

**INVESTIGACIÓN
EN MARCHA. Evaluación de la actividad
investigadora.
TESIS DOCTORAL
CURSO 2025-26**

**DOCTORADO EN
MEDIO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD**

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
MEDIO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD**



Aplicación del Ozono Acuoso en Sistemas de Tratamiento de Aguas y Riego: Hacia una Gestión Hídrica y Fitosanitaria Sostenible en Chile

Doctorando: Marco Antonio Díaz Huenchuan

Directora o director (es): **Dra. María Belén Almendro-Candel**

Codirectora o codirector: **Dr. David Blanco Fernández (UTEM)**

Tutora o tutor: **Manuel Miguel Jordán Vidal**

Objetivo del Trabajo

Objetivo general

Examinar el ozono acuoso (O_3) como alternativa tecnológica transversal para el tratamiento y desinfección de aguas grises de baja carga y para el control fitosanitario de nematodos en cultivos bajo invernadero en Chile, integrando concentración, tiempo de contacto, transferencia de masa y eficiencia del sistema de entrega.

Tres frentes de trabajo, unidos por el O_3 acuoso como tecnología transversal:

01

Diagnóstico y modelación dinámica (WRc STOAT) de PTAR compactas con exceso de nutrientes

02

Tratamiento y desinfección de aguas grises de baja carga con O_3 a escala real (200 L)

03

Diseño de inyección de O_3 en riego por goteo y validación del control de nematodos fitoparásitos

Tesis por Compendio de Publicaciones

Artículo 1 • *Water (MDPI), 2024 — JCR Q2*

Exceso de nutrientes en PTAR/EDAR compactas: revisión, alternativa de solución y modelación dinámica (WRc STOAT) para su verificación.

Artículo 2 • *Water (MDPI), 2025 — JCR Q2*

Ozonización para tratamiento de aguas grises de baja carga: revisión y consideraciones experimentales para sistemas a pequeña escala.

Artículo 3 • *Frontiers in Agronomy, 2026 — JCR Q1*

Inyección directa continua de O₃ acuoso en riego por goteo: viabilidad técnica y validación preliminar para control de nematodos en tomate de invernadero.

Hilo conductor: el O₃ acuoso como tecnología transversal de gestión hídrica y fitosanitaria.

Tesis Completada: Trayectoria 2022-2026

2022-23

Diagnóstico de PTAR compacta y revisión bibliográfica inicial

2023-24

Ozono acuoso en aguas grises de baja carga: ensayos a escala real

2024-25

Riego por goteo con O₃ y diseño experimental de control de nematodos

2025-26

Tesis por compendio finalizada: depósito y preparación de defensa

- **3 artículos:** dos publicados (Water, 2024 y 2025) y uno en (Frontiers in Agronomy, 2026).
- **Checklist EDUMH de tesis doctoral (16 puntos):** verificado para la modalidad de compendio de publicaciones.

Diagnóstico y Reconfiguración de PTAR Compacta

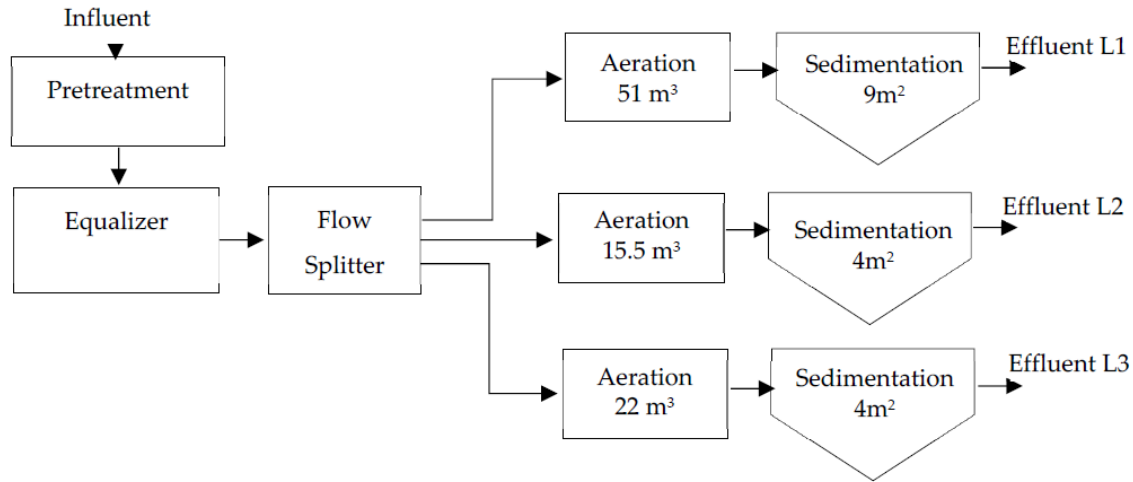


Diagrama del sistema existente instalado en paralelo a una planta de tratamiento de aguas residuales con aireación extendida

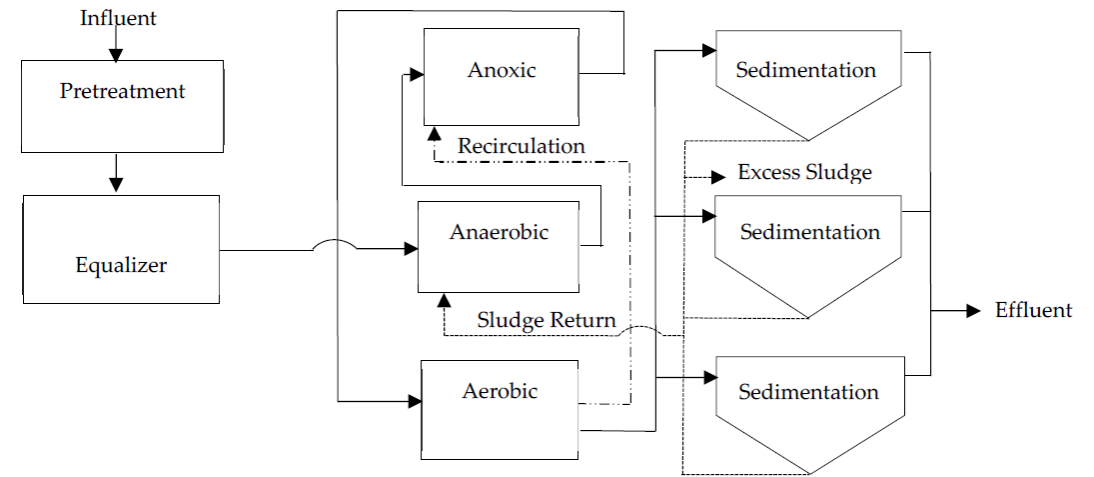


Diagrama de solución adoptada, imitando al modelo A2/O

- Afluente real con DBO_5/NT bajo (1,4): el efluente incumple NT (69,9–90 mg/L) y PT (11,4–12 mg/L).
- Modelación dinámica (WRc STOAT) evaluó 7 configuraciones BNR sobre tres líneas reales.
- UCT Modificado logró la mejor remoción (NT 70,2% · PT 16,5%), pero exige mayor obra estructural.
- El A^2/O redistribuido se identificó como la opción de menor impacto estructural (NT > 70% · PT > 10%).
- **Puente al Capítulo 2:** bajo DBO_5/NT muy bajo, ni la mejor configuración BNR basta — se abre la puerta al O_3 como AOP terciario.

Tratamiento de Aguas Grises de Baja Carga con O_3

$0,0009\text{ s}^{-1}$

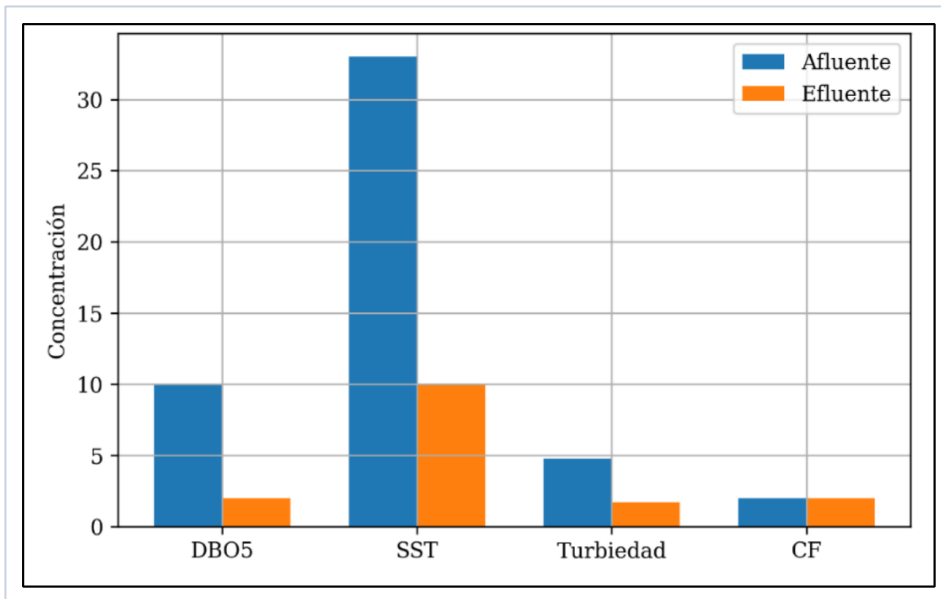
(a) kLa

$0,75\text{ mg/L}\cdot\text{min}$

Ct (5 min)

60 min (200 L, 10 g/h)

Estado estacionario



Afluente vs. efluente tras O_3 : DBO₅, SST, turbidez y CF (límites DS 40/2024).

- Reducciones logradas: DBO₅ > 80% · SST > 70% · turbidez > 65%.
- Cumple DS 40/2024 (MINSAL) para descarga de inodoros y riego superficial.
- El HGW de cocina no es tratable con esta configuración de baja potencia sin pretratamiento adicional.
- Costo operativo estimado: US\$ 2/mes · 0,23 kWh/día.



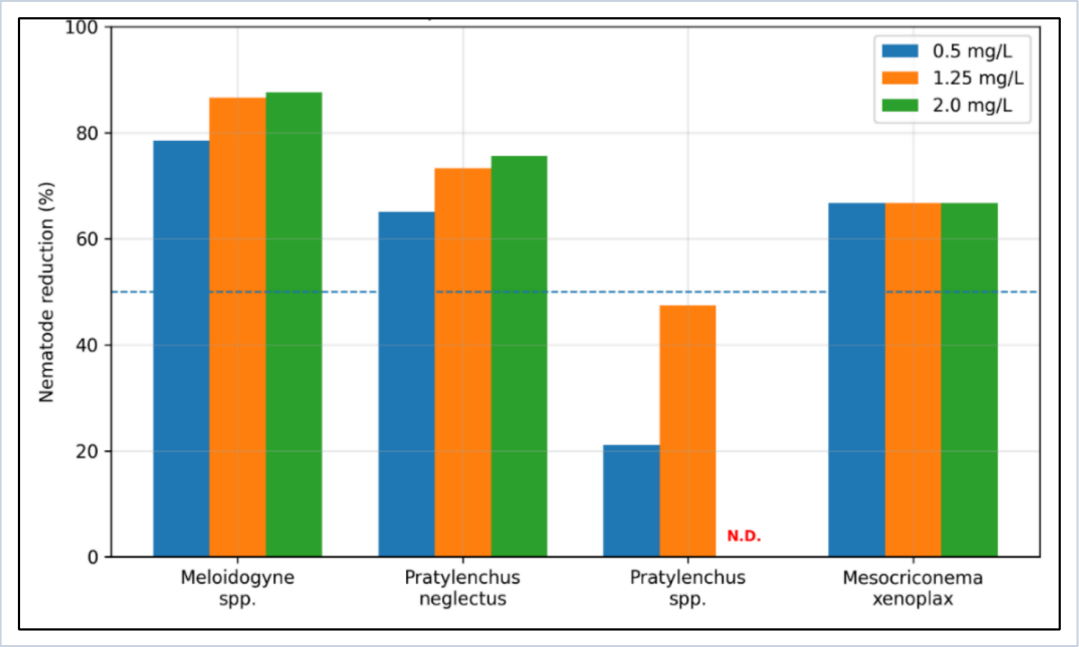
(a)



(b)

Equipo para ozonización de aguas grises de baja a carga: (a) Generador de O_3 10 g/h; (b) Estanque 200 litros con difusor de burbujas.

Riego por Goteo con O₃: Control de Nematodos



Reducción de población de nematodos por especie y concentración de O₃

- **Meloidogyne spp.:** –87,6% .
- **Pratylenchus neglectus:** –75,6% · Pratylenchus spp. no detectable a 2,0 mg/L.
- Mesocriconema xenoplax más resistente (reducción estable ≈ 66,7%).
- Sin diferencias significativas entre 0,5–2,0 mg/L — sugiere un umbral de saturación biológica.
- Observación exploratoria adicional: menor incidencia visual de mosca blanca y cáncer bacteriano, no cuantificada estadísticamente.

Progresión de Configuraciones de inyección de O₃ y concentraciones alcanzadas. La Fase 4 fue la utilizada en los experimentos de validación biológica.

Fase	Configuración	Generador	O ₃ en cabezal	O ₃ en emisor terminal	Pérdida (%)
1	Batch recirculación (2 × 3 g/h)	6 g/h total	0,25 mg/L	0,11 mg/L	66
2	Batch recirculación ampliada (+15 g/h)	21 g/h total	1,25 mg/L	0,16 mg/L	87
3	Inyección directa (40 g/h + PSA + MNB)	40 g/h	—	1,86 mg/L	15
4	Inyección directa (50 g/h + PSA + compresor)	50 g/h	2,35 mg/L	2,00 mg/L	15

Conclusión General

Los resultados sugieren que el O_3 acuoso puede ser una alternativa tecnológica potencialmente transversal para la gestión hídrica y fitosanitaria en Chile. Su eficacia depende, en los ámbitos estudiados, de la ingeniería del sistema de entrega y de la demanda de O_3 del sustrato tratado.

El parámetro Ct actúa como nexo conceptual entre los tres capítulos, permitiendo criterios de diseño cuantitativos y comparables.

Cap. 1

PTAR: A^2/O redistribuido como vía de menor impacto; abre la puerta al O_3 como AOP

Cap. 2

Aguas grises: O_3 cumple DS 40/2024 a bajo costo operativo en sistemas domésticos

Cap. 3

Riego: inyección directa sostiene dosis biocidas y reduce poblaciones de nematodos objetivo

Próximos Pasos

- **Defensa de la tesis:** fecha por confirmar con el programa de doctorado.
- **Líneas futuras:** validación multitemporal y mayor replicación del control de nematodos; evaluación de efectos del O₃ sobre la microbiota edáfica y de sistemas de aguas grises con mayor carga contaminante.

Tesis completa y en revisión del director de tesis.