arcilla plástica varicolor, con fracciones de calcáreo angulares, duro.	(RP)UCHE Acuífero
14.00 a 15.00	Arcilla plástica varicolor, masiva, con manchas de óxido de hierro, con fracciones de calcáreo angulares, duro.	(RP)UCHE Acuífero
15.00 a 16.00	Arcilla plástica varicolor, masiva, con manchas de óxido de hierro, con fracciones de calcáreo angulares, duro, con arena muy fina amarillenta.	(RP)UCHE Acuífero
16.00 a 17.00	Predomina arena fina, amarillenta, con gajos de arcilla varicolor, grandes.	(RP)UCHE Acuífero
17.00 a 18.00	Arena, fina, amarillenta, franco.	(RP)UCHE Acuífero
18.00 a 19.00	Arena, fina, amarillenta, franco.	(RP)UCHE Acuífero
19.00 a 20.00	Arena, fina, amarillenta, franco.	(RP)UCHE Acuífero
20.00 a 21.00	Arena, fina, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.	(RP)UCHE Acuífero
21.00 a 22.00	Arena, fina a mediana, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.	(RP)UCHE Acuífero
22.00 a 23.00	Arena, fina a mediana, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.	(RP)UCHE Acuífero
23.00 a 24.00	Arena, fina, con arcilla gris-azulada, fracciones de calcáreo y manchas de óxido de hierro.	(RP)UCHE Acuífero
24.00 a 25.00	Arena, fina, con arcilla gris-azulada, fracciones de calcáreo, manchas de óxido de hierro y gajos medianos de arcilla varicolor.	(RP)UCHE Acuífero

ANEXO I. POZO DE RECONOCIMIENTO - MUESTREO EN BOCA DE POZO.

Descripción megascópica de sedimentos, por el método "tácti-visual".

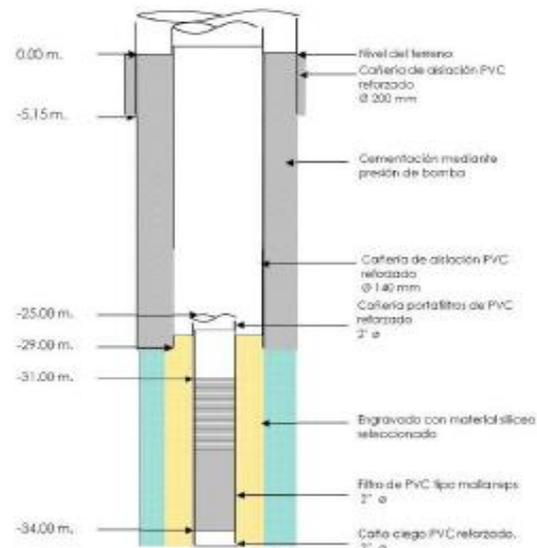
Profundidad (m.b.n.t.)	Litología
00.00 a 01.00	Suelo vegetal, arcilla plástica gris y amarilla, en parte consolidada, frías.
01.00 a 02.00	Arcilla plástica gris y amarilla, en parte consolidada, frías.
02.00 a 03.00	Arcilla plástica gris y amarilla, en parte consolidada, frías, con participación de arcilla gris clara.
03.00 a 04.00	Limo arenoso cementado, pardo, con arcilla plástica gris subordinada.
04.00 a 05.00	Limo arenoso cementado, pardo, con arcilla plástica gris subordinada.
05.00 a 06.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.
06.00 a 07.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.
07.00 a 08.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.
08.00 a 09.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.
09.00 a 10.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, franco.
10.00 a 11.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, y arcilla gris plástica subordinada.
11.00 a 12.00	Limo arenoso cementado, pardo, con fracc. angulares de calcáreo, blanquecinas, duras, y arcilla gris plástica subordinada.
12.00 a 13.00	Arcilla plástica gris oscura y clara, con fracciones de calcáreo duro.
13.00 a 14.00	Arcilla plástica varicolor, con fracciones de calcáreo angulares, duro.
14.00 a 15.00	Arcilla plástica varicolor, masiva, con manchas de óxido de hierro, con fracciones de calcáreo angulares, duro.
15.00 a 16.00	Arcilla plástica varicolor, masiva, con manchas de óxido de hierro, con fracciones de calcáreo angulares, duro, con arena muy fina amarillenta.
16.00 a 17.00	Predomina arena fina, amarillenta, con gajos de arcilla varicolor, grandes.
17.00 a 18.00	Arena, fina, amarillenta, franco.
18.00 a 19.00	Arena, fina, amarillenta, franco.
19.00 a 20.00	Arena, fina, amarillenta, franco.
20.00 a 21.00	Arena, fina, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.
21.00 a 22.00	Arena, fina a mediana, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.
22.00 a 23.00	Arena, fina a mediana, amarillenta, con algo de arcilla plástica gris, gajos muy chicos.
23.00 a 24.00	Arena, fina, con arcilla gris-azulada, fracciones de calcáreo y manchas de óxido de hierro.
24.00 a 25.00	Arena, fina, con arcilla gris-azulada, fracciones de calcáreo, manchas de óxido de hierro y gajos medianos de arcilla varicolor.

Navigation bar with icons for zoom (66.1%), pan, and other controls.



Np 89

Np 89 - Ns 90



Ns 90

ANEXO I. POZO DE RECONOCIMIENTO - MUESTREO EN BOCA DE POZO.

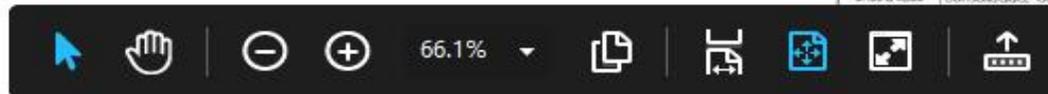
Descripción megascópica de sedimentos, por el método "tácti-visual".

Profundidad (m.b.n.t.)	Litología
00.00 a 03.00	Suelo vegetal, arcilla plástica gris clara, en parte consolidada, gajos pequeños.
03.00 a 06.00	Limo arenoso cementado pardo, con fracciones de calcáreo subordinadas.
06.00 a 09.00	Arcilla plástica castaño clara, con fracciones de limo-arenoso cementado pardo y gajos de arcilla castaño clara gráscosa y calcáreo subordinado.
09.00 a 12.00	Arcilla plástica castaño clara, fracciones finas a medianas con gajos finos, medianos y grandes. franca.
12.00 a 15.00	Arcilla plástica castaño clara, fracciones medianas y grandes, en parte consolidadas, con gajos finos, medianos y grandes. franca.
15.00 a 18.00	Arcilla plástica castaño-gráscosa, gajos medianos con manchas de óxido de hierro.
18.00 a 21.00	Arcilla plástica gris-azulada, gajos medianos a grandes. franca.
21.00 a 24.00	Arcilla plástica negra, gajos muy grandes. franca.
24.00 a 25.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.
25.00 a 26.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.
26.00 a 27.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.
27.00 a 28.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.
28.00 a 29.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.
29.00 a 30.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.
30.00 a 31.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.
31.00 a 32.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.
32.00 a 33.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.
33.00 a 34.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.

3) PERFIL SEDIMENTOLÓGICO AJUSTADO

Corresponde a la interpretación hidrogeológica, por correlación, entre las muestras obtenidas en el pozo de reconocimiento.

Profundidad (m.b.n.t.)	Litología	Correlación hidrogeológica
00.00 a 03.00	Suelo vegetal, arcilla plástica gris clara, en parte consolidada, gajos pequeños.	EPPELCH E Acuífero
03.00 a 06.00	Limo arenoso cementado pardo, con fracciones de calcáreo subordinadas.	EPPELCH E Acuífero
06.00 a 09.00	Arcilla plástica castaño clara, con fracciones de limo-arenoso cementado pardo y gajos de arcilla castaño clara gráscosa y calcáreo subordinado.	EPPELCH E Acuífero castaño
09.00 a 18.00	Arcilla plástica castaño clara, en parte consolidada, con gajos chicos, medianos y hacia la base, azulada, gajos medianos a grandes. franca.	EPPELCH E Acuífero
18.00 a 21.00	Arcilla plástica gris-azulada, gajos medianos a grandes. franca.	EPPELCH E Acuífero
21.00 a 24.00	Arcilla plástica negra, gajos grandes. franca. con conchillas de bivalvos blanquecinos.	EPPELCH E Acuífero
24.00 a 34.00	Arena, mediana a gruesa, amarillenta, cuarzoza, franca.	PELCH E Acuífero



A.9. Cantidad de agua (AW) requerida para *Cynodon dactylon*- 30% de lixiviado tratado

Lixiviado 30 % potencial de rendimiento 90%			
Mes	AW mm/decadia	Ecw	AW
Sep	12,8		-0,3
Sep	15,6		-5,5
Sep	17,0		-8,8
Oct	20,6		-3,6
Oct	20,7		-1,1
Oct	23,7		2,9
Nov	27,0		6,5
Nov	30,5		10,6
Nov	34,2		14,9
Dic	40,3		19,5
Dic	39,5		16,6
Dic	42,2		17,9
Ene	44,5		20,5
Ene	37,8		14,7
Ene	35,7		13,0
Feb	25,9		1,5
Feb	29,3		1,7
Feb	26,0		-3,8
Mar	23,3		-2,5
Mar	15,1		-5,7
Mar	9,3		-6,3
	571,1		102,8

Calculado para un agua de riego compuesta de un 30% de lixiviado tratado y un 70% agua del acuífero Puelche, estimándose un 90% de rendimiento del cultivo

A.10. Cantidad de agua (AW) requerida para *Cynodon dactylon* - 45% de lixiviado tratado

Lixiviado 45 % potencial de rendimiento 75%		
Mes	AW mm/decadia ECw	AW
Sep	12,96	-0,14
Sep	15,79	-5,31
Sep	17,2	-8,6
Oct	20,86	-3,34
Oct	20,97	-0,83
Oct	24,04	3,24
Nov	27,34	6,84
Nov	30,87	10,97
Nov	34,64	15,34
Dic	40,89	20,09
Dic	40,06	17,16
Dic	42,77	18,47
Ene	45,13	21,13
Ene	38,3	15,2
Ene	36,18	13,48
Feb	26,28	1,88
Feb	29,69	2,09
Feb	26,39	-3,41
Mar	23,57	-2,23
Mar	15,32	-5,48
Mar	9,43	-6,17
	Total	145,89

Calculado para un agua de riego compuesta de un 45% de lixiviado tratado y un 55% agua del acuífero Puelche, estimándose un 75% de rendimiento del cultivo.

UTILIZACIÓN DE LIXIVIADO TRATADO DE UN RELLENO SANITARIO DEL CONURBANO BONAERENSE PARA EL RIEGO DE *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*

AUTOR: Páez Martínez, Iris

DIRECTOR: Wagner Manslau, Alfredo

CO-DIRECTOR: Luengos, María de los Ángeles

ESTRUCTURA DE LA PRESENTACIÓN



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones



SERVICIOS GENERAL

OPERACIONES

MANTENIMIENTO DE ÁREAS VERDES


- Cobertura final modulo (*capping*).
- Zonas no asociadas a los módulos.

Riego actual: agua del acuífero Puelche.

Reemplazar parte de este consumo mediante el uso de un agua no convencional.

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

LIXIVIADO TRATADO



Cynodon dactylon



Lolium multiflorum

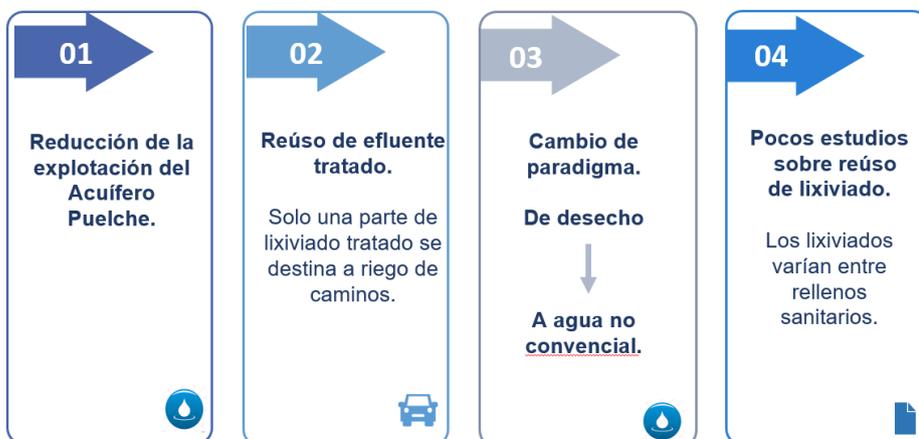
ANTECEDENTES

- La mayor parte de estudios publicados de **reúso de efluentes para riego** son de **fuentes cloacales**.
- En **Argentina no hay estudios publicados de reúso de lixiviado tratado para riego**.

ESTUDIOS RELEVANTES PARA LA TESIS

- **Bowman , M., Clune, T., & Sutton, B. (2002).** Sustainable *managment* of landfill leachate by irrigation. *Water, Air, and Soil Pollution*.
- **MacDonald, N., Rediske, R., & Scull, B. (2008).** *Landfill cover soil, soil solution, and vegetation response to municipal landfill leachate applications*

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

5

HIPÓTESIS

Es posible utilizar el lixiviado tratado proveniente del relleno sanitario como agua de riego para los cultivos *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar si el lixiviado tratado por las plantas N° 1 y N° 3 de un relleno sanitario localizado en el conurbano bonaerense, puede ser usado para el riego de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum* en la zona de estudio.

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

6

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Estimar la **cantidad de agua del acuífero Puelche que es utilizada actualmente para riego**
2. Establecer el **volumen de agua regenerada** que debería aplicarse para el óptimo rendimiento de los cultivos ***Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum***
3. Identificar **niveles guía internacionales y nacionales para reúso** de efluentes tratados como fuente de agua para riego de espacios verdes.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

4. Recopilar y analizar los parámetros **fisicoquímicos y microbiológicos del lixiviado tratado** por las plantas **N° 1 y N° 3**.
5. Estudiar la necesidad y el **grado de dilución requerido para utilizar el lixiviado como agua de riego** de las especies estudiadas.
6. Evaluar los **potenciales impactos** del uso de lixiviado tratado para riego **sobre los acuíferos** del área de investigación.

ZONA DE ESTUDIO



Cuenca inferior del río **Reconquista**.

- Suelos y sedimentos Pampeanos **arcillo limosos de** moderada-baja permeabilidad.

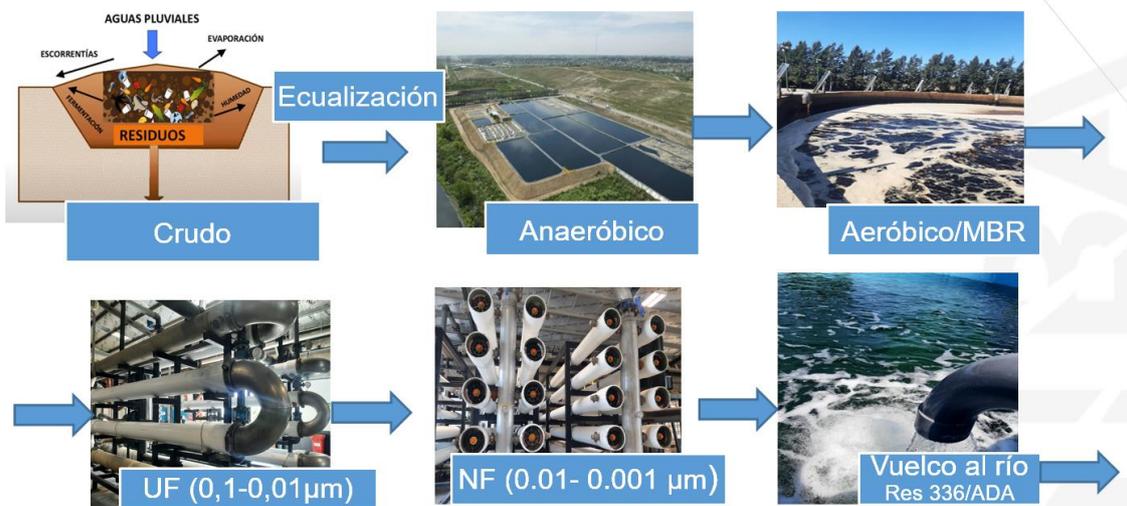
- **Aguas subterráneas:** Pampeano y Puelche.

- 425 000 t/mes de RSU (14,5 millones de personas).

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

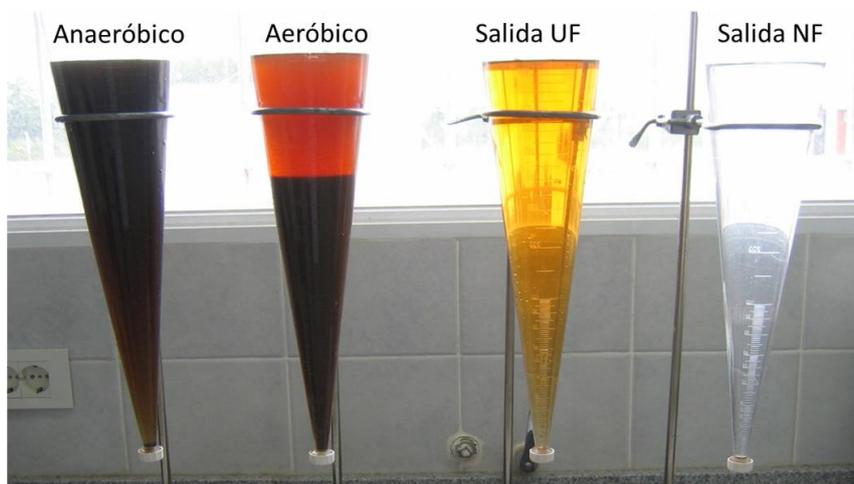
9

TRATAMIENTO DE LIXIVIADO



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

10



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

11

ASPECTOS ANALIZADOS



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

12



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

13

INTERNACIONAL



- **FAO** Apto para riego de zonas verdes
- **U.S. EPA** Calidad de agua para reúso urbano (restringido a largo plazo).



- **AUSTRALIA**
Reúso de agua tratada para riego de áreas verdes.

Parámetros microbiológicos



- **OMS** (Categoría A + procedimiento de barreras múltiples) **U.S EPA** (valores de reducción microbiológica en función de las etapas de tratamiento)

NACIONAL



- **MENDOZA**
Efluentes cloacales con tratamiento secundario para reúso agrícola.



- **PUERTO MADRYN**
Reúso de efluentes cloacales Tratados para riego Tipo 3 (parques público con exposición de trabajadores y público)

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

14

<p style="text-align: center;">ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS - RECOMENDACIONES</p> <p>Para el personal que realiza tareas con el agua regenerada:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Higiene (lavado de manos) ✓ Elementos de protección personal (EPP). <p>Para ubicación asentamiento humano (oficinas y puntos de control de seguridad):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Zona buffer de 50 a 100 metros a la zona regada. <p>Para el manejo del riego:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>Microaspersores</u> - control dirección aerosoles. ✓ Tiempo de espera entre el riego y el corte de césped (<i>Die off</i>). <p>Para el manejo de higiene y seguridad</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Control de vectores. <p style="text-align: center;">ZONAS REGADAS CON ACCESO RESTRINGIDO AL PÚBLICO</p>	<p style="text-align: center;">DESARROLLO</p> <p>Perfil fisicoquímico y microbiológico</p> <p>Mediciones mensuales 2016 y 2017 - planta N°3. 2017 - planta N°1.</p> <p>Res. 336/2003 ADA Provincia de Buenos Aires.</p>
---	---

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

15

Parámetros	Unidad	Puerto Madryn	Mendoza	Australia	U.S.EPA	FAO
		Efluentes cloacales tratados para riego -Tipo 3	Efluentes cloacales tratados para riego agrícola	Reúso de agua tratada para riego de áreas verdes	Agua para reúso urbano (Restringido a largo plazo)	Efluente para riego de zonas verdes
Conductividad	mS/cm	2,25	2,5	0,65 a 8,1	----	>3 severo
pH	UpH	5,5 a 9,0	5,5-9	----	6 a 9	----
Temperatura	°C	----	45	----	----	----
DBO ₅	mg/l	≤30	≤30	≤20	≤30	----
Boro	mg/l	4	1	0,5 - 8	0,75	>3 severo
Cloro libre	mg/l	*	0,5	1	1	----
Nitrógeno	mg/l	*	*	**	----	*
Fósforo total	mg/l	*	*	***	----	----
Coliformes Fecales	UFC/100ml	≤1000	≤1000	≤1000	≤200	≤1000
DQO	mg/l	70	70	----	----	----
Metales pesados						

* Limite a determinar según afectación al acuífero.

** dependerán del tipo del cultivo.

----- No establecido

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

16

	Parámetros	Unidad	Límite	Valor máximo medido
Parámetros que superan el límite	Conductividad	mS/cm	0,65-8,1	19,5
	DBO ₅	mg/l	≤20 -30	50
	DQO	mg/l	70	250
	Coliformes Fecales	UFC/100ml	200 -1000	1100
Parámetros a controlar	Temperatura	°C	45	26
	pH	UpH	5,5-9	7,3 - 9,2
	Cloro	mg/l	0,5-1	0,5
	Nitrógeno	mg/l	*	≤35
	Fósforo total	mg/l	*	0,7
	Boro	mg/l	0,5-8	2

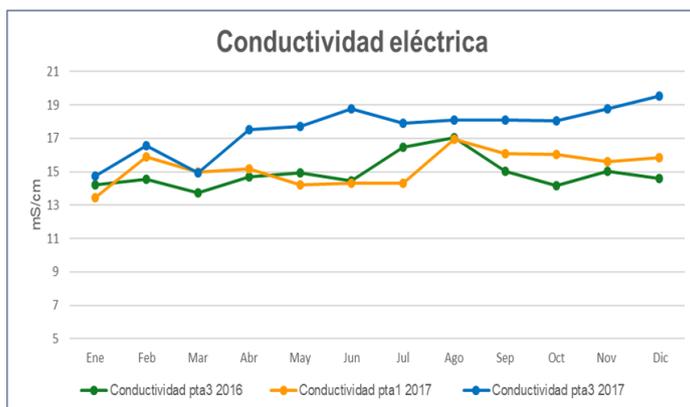
Demanda de la especie cultivada

Nutrientes: los valores en si mismos no son una limitación.

Tolerancia de la especie

Boro: micronutriente con rango concentración pequeño entre la deficiencia y la toxicidad.

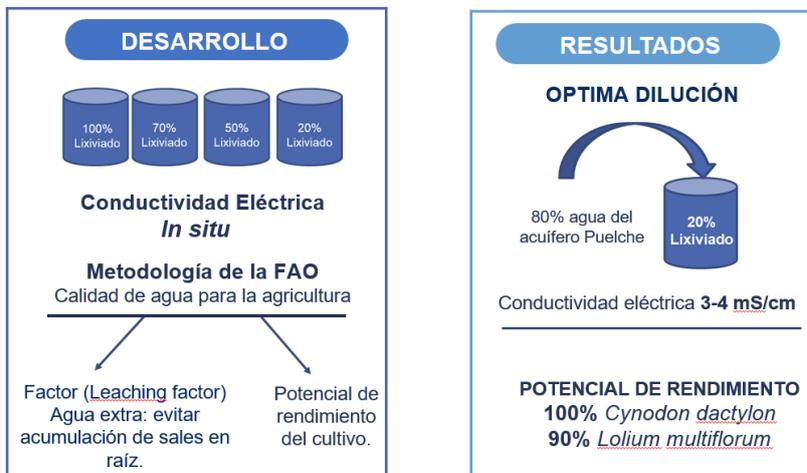
Parámetros asociados al riego no contemplados por la Res 336/ADA Buenos Aires



Relación de adsorción de sodio

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca^{+2}] + [Mg^{+2}])/2}}$$

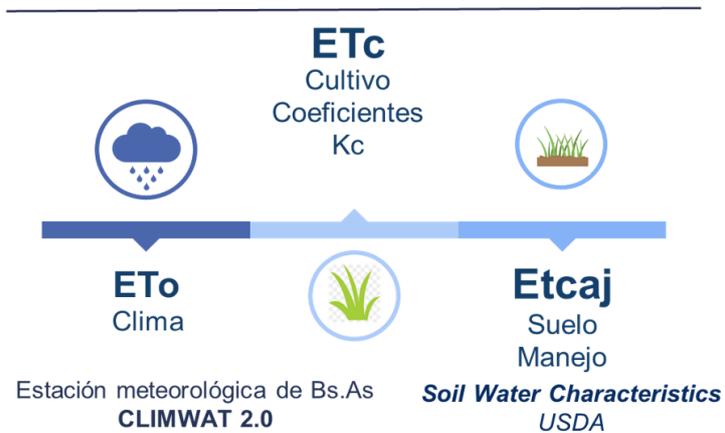
Cálculo RAS		
Muestra	Resultado	Valor de referencia
Pozo 1	3,82	6-18
Pozo 2	5,32	
Lixiviado Planta N°1	34,50	
Lixiviado Planta N°3	44,89	



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

19

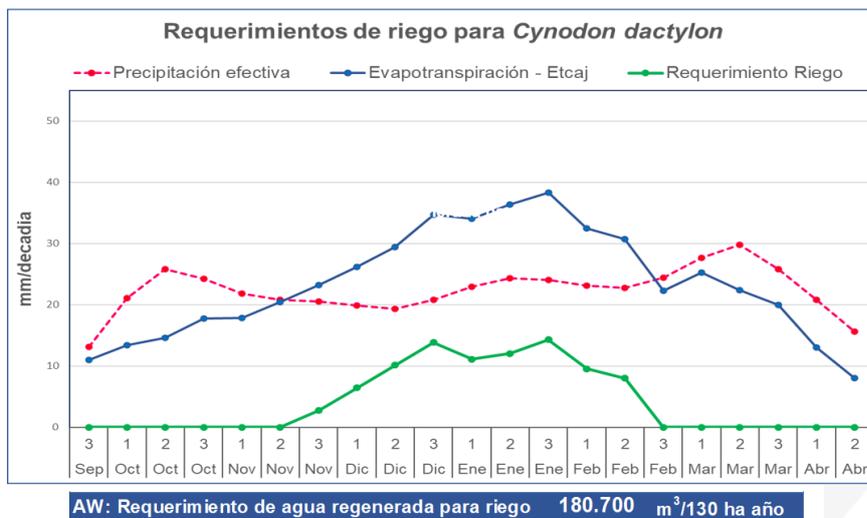
¿CUÁNTA AGUA NECESITA EL CULTIVO?



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

20

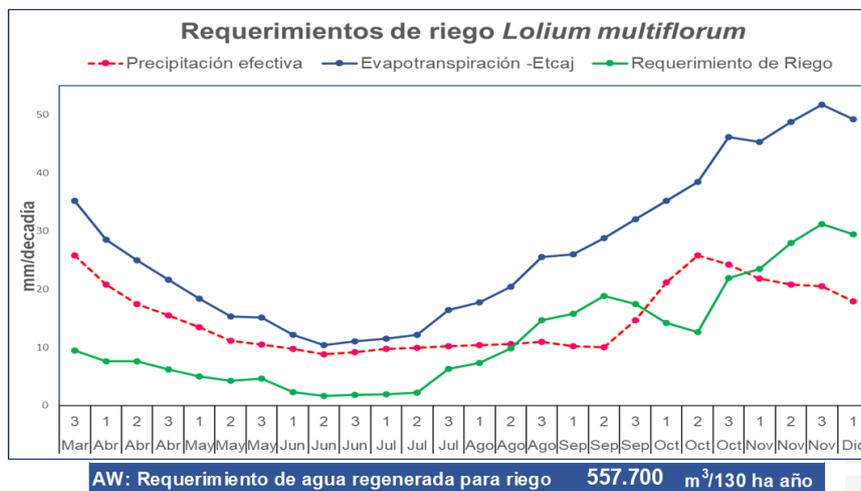
REQUERIMIENTO DE AGUA DEL CULTIVO



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

21

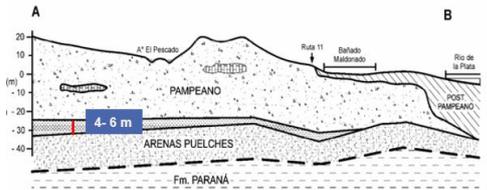
REQUERIMIENTO DE AGUA DEL CULTIVO



Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones

22

Perfiles litológicos 30 pozos



- **Manto arcilloso** continuo (4 a 6 m) – minimiza contaminación al Puelche.
- **Regar con agua regenerada** (20% lixiviado -80% agua Puelche / 3-4 mS/cm) **no impactaría el acuífero pampeano.**
- **Cantidad de agua a regar** (en función de la **demanda del cultivo**) evitaría infiltraciones al acuífero pampeano.
- **Mayor área a regar - Capping** - en caso de un eventual exceso infiltraría al modulo impermeabilizado.
- **Red de 65 pozos en total (clusters)** evalúa la afectación de ambos acuíferos por parte de la actividad del relleno.

Introducción -Estado de situación -Desarrollo- Resultados y Análisis – Conclusiones 23

Volúmenes de lixiviado

- ❖ 420 000 m³/año de lixiviado tratado esta disponible para riego.

Parámetros fisicoquímicos

- ❖ **DQO, DBO₅, CE**, que presentan valores elevados en el lixiviado tratado, en el agua regenerada por efectos de la dilución se alcanzarían valores aceptables, pero deben ser medidos frecuentemente sobre el agua regenerada propuesta.
- ❖ **Temperatura, pH, Cloro libre, Boro y Nutrientes** deben ser controlados con alta periodicidad, independientemente a que no presenten valores fuera de normativa.

Parámetros microbiológicos

- ❖ Se deben tomar acciones preventivas de gestión de riesgo y protección personal para evitar contaminación por patógenos y preservar la salud humana.

24

Agua regenerada a usar para riego

- ❖ La **dilución óptima** para la zona de estudio es **20% de lixiviado tratado** y 80% agua del acuífero Puelche (CE 3 a 4 mS/cm)
- ❖ **738.400 m³/año** de **agua regenerada** cubre el requerimiento de los cultivos en **130 ha**.

Impacto sobre los acuíferos

- ❖ **Regar con el agua regenerada propuesta bajo los requerimientos de agua del cultivo no generaría un impacto negativo** sobre las reservas hídricas subterráneas de la zona de estudio.

Reducción de agua del acuífero Puelche

- ❖ Se estima una reducción de **150.000 m³/año** de **agua extraída del acuífero Puelche, como aporte a la sustentabilidad del recurso de agua dulce** que cumple un papel esencial durante los periodos de déficit hídrico estacional y como abastecimiento de agua potable.

25

- ❖ **Evaluar la variabilidad de los parámetros del lixiviado tratado** a lo largo del tiempo y estudiarlos en relación a las **concentraciones admisibles en el ambiente**.
- ❖ **Medir nitratos** en el agua regenerada en la fracción del suelo y en las aguas subterráneas y superficiales.
- ❖ Realizar **ensayos en campo**, que busquen establecer el **efecto del agua regenerada, sobre la estructura del suelo a largo plazo**.
- ❖ **Medir y correlacionar la concentración de boro** en el agua regenerada con la tolerancia por parte de *Cynodon dactylon* y *Lolium multiflorum*.

26

- ❖ Estudiar el **efecto de las precipitaciones en la concentración de sales y nutrientes** en el suelo.
- ❖ Estudiar el posible **efecto beneficioso del reciclado de nutrientes** cuando se riega con lixiviado, compensando la necesidad de aplicar fertilizantes suplementarios.
- ❖ Establecer cuál es el mejor **momento para aplicar el agua para lixiviación de sales en el suelo**, con el fin de optimizar el recurso hídrico.
- ❖ Analizar alternativas de **especies de cobertura**, cuyo **consumo total de agua sea menor** a las usadas actualmente.

¡MUCHAS GRACIAS!