



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTORAL EN INGENIERIA QUIMICA

**MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y
LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA JUGUERA**

Facundo Iturmendi

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTORAL EN INGENIERIA QUIMICA

**MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y
LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA JUGUERA**

Facundo Iturmendi

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2023

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería Química, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra.

La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería Química durante el período comprendido entre abril de 2009 y abril de 2023, bajo la dirección de la Dra. Patricia M. Hoch, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Química, y la codirección de la Dra. M. Soledad Díaz, Investigadora Principal de CONICET y Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Química.

Departamento de Ingeniería Química
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el.../.../..., mereciendo la calificación de
.....(.....)

A mi familia
Bauti, Jose y Dani
Por su amor incondicional que ilumina mi camino

AGRADECIMIENTOS

A mis directoras la Dra. Patricia Mónica Hoch y la Dra. María Soledad Díaz, por haberme dado la enorme oportunidad de realizar esta tesis. Por brindarme sus conocimientos, por la confianza, por el seguimiento dedicado a lo largo de todo este trabajo, por la contención y la calidez humana. Además, por guiarme y acompañarme desde mis primeros pasos en mi formación científica.

A la Planta Piloto de Ingeniería Química, por el soporte institucional dado para la realización de este trabajo. A la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por brindarme los medios necesarios para cumplimentar mi trabajo de tesis.

A la Empresa JUGOS S.A., que brindó la autorización y el apoyo logístico para realizar el estudio dentro de dicho establecimiento, y además me capacitó profesionalmente y enseñó las herramientas para trabajar en equipo.

A la Universidad Nacional de Río Negro, que durante mis años de trabajo en la Planta Piloto de Alimentos Sociales me permitieron seguir adelante con esta tesis.

A todos los miembros del CIT RÍO NEGRO, por el cariño que me han demostrado en tan poco tiempo, y por insistirme incansablemente para que termine esta tesis.

A mi esposa, Daniela, le agradezco en el alma por su paciencia, fuerza, amor e incondicionalidad, sos y serás el amor de mi vida.

A mis hijos, Josefina y Bautista, lo más maravilloso que me pasó en la vida, gracias por elegirme como papá.

A mis padres que me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mi perseverancia y mi empeño, los amo acá en la tierra como en el cielo.

A mi hermana, cuñado y sobrina, por ser unos compañeros inseparables de la vida que estamos transitando.

A mis abuelos, Bilma, Delma, Vicente y Pancho, que siempre me guiarán desde allá arriba.

A mi suegra, que siempre ha estado disponible cuando la necesitamos y nos ha acompañado en este camino.

Agradezco a toda mi familia, porque siempre hemos sido tan unidos y de cada uno he aprendido las cosas hermosas de la vida, y me han ayudado a empujar hacia adelante.

A mis amigas/os del PLAPIQUI y PPAS, Juan, Luis, Fede, Vani, Jime, Ceci, Marce, Pau, Pao, Nati, Feli, Diego, Mauri, Vir, Gabi, Clara, Caro, Iva, Mari y Ramón, por su apoyo incondicional y por todos los momentos compartidos.

Y a cada una de las personas que de una manera u otra me han ayudado en la realización de esta tesis.

RESUMEN

Cada vez es mayor la presión de la sociedad demandando una mejora del entorno ambiental, por lo que es necesario emprender una serie de acciones preventivas contra la contaminación en todas las áreas. Con el fin de preservar los recursos naturales para el presente y el futuro, logrando de esta manera un crecimiento de las agroindustrias de manera sustentable, el manejo integral de los residuos generados debe ser un objetivo central para lograr un aprovechamiento de los subproductos producidos durante el procesamiento de alimentos.

En la presente tesis se aborda el problema de los residuos sólidos y efluentes líquidos que se generan en una planta de elaboración de jugos durante el procesamiento de manzanas y peras para la obtención de concentrados. Se implementó un sistema de tratamiento por compostaje para los residuos sólidos que además permitió verificar que existe una mejora en las propiedades del suelo luego de aplicar esta enmienda orgánica en agricultura. Los efluentes líquidos se tratan biológicamente en un sistema de tratamiento por lagunaje. Para representarlo se formuló un modelo matemático biogeoquímico de gran tamaño basado en primeros principios, el cual fue calibrado con datos experimentales para resolver problemas de optimización dinámica. En ambos casos, se aporta nueva información científica para la bibliografía y se representan detalladamente los sistemas de tratamiento de residuos sólidos y efluentes líquidos de la planta de jugos utilizada como estudio de caso.

En cada capítulo de la tesis se presentan enseñanzas obtenidas de la resolución de los problemas diarios que se fueron presentando, junto con las estrategias adoptadas para tratar de resolver dichas dificultades, tratando de cumplir con las exigencias ambientales externas e internas.

Los estudios realizados fueron llevados a cabo en la empresa JUGOS S.A., la agroindustria más importante del Alto Valle de Río Negro, que abrió las puertas para el desarrollo de esta tesis doctoral, convirtiéndose de esta manera en una empresa pionera en el tratamiento integral de los residuos agroindustriales.

ABSTRACT

There is an increasing pressure from the society for environmental care during industrial operations. For this reason, it becomes necessary to undertake a series of preventive actions to minimize the amount of contaminated waste in all areas. To preserve the natural resources for the present and future, achieving a sustainable growth of agroindustries, the integral management of the waste generated must be a central objective, as well as being a mean to find utility of the by-products produced during the food processing.

This thesis addresses the problem of solid and liquid waste generated by a juice production plant during the processing of apples and pears used in the manufacturing of concentrated juices. A composting treatment system for solid waste was implemented which allowed for an improvement of soil properties when applied as organic amendment. On the other hand, for the liquid residues a lagoon treatment system is used to treat the wastewater. A large biogeochemical mathematical model based on first principles was formulated, which was calibrated with experimental data to solve dynamic optimization problems. New scientific information is provided, and solid waste and liquid effluent treatment systems are presented for the case study.

Each chapter of the thesis presents the lessons learned facing and solving day-to-day problems that arose during the operation of the plant, together with strategies adopted for the solution, while complying with external and internal environmental requirements.

All studies were carried out in JUGOS S.A. Company, the most important agroindustry of Alto Valle de Río Negro. To allow for carrying out the work required in this Thesis, they opened the installations of the company facilitating data and a site for experiments. This company became a pioneer in the integral treatment of agro-industrial waste.

ÍNDICE GENERAL

Prefacio	i
Agradecimientos	iv
Resumen	vi
Abstract	vii
Índice General	viii
Índice de Figuras	xii
Índice de Tablas	xviii
Capítulo 1. Introducción General	1
1.1. Estado de situación de la fruticultura en Río Negro	2
1.2. Panorama del sector agroindustrial en Río Negro	5
1.3. Problemas y tratamientos asociados a los residuos sólidos y efluentes líquidos	6
1.4. Objetivo de la tesis	11
1.5. Estructura de la tesis	12
1.6. Descripción y localización de la empresa JUGOS S.A.	14
1.7. Descripción del proceso productivo	15
1.8. Publicaciones	20
1.8.1. Publicaciones en revistas internacionales con referato	20
1.8.2. Publicaciones en revistas nacionales con referato	20
1.8.3. Trabajos libres presentados en congresos internacionales	21
1.8.4. Trabajos libres presentados en congresos nacionales	21
1.8.5. Trabajos libres presentados en reuniones científicas y tecnológicas	22
Capítulo 2. Modelo Matemático de un Tratamiento Biológico de Efluentes Líquidos de una Industria Juguera	24
2.1. Introducción	25
2.1.1. Objetivos	29
2.1.2. Hipótesis y predicciones	29

2.2. Validación del diseño de las lagunas de tratamiento	30
2.2.1. Generación de efluentes	30
2.2.1.1. Tratamiento primario	32
2.2.1.2. Tratamiento secundario	34
2.2.1.3. Desinfección	37
2.2.1.4. Parámetros de diseño	38
2.2.2. Verificación del diseño de las lagunas de tratamiento	40
2.2.2.1. Lagunas aeróbicas	40
2.2.2.2. Laguna facultativa	42
2.2.2.3. Equipos aireadores	45
2.2.3. Datos experimentales	49
2.3 Formulación del modelo matemático del sistema de tratamiento biológico	52
2.3.1. Microorganismos	63
2.3.1.1. Fitoplancton	63
2.3.1.2. Bacterias	64
2.3.1.3. Levaduras	64
2.3.2 Ciclos biogeoquímicos	65
2.3.2.1. Nitrógeno	65
2.3.2.2. Fósforo	67
2.3.2.3. Oxígeno disuelto	69
2.3.2.4. Demanda bioquímica de oxígeno	70
2.3.3 Evaluación estadística sobre el desempeño del modelo	71
2.4 Problema de estimación de parámetros para el modelo de lagunas de tratamiento	72
2.5 Resultados y discusión	74
2.6 Mejoras propuestas al sistema de tratamiento biológico	87
2.7 Problemas asociados al tratamiento industrial de efluentes líquidos	91
2.8 Conclusiones	99

Capítulo 3. Compostaje de Orujo de Manzana y Pera Provenientes de una Industria Juguera	100
3.1. Introducción	101
3.1.1. Objetivos	110
3.1.2. Hipótesis y predicciones	110
3.2. Materiales y métodos	110
3.2.1. Generación de residuos	110
3.2.2. Ubicación y armado de hileras	112
3.2.3. Métodos de análisis	118
3.2.4. Experiencia a gran escala	121
3.2.5. Ensayo con material estructurante	122
3.3. Resultados y discusión	126
3.3.1. Características de los materiales originales	126
3.3.2. Perfiles de temperatura y contenido de agua	128
3.3.3. Cambios en el pH y reducción del volumen	131
3.3.4. Análisis fisicoquímicos e indicadores de madurez	134
3.3.5. Compostaje a nivel industrial	137
3.3.6. Problemas asociados al tratamiento industrial de residuos sólidos	141
3.3.7. Perfiles de temperatura con material estructurante	147
3.4. Conclusiones	151
Capítulo 4. Alternativas para la Utilización de Compost de Pera en Agricultura	153
4.1. Introducción	154
4.1.1. Objetivo	157
4.1.2. Hipótesis y predicciones	157
4.2. Materiales y métodos	157
4.2.1. Sitio experimental	157
4.2.2. Enmienda orgánica utilizada	158

4.2.3. Diseño experimental	158
4.2.4. Análisis estadístico	163
4.3. Resultados y discusión	164
4.3.1. Parámetros físicos y químicos del suelo	164
4.3.2. Parámetros vegetales	171
4.3.3. Determinaciones en fruta cosechada	174
4.4. Conclusiones	177
Capítulo 5. Conclusiones	179
5.1. Conclusiones generales	180
5.2. Contribuciones	181
5.3. Trabajos futuros	182
5.3.1. Efluentes líquidos	182
5.3.2. Residuos sólidos	184
Bibliografía	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1: Ubicación de la empresa.	15
Figura 1.2: Esquema general del proceso productivo.	16
Figura 1.3: Diagrama de flujo del proceso de la empresa JUGOS S.A.	17

Capítulo 2

Figura 2.1: Vista aérea del predio en la localidad de Villa Regina, donde se encuentra el sistema de tratamiento de efluentes industriales por lagunaje.	31
Figura 2.2: Diagrama de flujo del tratamiento de efluentes de la empresa JUGOS S.A.	31
Figura 2.3: Diagrama simplificado del sistema de tratamiento de efluentes de JUGOS S.A.	33
Figura 2.4: Diagrama de la disposición de los equipos aireadores.	36
Figura 2.5: Foto aérea de las lagunas de tratamiento de efluentes de JUGOS S.A.	37
Figura 2.6: Medición de parámetros críticos en las lagunas de tratamiento.	49
Figura 2.7: Toma de muestras para las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas.	51
Figura 2.8: Precipitaciones diarias medidas por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).	51
Figura 2.9. Temperatura ambiente media diaria medida por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).	52
Figura 2.10. Radiación solar media diaria medida por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).	52
Figura 2.11: Variables de estado y procesos biogeoquímicos involucrados en el modelo matemático.	55
Figura 2.12: Perfil de concentración del fósforo orgánico a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	79
Figura 2.13: Perfil de concentración del fosfato a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	79

Figura 2.14: Perfil de concentración del nitrógeno orgánico a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	80
Figura 2.15: Perfil de concentración del oxígeno disuelto a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	80
Figura 2.16: Perfil de concentración del DBO a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	81
Figura 2.17: Perfil de concentración de bacterias a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	81
Figura 2.18: Perfil de concentración de levaduras a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.	82
Figura 2.19: Perfiles de concentración de oxígeno disuelto, DBO, bacterias y del caudal de entrada normalizados a lo largo del horizonte de tiempo.	83
Figura 2.20: Fruta procesada mensualmente en el período de estudio.	86
Figura 2.21: Manzana recibida mensualmente proveniente de chacra y galpón de empaque.	87
Figura 2.22: Equipo de aireación con hélice de $0,8 \text{ kg} \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$ (a) y equipo de aireación con helicoide de $1,2 \text{ kg} \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$ (b).	88
Figura 2.23: Equipo de aireación con hélice (a) y equipo de aireación con helicoide (b).	89
Figura 2.24: Datos reales de oxígeno disuelto con dos tipos de aireadores diferentes a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.	90
Figura 2.25: Datos normalizados de la DBO a la salida de las lagunas de tratamiento a lo largo de los meses de operación. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.	91
Figura 2.26: Datos reales de la DBO a la entrada de las lagunas de tratamiento a lo largo de los meses de operación. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.	91
Figura 2.27: Tensores metálicos rotos por efecto de la oxidación (a) y aireadores invertidos	93

en la laguna aeróbica (b).

Figura 2.28: Generación de espuma en la laguna de tratamiento.	94
Figura 2.29: Levantamiento de sedimentos en la laguna facultativa.	95
Figura 2.30: Enrojecimiento de la laguna de tratamiento por aparición de <i>Thiopedia rosea</i> .	95
Figura 2.31: Levantamiento de la geomembrana por rotura debido a malas maniobras operativas.	96
Figura 2.32: Reemplazo de geomembrana por varias roturas.	96
Figura 2.33: Distribución de costos de funcionamiento del sistema de tratamiento de efluentes.	98

Capítulo 3

Figura 3.1: Diagrama de flujo de la generación de residuos sólidos de la empresa JUGOS S.A.	111
Figura 3.2: Vista aérea del predio en la localidad de Chichinales, donde se realizó el compostaje.	112
Figura 3.3: Temperaturas medias mensuales y precipitaciones totales durante el período de ensayo.	113
Figura 3.4: Precipitaciones anuales en la zona del ensayo.	113
Figura 3.5: Hileras de orujo para el tratamiento de compostaje.	114
Figura 3.6: Dimensiones de las hileras de compost.	115
Figura 3.7: Pala cargadora Michigan R45C.	115
Figura 3.8: Rotovator para el volteo de las hileras.	116
Figura 3.9: Termómetro Testo para la medición de temperatura.	117
Figura 3.10: Hileras de orujo trapezoidales para el tratamiento de compostaje (a) y disposición longitudinal de todas las hileras de orujo (b).	122
Figura 3.11: Identificación alfanumérica para la trazabilidad del producto.	122
Figura 3.12: Mezclado de pilas de orujo de manzana con material estructurante.	123
Figura 3.13: Disposición final de las pilas en estudio con material estructurante.	124

Figura 3.14: Pila de compostaje control (a) y pila con material estructurante (b).	125
Figura 3.15: Registro diario de la temperatura en las pilas de compostaje.	125
Figura 3.16: Dispositivo Most para el registro de temperatura.	126
Figura 3.17: Perfiles de temperatura durante todo el proceso de compostaje. Las flechas indican los volteos realizados en cada una de las hileras durante la etapa termofílica. La línea punteada indica el valor límite de la etapa termofílica (45°C), mientras que la línea entera indica el valor mínimo para la reducción de patógenos (55°C). Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.	129
Figura 3.18: Perfiles de contenido de agua durante todo el proceso de compostaje. La línea punteada indica el valor ideal de humedad para el compost terminado (40%). Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	131
Figura 3.19: Perfiles de pH para el proceso de compostaje. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	132
Figura 3.20: Cambio de volumen de las hileras durante el compostaje. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	133
Figura 3.21: Hileras de compostaje a tiempo cero (a) y a 457 días del armado (b).	134
Figura 3.22: Germinación de semillas de ryegrass (a) y semillas de tomate (b).	136
Figura 3.23: Cantidad de fruta procesada y orujo generado en los últimos años.	137
Figura 3.24: Vista aérea de la disposición longitudinal de todas las hileras de orujo.	138
Figura 3.25: Vista satelital de la disposición longitudinal de todas las hileras de orujo.	139
Figura 3.26: Hileras de compostaje terminadas luego del procesamiento.	141
Figura 3.27: Deshidratación del orujo a compostar.	141
Figura 3.28: Rotura de paletas del rotovator.	142
Figura 3.29: Excesivas precipitaciones en el predio donde se realiza el compostaje.	143
Figura 3.30: Imagen satelital del predio donde se realizó el compostaje, antes de comenzar a realizar el ensayo y luego de un par de años de producción de compost.	143
Figura 3.31: Autoignición de las hileras de compostaje.	144
Figura 3.32: Distribución de costos de funcionamiento del sistema de tratamiento de	147

residuos sólidos.

Figura 3.33: Perfiles de temperatura durante parte del proceso de compostaje. La flecha indica el día donde se realizó el mezclado del orujo de manzana con el material estructurante para el armado de cada una de las pilas. La línea punteada indica el valor límite de la etapa termofílica (45°C), mientras que la línea entera indica el valor mínimo para la reducción de patógenos (55°C). Las pilas 1, 2 y 3 son el control sin material estructurante, mientras que las pilas 4, 5 y 6 son con material estructurante. Los valores son promedios de las mediciones. 148

Figura 3.34: Comparación entre los perfiles de temperatura generados entre el termómetro digital Testo y el dispositivo Most. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar. 150

Capítulo 4

Figura 4.1: Cuadro de perales donde se realizó el ensayo (a) y densidad de aplicación de 8 t.ha⁻¹ de compost (b). 158

Figura 4.2: Filas frutales desde el N°1 a N°8 donde se realizó el ensayo y la distribución de los tratamientos en filas y calles. 160

Figura 4.3: Extracción de muestra para determinar la densidad aparente (a), determinación de penetrometría (b) y determinación de infiltración básica (c). 162

Figura 4.4: Perfil de materia orgánica para todos los tratamientos durante los tres años de aplicación. TF, TC, CF y CC corresponde a "Testigo Fila", "Testigo Calle", "Compost Fila" y "Compost Calle". Los valores son promedios de tres mediciones \pm desvío estándar. 165

Figura 4.5: Perfil de infiltración del suelo con y sin tratamiento. Los valores son promedios de cuatro mediciones \pm desvío estándar. 167

Figura 4.6: Diámetro de tronco final para todos los tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar. 172

Figura 4.7: Altura de planta final para todos los tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar. 172

Figura 4.8: Área foliar para los distintos tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar. 173

Figura 4.9: Índice verde para los distintos tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar. 174

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1: Parámetros de diseño para el sistema de tratamiento de efluentes.	38
Tabla 2.2: Parámetros permitidos de vuelco (Libro Tercero del Código de Aguas, 1995).	39
Tabla 2.3: Parámetros críticos de diseño.	44
Tabla 2.4: Nomenclatura, descripción y unidades de los parámetros utilizados en el desarrollo del modelo matemático del sistema de tratamiento de efluentes de la empresa JUGOS S.A.	56
Tabla 2.5: Set de parámetros óptimos para el modelo de las lagunas de tratamiento.	75
Tabla 2.6: Error medio (EM), error relativo porcentual (ER) e índice de correlación (d) de las principales variables del modelo dinámico.	78
Tabla 2.7: Equivalencias entre períodos, meses y días.	83

Capítulo 3

Tabla 3.1: Composición de las pilas en estudio, siendo el \pm el error de la báscula de pesado.	124
Tabla 3.2: Características del orujo de manzana y pera. LC: Límite de cuantificación. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	127
Tabla 3.3: Cambio de volumen de las hileras durante el compostaje. Los valores son promedios de tres mediciones \pm desvío estándar.	133
Tabla 3.4: Análisis fisicoquímicos de los compost finales de manzana y pera. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	134
Tabla 3.5: Indicador de madurez utilizando semillas de ryegrass y tomate. Los datos son promedio de tres repeticiones.	136
Tabla 3.6: Generación de compost a partir de orujo de manzana y pera.	140

Capítulo 4

Tabla 4.1: Evolución de los parámetros del suelo con y sin tratamiento. Los valores son promedios de cuatro muestras \pm desvío estándar.	166
Tabla 4.2: Parámetros fisicoquímicos del suelo para los tratamientos realizados sobre las filas y calles durante los tres años de ensayo. ND: No detectado. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	168
Tabla 4.3: EPT del suelo para los tratamientos realizados sobre las filas y calles durante los tres años de ensayo. Comparación con valores límites de referencia en suelos (SENASA, 2011). ND: No detectado. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.	170
Tabla 4.4: Análisis fisicoquímicos de las peras cosechadas sometidas a los distintos tratamientos. ND: No detectado. Los valores son promedios de las muestras \pm desvío estándar.	175

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. ESTADO DE SITUACIÓN DE LA FRUTICULTURA EN RÍO NEGRO

En los últimos 60 años la población mundial ha tenido un incremento exponencial, y según datos estadísticos de la ONU (Perspectivas de la Población Mundial, 2019), para 2050 habrá unos 10.000 millones de personas en la Tierra. Este aumento será acompañado de diferentes necesidades que deberán ser cubiertas, siendo la alimentación junto con la provisión de agua potable las más importantes. Para abastecer esta demanda creciente será indispensable un aumento productivo, que ineludiblemente generará una gran cantidad de residuos, que deberán ser tratados adecuadamente para evitar un impacto negativo sobre el ambiente.

Las agroindustrias tienen un papel fundamental para atender estas necesidades; sin embargo, las mismas por lo general hacen un uso desmedido de los recursos, agotando en gran medida los nutrientes que se encuentran en el suelo, generando volúmenes exagerados de residuos sólidos y contaminando los cursos hídricos donde se vierten los efluentes industriales. Según estudios del INTA, un suelo del Alto Valle de Río Negro debe presentar al menos un 5% de materia orgánica para que sea óptimo en la producción frutihortícola (Sepúlveda, 2018). Sin embargo, como es de esperar, no sólo no se alcanza este porcentaje, sino que además la materia orgánica se pierde continuamente por malas prácticas agrícolas, y esto puede ocasionar en el corto plazo el comienzo de un proceso de desertificación. Como sociedad debemos proponernos trabajar arduamente para mantener y aumentar la materia orgánica en los suelos, ya que es principalmente un factor limitante de la fertilidad de los mismos, pero además es clave para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

Todas las industrias alimentarias deberían esforzarse diariamente en trabajar sobre la base de las Buenas Prácticas Industriales, donde la minimización de la generación de residuos se vuelve clave a la hora de reducir los costos operativos. Sin embargo, las industrias siempre generarán desechos agroindustriales durante el procesamiento de los alimentos, en menor o mayor medida, y analizando el contexto actual y de responsabilidad empresarial, no es aceptable desde ningún punto de vista evitar su tratamiento. Hay que destacar que no solo es importante el compromiso de las empresas para trabajar sustentablemente, sino que además debe tenerse en claro que el principal destino de la producción del Alto Valle del Río Negro son los diversos mercados del mundo, quienes actualmente están exigiendo que sus proveedores sean responsables ambientalmente.

El Alto Valle del Río Negro es una región que se encuentra en el norte de la Patagonia Argentina irrigada por el río Negro, el cual ha permitido el desarrollo poblacional y productivo de la Provincia. La fruticultura es la principal actividad económica de la región caracterizándose por la producción de frutas de pepita (manzanas y peras), frutales de carozo y uva.

La producción de manzanas y peras en Argentina durante 2017 (SENASA, 2017) fue de aproximadamente 1 millón de toneladas, con una distribución prácticamente en partes iguales. En lo que respecta a la producción de peras, alrededor del 52% se destina a exportación, el 18% a mercado interno y el 30% a la industria. Por su parte, para la producción de manzanas, el 17% se exporta, el 46% va a mercado interno y el 37% a industria. El 85% de la producción de manzana y el 75% de la pera se concentra en el Alto Valle de Río Negro (CAFI, 2014), mientras que el porcentaje restante es producido en el Valle de Uco

(Mendoza), 25 de Mayo (La Pampa) y el Valle de Tulum (San Juan). Con respecto a la producción frutícola específicamente en la provincia de Río Negro, el 53% corresponde a manzana y el 47% a pera. Del porcentaje relacionado con la manzana, el 60% se destina al consumo en fresco mientras que el 40% se industrializa. Por su parte, el 72% de la pera se destina al consumo en fresco y el 28% se deriva a industria. De estos porcentajes que se industrializan de las manzanas y peras, aproximadamente el 70% se emplea en la producción de jugos concentrados, mientras que el 30% restante se destina principalmente a la producción de caldos de sidra. De este procesamiento de la fruta que no se consume en fresco, por un lado, se generan entre un 20 y 40% de residuos sólidos (orujo o bagazo) dependiendo de la industria, y se utilizan de 2 a 6 litros de agua por cada kilogramo de fruta a procesar, generando un efluente industrial altamente contaminado con materia orgánica, al igual que en otras agroindustrias (Sydenham *et al.*, 1995; Acar *et al.*, 1998; Ozbas *et al.*, 2006; Shalini & Gupta, 2010; Camila *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2018).

La fruticultura de manzanas y peras en la provincia de Río Negro ha tenido períodos de bonanza y crisis con una clara tendencia de pérdida de competitividad en los últimos años, asociada con la disminución en la cantidad y calidad de la fruta cosechada. El aumento de los costos en dólares de la producción también contribuye a la pérdida de rentabilidad (Libro Blanco de la Fruticultura, 2018). El sector está atravesando un punto de inflexión, siendo necesario trabajar activamente con el fin de brindar oportunidades para hacer sustentable la actividad. Para lograrlo, es necesario desarrollar modelos que contemplen la responsabilidad social y el cuidado ambiental, siendo la innovación tecnológica una herramienta adecuada para tal fin. Cualquier

incorporación tecnológica debe ser adaptada a la realidad regional, donde la investigación científica es clave para su utilización y optimización.

1.2. PANORAMA DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL EN RÍO NEGRO

Las empresas del Alto Valle de Río Negro, están sufriendo la mayor crisis de la historia (Diario Río Negro, 16/09/2018), con pérdidas severas durante los últimos años y una rentabilidad negativa, debido principalmente al incesante aumento de costos a nivel nacional que ha licuado la mejora que experimentó el tipo de cambio en los últimos años, lo que no permite que las empresas sean competitivas internacionalmente (Diario Río Negro, 11/09/2019). La industria de los jugos concentrados de fruta atraviesa dificultades aún mayores, ya que a los altos costos de producción hay que sumarle la caída del precio internacional del producto, ocasionando que dichas empresas queden fuera de competencia y enfrenten una crisis terminal (Diario Río Negro, 17/06/2017; Diario Chile Alimentos, 15/09/2019; Diario InfoAgro, 18/09/2019). Los ítems de mayor impacto en el cuadro de costos de los establecimientos concentradores de jugos son la mano de obra, energía eléctrica y gas.

La producción mundial de jugo concentrado es aproximadamente de 1.500.000 mil toneladas. El principal productor es China, con una producción de 700.000 toneladas, seguido por Polonia con una producción de 450.000 toneladas, mientras que el resto de los países no supera las 100.000 toneladas anuales. La producción anual argentina de jugo concentrado de manzana promedia las 55.000 toneladas, en tanto que a partir de la pera sólo se elaboran 30.000 toneladas de jugo concentrado por año (Diario Río Negro, 11/09/2019). Las variaciones en la producción de jugo concentrado tienen directa relación con la

disponibilidad de fruta para molienda y con el precio internacional del jugo. El aumento de la oferta mundial, principalmente por el extraordinario crecimiento de China como productor y exportador, implica para Argentina mayores exigencias en cuanto a calidad, así como la necesidad de buscar alternativas para reducir los costos.

En este complejo marco económico, el tratamiento de los residuos de las agroindustrias pasó a ser, en el mejor de los casos, un tema secundario, ya que los costos de inversión y mantenimiento de dichos sistemas son muy altos y prácticamente inaccesibles para dichas empresas. Por tal motivo, es necesario abordar e implementar estudios científicos con el fin de simular y optimizar los recursos necesarios para el tratamiento de los residuos sólidos y líquidos generados en la producción de los jugos concentrados de manzana y pera.

1.3. PROBLEMAS Y TRATAMIENTOS ASOCIADOS A LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y AFLUENTES LÍQUIDOS

La industria de los jugos concentrados de manzana y pera del Alto Valle de Río Negro genera grandes volúmenes de residuos sólidos y efluentes líquidos durante el procesamiento (Laos, 2013; Amor *et al.*, 2012).

Con respecto a los residuos sólidos, los mismos están constituidos principalmente por cáscaras, semillas, pedúnculos y restos de pulpa, que poseen una concentración elevada de carbohidratos y fibra, y bajo contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, vitaminas y sales, por lo que una disposición inadecuada de los mismos puede dar origen a serios problemas de contaminación ambiental, constituyéndose además en un foco de concentración de plagas, y además representa una gran pérdida de un recurso con valor

agrícola. Los principales efectos de la disposición inapropiada incluyen una degradación anaeróbica de la materia orgánica, generando como resultado la emisión de metano, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, entre otros gases, que no sólo producen contaminación, sino que también pueden contribuir con el calentamiento global (Frioni, 1999).

Los nuevos procesos de interés científico y tecnológico que se puedan desarrollar para aprovechar los residuos orgánicos de las industrias frutihortícolas de la región, permitirán, por un lado, disminuir la contaminación ambiental, y por otro lado, reducir los costos de producción de los productos primarios (jugos concentrados, sidras, purés, pulpas, etc.), al incorporar productos de mayor valor agregado a partir de los subproductos generados.

Uno de los problemas ambientales de las explotaciones agrícolas son los residuos orgánicos que se generan, como lo son los restos de poda, cosecha, post-cosecha, estiércol, pasto, fruta caída, entre otros. Habitualmente y por diversos factores, como la falta de tecnologías adecuadas a las necesidades de los productores, apoyo técnico para encontrar e implementar alternativas más amigables con el ambiente, disponer de un espacio adecuado, entre otros, el destino final de estos residuos es la quema, el enterramiento o el abandono del material a la intemperie hasta su descomposición (Pérez *et al.*, 2002; Kulcu & Yaldiz, 2004; Del Valle *et al.*, 2006; Luna Fontalvo *et al.*, 2013; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013).

Una posible solución para el aprovechamiento de los residuos de industrias agroalimentarias es la aplicación de la biotecnología, utilizando microorganismos que degraden la biomasa vegetal y completen el ciclo del carbono. Entre estos

métodos de gestión de residuos, el compostaje ha ganado mayor atención dado por un lado los bajos costos operativos y por otro lado, por los altos beneficios sociales y ambientales. El compostaje es un proceso biológico que permite la degradación aeróbica de residuos orgánicos por acción de microorganismos. Con un adecuado tamaño de partícula, aireación, humedad, temperatura, relación C/N y pH es posible obtener un material homogéneo y estable, compost maduro, permitiendo además el reciclado e incremento en la disponibilidad de nutrientes asimilables en el suelo (Kulcu & Yaldiz, 2004; Zayed & Abdel-Motaal, 2005; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013; Román *et al.*, 2013; Cruz *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2017).

Si bien existe abundante bibliografía respecto del empleo de desechos de la agroindustria en la producción de compost (Arrieche & Mora, 2005; Quiroz Guerrero & Pérez Vázquez, 2013; Martínez *et al.*, 2017; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013), y algunos trabajos de investigación en donde se utilizan orujos de manzana y pera derivados de la industria jugueras y sidreras, los cuales están centrados en el co-compostaje de los mismos con residuos sólidos de tabaco (Kopčić *et al.*, 2014), estiércol porcino (Jiang *et al.*, 2014; Mao *et al.*, 2017), lodos de depuradora (Pan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021), orujos de frutas (plátano, naranja y kiwi) y verduras (papa, repollo, y zanahoria) (Ghinea *et al.*, 2019) y con estiércol de caballo (Hank & Hrebeckova, 2023). Sin embargo, no se ha encontrado información relacionada con la factibilidad de elaborar compost empleando orujo de manzana y de pera sin ser mezclados con otros residuos agroindustriales.

En el caso del aprovechamiento de los orujos de manzana y pera como mejoradores de suelo, se debe realizar un riguroso tratamiento para obtener el

compost evitando de esta manera un impacto ambiental. En consecuencia, esta industria a través de la Gestión de Residuos abre oportunidades de presentar a la región nuevos productos que se podrán incorporar a la cadena comercial de la actividad más desarrollada de la Alto Valle de Río Negro. Unos de los objetivos de esta tesis es evaluar una alternativa accesible para reutilizar los residuos de la agroindustria alimentaria ligada a la extracción de jugos de frutas de pepita, evitando la disposición final de estos residuos. Dentro de la amplia gama de alternativas posibles para el aprovechamiento de estos subproductos, se pueden destacar el desarrollo de ingredientes para alimentación humana, procesamiento térmico (generación de biogás, incineración), extracción de pectina y producción de etanol vía fermentación, entre otros (Kennedy *et al.*, 1999). Sin embargo, es necesario un acondicionamiento de los orujos previo a su tratamiento que en la actualidad la empresa no puede realizar. En este sentido, el procesamiento de compostaje para obtener una enmienda orgánica es la opción de mayor factibilidad técnica y económica para su implementación por parte de la empresa JUGOS S.A. (Iturmendi, 2015). En virtud de la problemática ambiental que se establece en torno a la acumulación de residuos sólidos de alto contenido orgánico se espera obtener una enmienda orgánica que ofrezca ventajas en su aplicación. Este tipo de mejoradores de suelo presentan ventajas respecto de los fertilizantes químicos, ya que estos últimos pueden ocasionar un desequilibrio ambiental sino son usados racionalmente.

Por otro lado, con respecto a los residuos líquidos, es preocupante la elevada carga orgánica que contienen los efluentes industriales de las jugueras y sidreras de la región, representando en algunos casos equivalencias con los generados por una población de 250.000 habitantes (Diario Río Negro, 04/01/2001). El

vertido de estos efluentes líquidos sobre los desagües que luego desembocan en el río Negro, están generando una contaminación de grandes magnitudes, siendo alarmante ya que desde este curso hídrico se abastece de agua dulce a toda la población.

Las industrias de jugos concentradas de frutas utilizan grandes volúmenes de agua para el lavado y el procesamiento de las mismas (Amor *et al.*, 2012; Samborska *et al.*, 2019). A nivel internacional existen múltiples opciones para el tratamiento de estos efluentes (lodos activados, osmosis inversa, ultrafiltración, etc.). Sin embargo, son sistemas muy costosos e imposibles de implementar en las industrias jugueras del Alto Valle de Río Negro, debido principalmente a la situación económica que están enfrentando. En este sentido, la mayor parte de las agroindustrias regionales optan por implementar los antiguos sistemas de tratamiento por lagunaje, que presentan como mayor desventaja la gran superficie necesaria para ser construidos. Sin embargo, una de las problemáticas que repercuten negativamente en su funcionamiento, es el desconocimiento en los procesos que intervienen durante la degradación de la materia orgánica. En este sentido, la implementación de un modelo matemático para representar cada una de las reacciones que se producen en el sistema será de mucha ayuda para la operación diaria de estos sistemas de tratamiento, además de contribuir con la adecuación y vertido de un efluente industrial que cumpla con los parámetros permitidos de vuelco y evitar, de esta manera, la contaminación del río Negro.

1.4. OBJETIVO DE LA TESIS

En esta tesis se presenta el desarrollo de una metodología que permite reducir los riesgos para la salud de la población y el impacto ambiental debidos a la calidad y cantidad de los efluentes líquidos y los residuos sólidos generados durante el procesamiento de manzanas y peras para la obtención de jugos concentrados del Alto Valle de Río Negro.

Con relación a los **efluentes líquidos**, se propone realizar una validación del diseño de las lagunas de tratamiento de efluentes industriales que la empresa JUGOS S.A. ha construido en el año 2007. Para ello se desarrollarán los cálculos matemáticos basados en la bibliografía (Eckenfelder, 2001), que permitan verificar el cumplimiento de los parámetros permitidos de descarga que el Departamento Provincial de Aguas (DPA) exige para este tipo de efluentes. A su vez, se desarrollarán modelos matemáticos dinámicos para este sistema de lagunas de tratamiento, los cuales serán validados mediante la resolución del problema de estimación de parámetros, permitiendo, entre los objetivos propuestos, aportar información para la operación de las mismas. Más allá de las grandes ventajas que ofrecen los algoritmos de simulación y optimización ajustados para casos reales, así como la gran cantidad de modelos desarrollados de sistemas de procesos, son muy escasos los modelos hallados en la literatura para los problemas de lagunas de tratamiento biológico. La mayoría de los modelos desarrollados en la bibliografía están relacionados con los sistemas de tratamiento por lodos activados.

Con respecto a los **residuos sólidos**, se pretende demostrar que el compostaje es una opción factible y económicamente atractiva para la producción de

enmiendas orgánicas. Para ello se empleará un tratamiento de los orujos de manzana y pera mediante un sistema de pilas con volteos para intentar obtener una reducción significativa de los residuos generados durante el proceso productivo para la obtención de jugos concentrados. Así mismo, se aplicará una estrategia para lograr una optimización de los tiempos de procesamiento durante el compostaje mediante el agregado de residuos de la industria maderera (estructurante).

Se intentará demostrar que, combinando la teoría y la práctica, es factible alcanzar una cadena de producción con mayor sustentabilidad, permitiendo disminuir los impactos negativos que las industrias generan sobre el ambiente y dándole un valor agregado a los residuos que hoy contaminan.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis está organizada en tres partes. El presente capítulo donde se introduce el rol fundamental que cumple la agroindustria, principalmente en nuestro país y ahondando aún más en la problemática particular de la región del Alto Valle de Río Negro. Además, se describe la dificultad asociada a los residuos orgánicos, donde se realizó principal énfasis en la empresa juguera JUGOS S.A., de la que se detalla el proceso productivo.

A continuación, en el capítulo 2, se presenta la planta de tratamiento de efluentes industriales de la empresa JUGOS S.A., en donde se detallan los tratamientos primarios y secundarios que tiene el sistema, y se verifican los parámetros de diseño de las lagunas en cuestión mediante la utilización de la metodología desarrollada por Eckenfelder (2001). Luego, se formula un modelo matemático dinámico basado en primeros principios, el cual es validado

mediante la resolución de un problema de estimación de parámetros. En este modelo matemático se han formulado balances de masa dinámicos para los principales componentes de cada una de las lagunas de tratamiento, originando un sistema complejo de ecuaciones a derivadas parciales y algebraicas que fueron resueltas en la plataforma gPROMS (PSEnterprise, 2009). Además, se colaboró en la resolución de la problemática presentada en la laguna de tratamiento aeróbica, mediante la mejora de la transferencia de oxígeno al cuerpo de agua. Esto arrojó resultados favorables en el funcionamiento de todo el sistema de tratamiento de efluentes. Finalmente, en la última sección del capítulo se mencionan algunos de los problemas que surgieron durante el desarrollo del trabajo de esta tesis, siendo algunos de ellos resueltos mientras que para otros se pueden generar nuevas líneas de investigación y desarrollo para la empresa.

Por su parte, en los capítulos 3 y 4, se presentan diferentes ensayos realizados con los residuos sólidos generados en la empresa JUGOS S.A. En el capítulo 3 se demuestra que el compostaje es una alternativa atractiva económicamente para el tratamiento de todos los residuos sólidos, disminuyendo de esta manera el impacto ambiental y logrando una reducción considerable de la cantidad de sólidos generados durante el procesamiento para la obtención de jugos concentrados de manzana y pera. También se demuestra que la utilización de material estructurante es una alternativa para reducir considerablemente el tiempo de procesamiento, ya que se modifican las condiciones de operación en la etapa termofílica, optimizando de esta manera el tiempo de obtención de la enmienda orgánica. Al igual que en el capítulo anterior, en la última sección se mencionan algunas de las problemáticas que surgieron durante el desarrollo del

trabajo de esta tesis. En el capítulo 4, se presentan los resultados de aplicar estos compost en la agricultura, donde se plasman los beneficios alcanzados.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan conclusiones, una síntesis de las principales contribuciones científicas realizadas en esta tesis y trabajos futuros de investigación.

1.6. DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA EMPRESA JUGOS S.A.

JUGOS S.A. es una empresa localizada en Villa Regina fundada en el año 1976 por iniciativa de un grupo de productores con espíritu emprendedor, que entendían necesario para el desarrollo de la región contar con una empresa con capacidad para procesar de manera industrial el volumen de manzanas y peras que no encontraba ubicación en los mercados de fruta fresca, para así obtener jugos concentrados de alta calidad que satisficieran los más exigentes requerimientos de mercados interno y externo.

La ubicación de la planta industrial se muestra en la Figura 1.1, en la localidad de Villa Regina, provincia de Río Negro (39°05'57.4" S y 67°02'53.7" O), que es a su vez una de las zonas de mayor producción de frutas frescas del Alto Valle de Río Negro y Neuquén. A partir de los 90, la empresa logró un crecimiento sostenido tanto en volúmenes como en la calidad de la producción, todo esto como resultado de la inversión en tecnología, la capacidad de sus recursos humanos y la coherencia en las decisiones políticas de sus accionistas.



Figura 1.1: Ubicación de la empresa.

1.7. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

La planta de jugos concentrados cuenta con una capacidad instalada para procesar diariamente 1.000 toneladas de materia prima, lo que representa una producción diaria de 560.000 galones (equivalente a 160 toneladas) de jugo concentrado, el cual es envasado utilizando diferentes tipos de envases y almacenado en cámaras de frío hasta su despacho. En temporada alta, que corresponde a los primeros cinco meses del año (enero a mayo), trabajan cerca de 175 empleados entre temporales, operarios, técnicos y profesionales. La empresa cuenta con el siguiente equipamiento para la producción de los jugos concentrados: moledora, turbo extractores, prensa continua, calentadores de pulpa, enfriadores de pulpa, separadores centrífugos, preconcentradores, ultrafiltros y concentradores. Además, la planta es abastecida de vapor generado en las calderas pirotubulares que utilizan gas natural y el agua empleada en las instalaciones proviene de pozos propios ubicados en el predio. El esquema general del proceso productivo se muestra en la Figura 1.2, mientras que el diagrama de flujo completo se puede apreciar en la Figura 1.3.

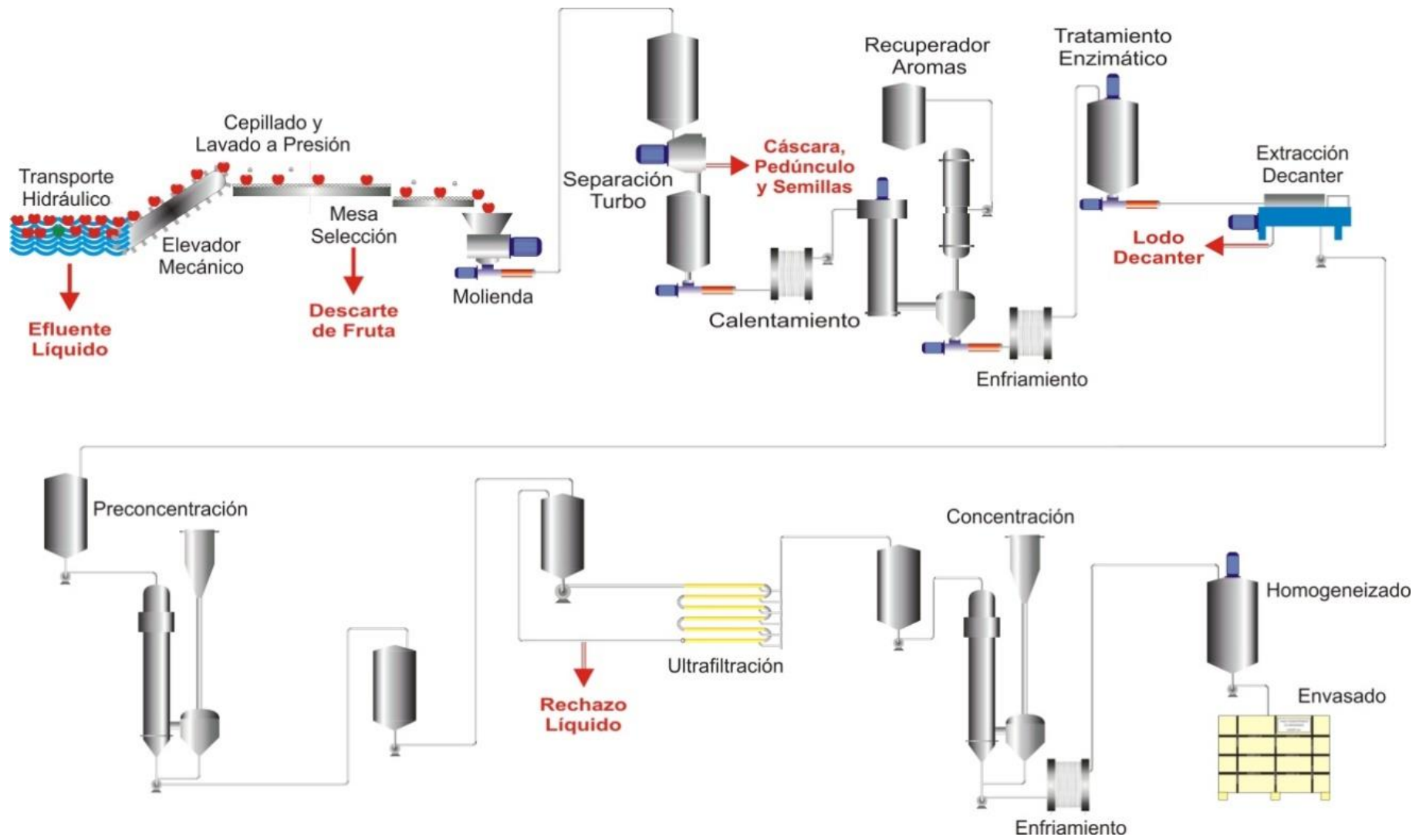


Figura 1.2: Esquema general del proceso productivo.

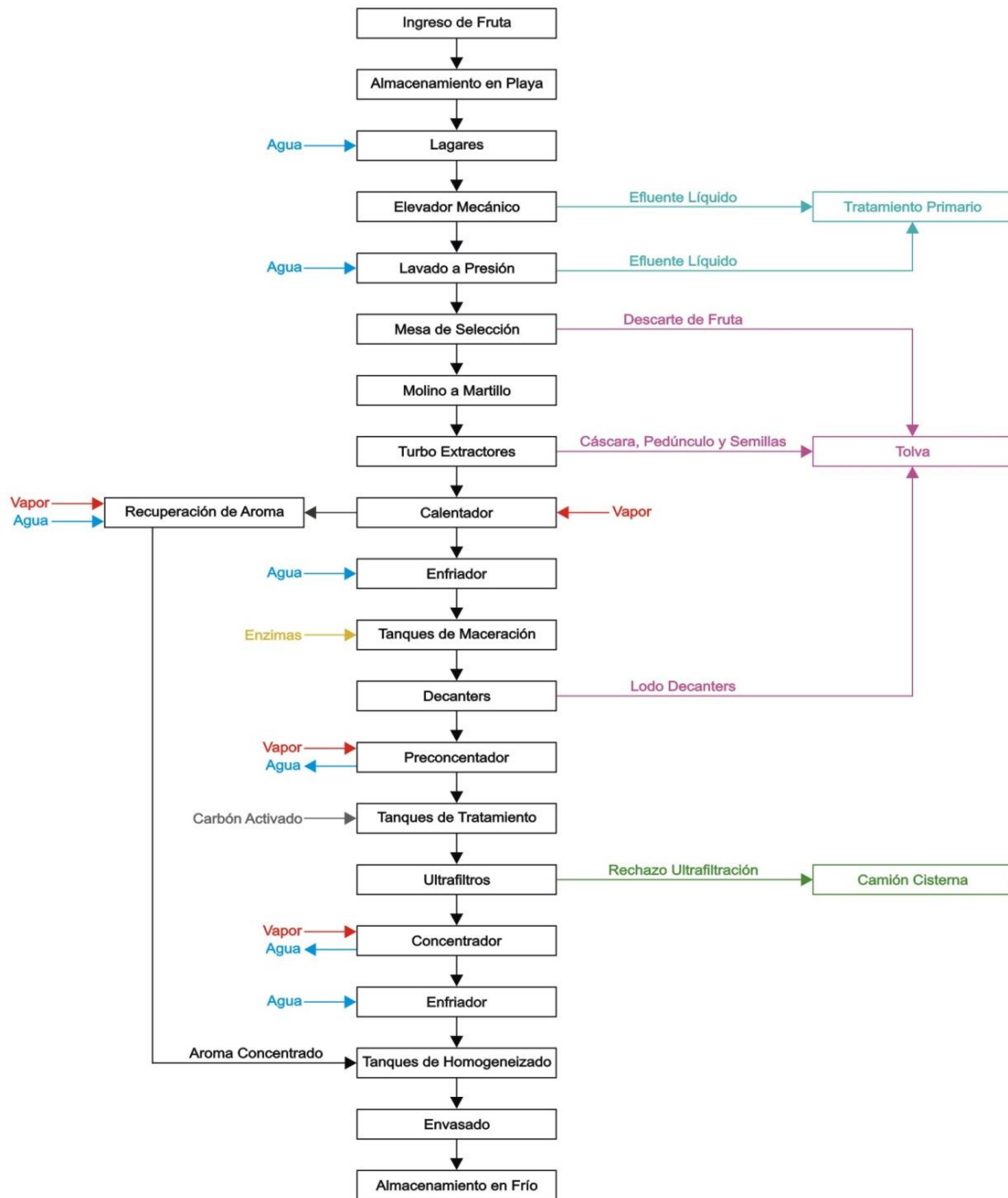


Figura 1.3: Diagrama de flujo del proceso de la empresa JUGOS S.A.

La temporada alta de producción coincide con el período de cosecha de la fruta que comienza en enero y finaliza en mayo. El resto del año se trabaja a mínima capacidad dependiendo el funcionamiento de los Galpones de Empaque para procesar la fruta que se exporta. El proceso productivo genera aproximadamente unas 200 t.día⁻¹ de residuos sólidos (orujos), constituidos principalmente por

restos de frutas, cáscaras, semillas, pedúnculos y paredes celulares. Por su parte, el caudal máximo de efluentes líquidos generados ronda los 250 m³.h⁻¹ con una concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) media de 2.000 mg.L⁻¹.

Como se mencionó anteriormente, la planta tiene una capacidad de procesamiento de 1.000 toneladas por día. La fruta que ingresa es almacenada en la playa de acopio. La materia prima ingresa en cajones (bins) de madera o a granel mediante camiones volcadores, provenientes de chacras, galpones de empaque o receptoras de fruta, donde es inspeccionada por calidad e inocuidad. Una vez definido el plan de producción, donde se determina el tipo y variedad de fruta a procesar, la misma es volcada a los lagares con agua para ser transportada, por medio hidráulico, hasta la zona de molienda. En este sector se realiza un riguroso lavado a presión y enjuague con agua limpia, asegurando de esta manera la correcta higiene del fruto que ingresa al molino. En este lugar se genera el residuo líquido del proceso, el cual es conducido por medio de canaleras al tratamiento primario de efluentes. La fruta ya limpia ingresa a una mesa de selección donde se retira la que se encuentra defectuosa, mientras que el resto ingresa a un molino tipo martillo para ser triturada y convertirse en una pulpa homogénea. Este descarte de fruta corresponde el primer residuo sólido del proceso y es transportado por medio de un tornillo sinfín a la tolva de almacenamiento para luego ser retirado por un camión hasta el sector de compostaje. En la siguiente etapa del proceso se elimina de la fruta molida la cáscara, pedúnculo y semillas que son desechadas por medio de turbo extractores, siendo este el segundo residuo sólido del proceso que también es transportado hasta la tolva de almacenamiento. La pulpa obtenida es calentada y

posteriormente desaromatizada. Los componentes volátiles tales como esteres, aldehídos y alcoholes que se evaporan en esta etapa del proceso, son recuperados, condensados, concentrados y enfriados con agua helada. Este aroma así obtenido es directamente envasado, siendo el primer producto que se obtiene en la línea de producción. Luego se realiza el tratamiento enzimático a la pulpa a través del agregado de enzimas a los tanques, que cumplen la función de mejorar la obtención de jugo en el proceso posterior. La extracción de jugo se realiza por medio de separadores centrífugos del tipo decanters que aseguran una extracción superior al 75%. En esta operación se genera el último residuo sólido que corresponde a los restos de pulpa de fruta a la cual se le realizó la extracción de jugo. El jugo obtenido de la etapa anterior es preconcentrado en un equipo evaporador tubular de múltiples efectos, hasta aproximadamente 20° Brix (cantidad aproximada de azúcares), para luego ser acondicionado en tanques de tratamiento donde se agrega carbón activado que ayudará al proceso de filtrado del jugo. En la etapa de filtración se utilizan ultrafiltros que tienen el objetivo de retirar todos los sólidos contenidos en el jugo junto con el carbón activado agregado. De esta manera, se obtiene un jugo clarificado de color ámbar, que debe ser enviado a la etapa de concentración final. Cabe destacar que durante este proceso se genera un residuo semilíquido, rechazo de ultrafiltración, que no puede ser enviado al sistema de tratamiento de efluentes por presentar una concentración de DBO muy elevada (20 veces superior al parámetro de diseño), por lo que es almacenado en tanque y reprocesado durante la temporada baja de producción en columnas de intercambio iónico para la obtención de un subproducto comercial.

La concentración final del jugo filtrado y decolorado es realizada en un equipo evaporador tubular de múltiples efectos donde se realiza la concentración final a 70° Brix. En este equipo se realizan rigurosos controles de temperatura en los diferentes efectos para garantizar la muerte térmica de los microorganismos, sin alterar las características organolépticas del producto final. El jugo clarificado concentrado es enfriado y homogeneizado en tanques batch de 110.000 litros, quedando a la espera del control del departamento de calidad, que verifica el cumplimiento de las especificaciones, para proceder a la etapa de envasado en distintos tipos de contenedores dependiendo del cliente. Finalmente, el producto terminado es almacenado en cámaras frigoríficas a temperaturas inferiores a los 5°C hasta su despacho.

1.8. PUBLICACIONES

Todos los capítulos de esta tesis fueron publicados y presentados parcialmente en diferentes congresos, revistas y jornadas, que son detallados a continuación:

1.8.1. Publicaciones en revistas internacionales con referato

Iturmendi, F.; Estrada, V.; Ochoa, M.P.; Hoch, P.M. & Díaz, M.S. 2012. Biological wastewater treatment: Dynamic global sensitivity analysis and parameter estimation in a system of waste stabilization ponds. Computer Aided Chemical Engineering 30, pp. 212 - 216.

1.8.2. Publicaciones en revistas nacionales con referato

Maldonado, J.F.; Agüero, M.S.; Buglione, M.B.; Iturmendi, F.; Filippi, M.V. & Martínez, D.A. 2021. Pear and apple pomace compost in the production of

tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo 53, pp. 128 - 138.

Maldonado, J.F.; Agüero, M.S.; Iturmendi, F.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V. & Martínez, D.A. 2018. Efecto de enmienda con compost de orujo de pera sobre la producción de forraje de *Setaria italica* (L.) P. Beauv. SEMIÁRIDA, Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam 28, pp. 45 - 50.

1.8.3. Trabajos libres presentados en congresos internacionales

Iturmendi, F.; Bongiovani, N. & Holzmann, R. 2019. Aplicación de enmienda orgánica obtenida a partir de residuos agroindustriales. XXI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos. XVII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 20-22 de noviembre de 2019, Buenos Aires, Argentina.

Ochoa, M.P.; Iturmendi, F.; Estrada, V. & Hoch, P.M. 2012. Optimal control of a system of wastewater treatment ponds. AIChE Annual Meeting, 28 de octubre al 02 de Noviembre de 2012, Pittsburgh, Estados Unidos.

1.8.4. Trabajos libres presentados en congresos nacionales

Iturmendi, F.; Bongiovani, N.; Laiglecia, J.; Rocha, F.; Coletto, M. & Cardoso, V. 2019. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de enmiendas orgánicas. V Congreso Nacional del Foro por la Agricultura Familiar, 15-16 de mayo de 2019, Cinco Saltos, Argentina.

Maldonado, J.; Rodríguez, G.; Agüero, M.; Iturmendi, F.; Buglione, M.; Filippi, M. & Martínez, D. 2018. Evaluación del compost de orujo de pera y manzana como alternativa a sustratos comerciales en la producción de plantines de

tomate. 40° Congreso Argentino de Horticultura, 02-05 de octubre de 2018, Córdoba, Argentina.

Martínez, D.A.; Maldonado, J.F.; Filippi, M.V.; Buglione, M.B.; Iturmendi, F.; Rodríguez, G.E. & Agüero, M.S. 2016. Efecto de enmienda por compost de orujo de manzana sobre el desarrollo de plantines de lechuga. SAPROBIO 2016. IV Simposio Argentino de Procesos Biotecnológicos, 01-02 de diciembre de 2016, Buenos Aires, Argentina.

Tarifa, M.C.; Brugnoli, L.; Estrada, V.; Iturmendi, F. & Díaz, M.S. 2012. Modelado de levaduras en lagunas de tratamiento de efluentes: Un enfoque interdisciplinario. XI Congreso Latinoamericano de Microbiología e Higiene de Alimentos. IV Congreso Argentino de Microbiología de Alimentos. III Simposio Argentino de Conservación de Alimentos, 26-29 de noviembre de 2012, Buenos Aires, Argentina.

1.8.5. Trabajos libres presentados en reuniones científicas y tecnológicas

Agüero, M.S.; Rodríguez, G.E.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V.; Martínez, D.A.; Maldonado J.F. & Iturmendi, F. 2017. Aprovechamiento de bagazos de pera y manzana como enmienda orgánica, sustrato para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* y obtención de un residuo biodegradado para alimentación animal. Jornada de Intercambio Técnico, Gestión, Tratamiento y Aprovechamiento de Residuos Agropecuarios y Agroindustriales, INTA IPAF Región Patagonia, 16-17 de agosto de 2017, Plottier, Argentina.

Agüero, M.S.; Rodríguez, G.E.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V.; Martínez, D.A.; Iturmendi, F. & Maldonado, J.F. 2016. Alternativas de utilización de residuos agroindustriales: Producción de hongos comestibles, enmienda orgánica y

alimentación animal. I Jornada de Investigación de la Sede Alto Valle y Valle Medio de la Universidad Nacional de Río Negro, 16 de septiembre de 2016, General Roca, Argentina.

Iturmendi, F. 2015. Compostaje de residuos agroindustriales: una alternativa sustentable para devolverle a la tierra lo que es de la tierra. Congreso de BioEconomía Argentina 2015, Región Patagónica, Innovación y desarrollo para un futuro sostenible, 16-17 de abril de 2015, Puerto Madryn, Argentina.

Capítulo 2

MODELO MATEMÁTICO DE UN TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE UNA INDUSTRIA JUGUERA

2.1. INTRODUCCIÓN

Los procesos que se llevan a cabo en una agroindustria pueden describirse mediante modelos matemáticos de creciente rigurosidad. Esto permite resolver problemas de diseño de la industria o definir estrategias de control sobre los procesos involucrados, permitiendo a los Ingenieros de Proceso contar con una poderosa herramienta para evaluar los beneficios y aplicabilidad de sus ideas en forma teórica, de una manera segura, rápida y económica, antes de llevarlas a la práctica. Es por esto que, en los últimos 50 años, la Ingeniería de Sistemas de Procesos se ha transformado en una disciplina muy importante dentro de la Ingeniería Química, evitando la necesidad de plantas pilotos y generando aumentos en los beneficios al mejorar los procesos ya existentes. Por otro lado, la optimización de procesos es de fundamental importancia para la industria de alimentos debido a la capacidad de relacionar objetivos económicos, ambientales y de seguridad operativa. El consumo de agua potable en la industria de los alimentos es también un factor crítico que puede ser considerado en el planteo del problema.

En efecto, la provisión sostenible de agua dulce es uno de los principales desafíos a proteger en este siglo y, en este sentido, los procesos de tratamiento de aguas residuales constituyen un problema principal para minimizar los impactos adversos en ecosistemas costeros y de agua dulce asociados al crecimiento urbano e industrial. El objetivo más importante de estos sistemas es la eliminación de la materia orgánica, ya que la descomposición de estas sustancias consume el oxígeno disuelto presente en el agua, pudiendo alcanzar, niveles de anaerobiosis, es decir, ausencia de oxígeno disuelto, dependiendo de la gravedad de la contaminación. En estas condiciones aparecen olores

desagradables, las aguas toman una coloración gris o negra y no hay posibilidad de supervivencia para los microorganismos aeróbicos responsables de degradar la materia orgánica.

Dentro de la amplia gama de procesos biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995; Knobelsdorf, 2005), los barros activados son actualmente los procesos biológicos más utilizados (Cooper, 2001; Artan & Orhon, 2005; Alasino, 2009). A pesar de esto se continúan empleando sistemas de tratamiento por lagunaje, ya que ofrecen soluciones simples y requieren menores costos de inversión inicial. Consisten en grandes lagunas donde se almacenan las aguas residuales durante largos períodos para permitir que una amplia gama de microorganismos descomponga la materia orgánica. Las lagunas de tratamiento biológico pueden ser una combinación de tres tipos diferentes de sistemas: aeróbicos, anaeróbicos y facultativos (Smyth *et al.*; 2018; Aziz *et al.*, 2019). Con respecto a las lagunas facultativas, las mismas presentan zonas aeróbicas y anaeróbicas, donde tienen lugar diferentes procesos químicos y bioquímicos dentro de cada zona, incluidas las relaciones de simbiosis entre microalgas, bacterias heterotróficas y hongos, que influyen en gran medida en la eficiencia de la laguna en el tratamiento biológico de aguas residuales (Ewing *et al.*, 2014; Vijay & Yuan, 2017).

La mayoría de los modelos empíricos fueron desarrollados para predecir la calidad de las lagunas de estabilización basados en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la mortandad de coliformes (Mayo, 1989; Liran *et al.*, 1994; Almasi & Pescod, 1996; Steets & Holden, 2003). Por otro lado, se han formulado modelos ecológicos para predecir el comportamiento de las lagunas de estabilización (Kayombo *et al.*, 2000; Mashauri & Kayombo, 2002;

Beran & Kargi, 2004). Además, se han formulado modelos biogeoquímicos dentro de un marco de optimización simultánea para la determinación de estrategias óptimas para la restauración de la calidad del agua de lagos y embalses (Estrada *et al.*, 2008 y 2009; Estrada & Diaz, 2010).

Moreno-Grau *et al.* (1999) presentaron un modelo matemático para un sistema utilizado en una planta de tratamiento de lagunas de estabilización de agua residual urbana, que incluía submodelos de los fenómenos físicos y bioquímicos que se producen en el proceso de tratamiento. Lee *et al.* (1999) propusieron un modelo matemático dinámico de lodos activados para el tratamiento de agua residual utilizando el enfoque de parámetros distribuidos en base a la técnica de colocación ortogonal. Como se puede encontrar en la bibliografía, se han propuesto algunos modelos para las lagunas de tratamiento que describen procesos hidrodinámicos (Manga *et al.*, 2004; Shilton & Mara, 2005) o procesos bioquímicos (Kayombo *et al.*, 2000; Dochain *et al.*, 2003).

Beran & Kargi (2004) desarrollaron un modelo matemático dinámico para predecir la calidad del efluente de las lagunas facultativas de estabilización de aguas residuales, que incluye una representación detallada de las interacciones sedimento-columna de agua y columna de agua-atmósfera. Emplearon un modelo hidráulico bidimensional que considera el flujo disperso y la difusión en las direcciones horizontal y vertical. Dicho modelo se puede usar para diseñar nuevas lagunas de estabilización y también para mejorar la calidad del efluente en sistemas existentes. Sin embargo, resaltan que más allá de que los modelos ecológicos estructurados se basan en principios de conservación, estequiometría de reacción y leyes de termodinámica; todos los modelos mencionados tienen sus puntos débiles desde las perspectivas hidrológicas y bioquímicas.

Cunha *et al.* (2006) simularon las concentraciones de oxígeno disuelto y DBO, con el fin de ser utilizadas como indicadores de la presencia de materia orgánica en un cuerpo de agua. En ese mismo año, Abbas *et al.* (2006) realizaron la simulación hidrodinámica de lagunas de estabilización utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD *Computational Fluid Dynamic*) desarrollando una herramienta para estudiar y comprender las interacciones internas y del proceso.

Gehring *et al.* (2010) presentaron un modelo de simulación de lodos activados donde se consideraba la integración de los procesos de transferencia de gases y biomasa de algas para oxígeno, dióxido de carbono y amoníaco, dependiendo de la velocidad del viento y un simple equilibrio iónico. Sah *et al.* (2011) realizaron el modelado de lagunas de estabilización en modelos en uno, dos y tres dimensiones. Iturmendi *et al.* (2012) resolvieron un modelo matemático describiendo los principales procesos bioquímicos que se llevan a cabo en las lagunas de tratamiento, realizando un análisis de sensibilidad global de la formulación del problema de estimación de parámetros sujeto a un sistema de ecuaciones diferencial algebraico que representa todo el sistema. Por otro lado, Ho *et al.* (2018) realizaron un análisis preliminar de la tecnología de lodos activados, basados en las problemáticas globales emergentes, como el cambio climático, la urbanización y el agotamiento del agua, buscando un sustituto factible y de bajo costo de la tecnología de lodos activados convencionales.

Si bien existen diversos autores que han desarrollado modelos matemáticos para diferentes sistemas de tratamiento de efluentes (Benfield & Randall, 1980; Middlebrooks *et al.*, 1999; Eckenfelder, 2001; Ozbas *et al.*, 2006; Akbay *et al.*, 2018), los aportes realizados en simulación y optimización dinámica de sistemas de tratamientos de aguas residuales han sido limitados. En este capítulo, se

presenta el desarrollo y calibración de un modelo matemático dinámico altamente no lineal basado en primeros principios y desarrollado en la plataforma gPROMS (PSEnterprise, 2009), de las lagunas de tratamiento de la empresa juguera JUGOS S.A. Es importante destacar que a diferencia de los autores anteriores el problema que se modelará incluye las ecuaciones hidrodinámicas y el proceso bioquímico, los cuales actualmente se modelan por separado y rara vez en forma conjunta. Además, se aporta información fundamental de la validación del diseño de las lagunas de tratamiento, se hacen contribuciones al problema presentado y finalmente, se explican los problemas típicos que se observaron durante el desarrollo de esta tesis.

2.1.1. Objetivos

- Verificar el diseño de las lagunas de tratamiento del efluente industrial generado durante el proceso productivo para la obtención de jugos concentrados mediante ecuaciones matemáticas.
- Formular y calibrar un modelo matemático para describir el comportamiento de un sistema de tratamiento biológico.

2.1.2. Hipótesis y predicciones

- La utilización de ecuaciones matemáticas permitirá estimar las variables operativas en un sistema de tratamiento de efluentes industriales. Predicción: El sistema de ecuaciones desarrollado será propicio para la obtención de los parámetros necesarios para un adecuado diseño de las lagunas de tratamiento.
- La implementación de un sistema de simulación de procesos mediante modelamiento matemático generará alternativas operativas para el

manejo de un tratamiento de efluentes industriales. Predicción: Esta herramienta computacional permitirá mejorar el proceso de toma de decisiones, reducir costos operativos y operar la planta de tratamiento de forma óptima haciendo más rentable la industria juguera.

2.2. VALIDACIÓN DEL DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE TRATAMIENTO

2.2.1. Generación de efluentes

Las lagunas de tratamiento se ubican en un predio de 4 hectáreas en la localidad de Villa Regina (Figura 2.1), provincia de Río Negro, ($39^{\circ} 06' 07.17''$ S y $67^{\circ} 03' 03.34''$ O).

La planta de tratamiento de efluentes tiene por objetivo encuadrar la calidad del efluente tratado con los límites permisibles de vuelco establecidos por la reglamentación vigente del Departamento Provincial de Aguas (DPA) para descargas industriales a cursos de agua. El cuerpo receptor para el volcado del efluente tratado es el arroyo Salado ($39^{\circ} 06' 21.80''$ S y $67^{\circ} 03' 01.80''$ O). Se trata de un curso de agua de gran capacidad por el que escurre agua proveniente de los canales de drenaje y desemboca finalmente en el río Negro. Los efluentes industriales generados por la fábrica contienen elementos que son degradables biológicamente, por lo que el sistema de tratamiento para realizar la depuración del agua residual generada por la empresa JUGOS S.A. está conformado por un tratamiento primario seguido por un tratamiento secundario o biológico. El diagrama de flujo puede apreciarse en la Figura 2.2.

Los efluentes líquidos industriales que son generados durante la producción de jugos concentrados presentan una elevada carga orgánica, debido

principalmente a la utilización de agua limpia para el arrastre y lavado de la fruta antes de ser molida para su procesamiento.



Figura 2.1: Vista aérea del predio en la localidad de Villa Regina, donde se encuentra el sistema de tratamiento de efluentes industriales por lagunaje.

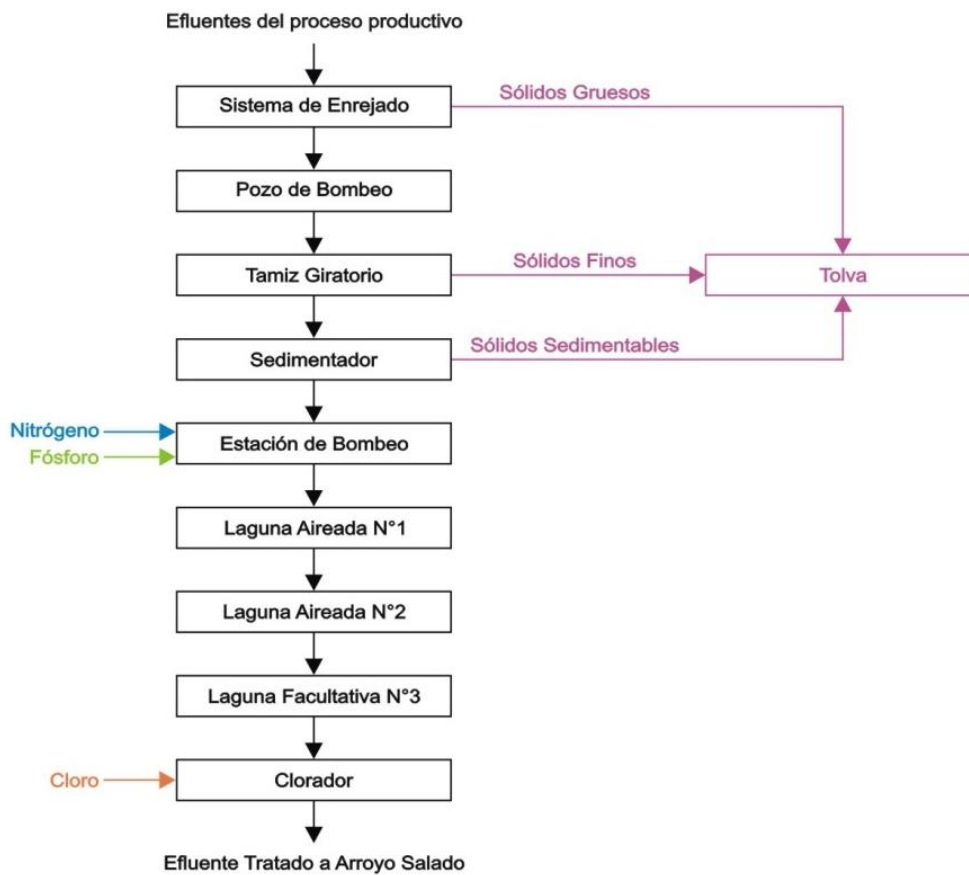


Figura 2.2: Diagrama de flujo del tratamiento de efluentes de la empresa JUGOS S.A.

2.2.1.1. Tratamiento primario

La fruta a procesar se vuelca en los lagares, en donde se le descarga suficiente caudal de agua de pozo, para que la misma circule hasta un pozo donde se la separa del medio líquido por una reja, elevándola por medio de una cinta de cangilones a las moledoras. El agua tiene doble finalidad, la primera es servir de vehículo de transporte y la segunda lavar la fruta antes de molerla. Al separar el agua luego de este proceso, esta presenta un contenido elevado de materia orgánica disuelta y en suspensión, además de otras impurezas tales como hojas, cáscaras y palos.

Una vez que se separa la fruta, el efluente industrial escurre por gravedad por un conducto de un metro de diámetro hasta la estación elevadora, la cual está dividida en dos recintos, el primero húmedo que es el pozo de aspiración, y el segundo seco que es donde están ubicadas las electrobombas de eje horizontal. Desde el pozo húmedo el efluente atraviesa un sistema de enrejado de limpieza mecánica, cuya finalidad es retener los sólidos gruesos que arrastra el efluente, que es barrida por palas barredoras fijadas a cadenas y accionadas desde la parte superior por un motor reductor. El efluente, una vez que atraviesa la reja, pasa al recinto donde están ubicadas las cañerías de aspiración de las electrobombas. En el pozo de bombeo hay instaladas dos bombas de motor sumergido de $280 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, una operativa y la otra de reserva. Los sólidos retenidos por la reja son barridos y elevados por palas barredoras, para luego ser volcados en un tornillo sinfín que los eleva y descarga en una tolva donde se acumulan para su posterior carga en camiones.

El efluente bombeado por las electrobombas de eje horizontal se vuelca en la cámara de entrada de un tamiz giratorio que tiene una separación entre alambres de 1,5 mm. Su finalidad es remover del efluente sólidos finos que el mismo contiene. En el movimiento giratorio del tamiz los sólidos son removidos por una chapa inclinada por donde resbalan y descargan en el mismo tornillo sinfín en el que se vuelca el material separado de las rejillas, que como se indicó, los descarga en una tolva elevada donde se almacenan. Desde la tolva los sólidos son descargados en camiones que los transportan hasta el sector de compostaje.

El efluente que atraviesa el tamiz giratorio descarga en un canal que lo conduce a la cabecera de un sedimentador, donde por aquietamiento sedimentan sólidos que contiene el efluente, depositándose y acumulándose sobre el piso. El líquido desborda por el vertedero de salida y descarga en una canaleta, escurriendo por gravedad hasta la estación de bombeo que impulsa el mismo, por una cañería al sistema de tratamiento biológico. En esta estación de bombeo se dosifican las sales de nitrógeno y fósforo requeridas como nutrientes para el correcto funcionamiento del tratamiento biológico. Dichas sales participan en la formación de los flóculos que luego sedimentan en la laguna facultativa. En la Figura 2.3, se visualiza una representación completa del sistema de tratamiento de efluentes líquidos.

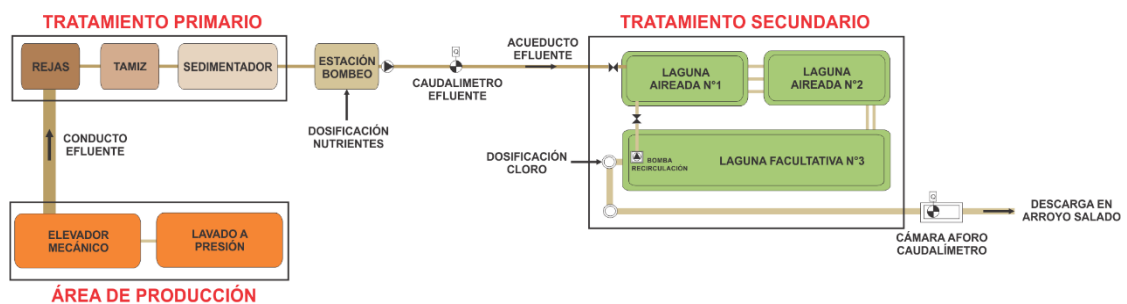


Figura 2.3: Diagrama simplificado del sistema de tratamiento de efluentes de JUGOS S.A.

2.2.1.2. Tratamiento secundario

El sistema de tratamiento biológico está constituido por una laguna aireada aeróbica y una laguna aireada facultativa operando en serie. En la laguna aireada aeróbica, el efluente proveniente del pozo de bombeo se pone en contacto con una masa activa de microorganismos (biomasa) en presencia de oxígeno atmosférico disuelto. La agitación de la masa líquida, necesaria para evitar la sedimentación de los sólidos suspendidos presentes y la incorporación del oxígeno del aire necesario para la actividad microbiana, se realiza a partir de equipos aireadores. La mezcla líquida (efluente tratado y biomasa) de dicha laguna, ingresa a la laguna aireada facultativa. En este caso, y a diferencia de la anterior, el nivel de mezcla es suficiente como para mantener un régimen aeróbico en la mayor parte del líquido, permitiendo, al mismo tiempo, la sedimentación de los sólidos biológicos presentes, que se depositan sobre el fondo de la unidad.

Para lograr una mejor eficiencia en remoción de materia orgánica, se divide la laguna aireada aeróbica en dos celdas de las mismas dimensiones, actuando en serie. En consecuencia, el sistema de tratamiento biológico consta, en realidad, de tres etapas de lagunas aireadas en serie, las dos primeras de mezcla completa (lagunas aireadas aeróbicas) y la restante, de mezcla parcial (laguna aireada facultativa). Se trata de un sistema de tratamiento simple y seguro para tratar efluentes industriales, con un equipamiento electromecánico mínimo, de sencilla operación y mantenimiento.

En la laguna aireada aeróbica de primera etapa (Laguna N°1) el efluente proveniente del pozo de bombeo, con los nutrientes agregados, se pone en

contacto con una masa activa de microorganismos en presencia de oxígeno atmosférico disuelto. La agitación de la masa líquida, necesaria para evitar la sedimentación de los sólidos suspendidos o biomasa presente y la incorporación del oxígeno del aire necesario para la actividad microbiana, se logra con la instalación de 10 aireadores rápidos de eje vertical, del tipo flotantes. De los 10, cuatro son de 50 HP y seis de 40 HP. Esta laguna de oxidación biológica primaria tiene un volumen útil de 15.000 m³ y una altura de nivel líquido de 2,5 metros, resultando así una permanencia hidráulica del líquido tratado de 3 días. Como segunda etapa del tratamiento biológico se utiliza otra laguna aireada aeróbica (Laguna N°2). El oxígeno requerido para la actividad microbiana aeróbica y el nivel de mezcla necesario se logra, en este caso, mediante la instalación de dos equipos aireadores flotantes de eje vertical de 25 HP, dos de 20 HP y seis de 15 HP. Esta laguna de oxidación secundaria tiene las mismas dimensiones y tiempo de permanencia hidráulica que la Laguna N°1. De esta manera, en estas dos lagunas se remueven los compuestos orgánicos fácilmente biodegradables en su totalidad, mientras que ocurre una estabilización u oxidación parcial de las sustancias de degradación lenta.

Como tercera y última etapa del tratamiento biológico se utiliza una laguna aireada facultativa (Laguna N°3). En ella se completa la degradación aeróbica de la materia orgánica remanente del efluente tratado por las lagunas aireadas aeróbicas N°1 y N°2. El oxígeno requerido para la actividad microbiana aeróbica y el nivel de mezcla necesario para su contacto con los líquidos que se tratan se logra, en este caso, mediante la instalación de cuatro equipos aireadores flotantes de eje vertical de 15 HP cada uno. La laguna aireada facultativa tiene un volumen útil de 55.000 m³ y una altura de líquido útil de 3 metros, resultando

así una permanencia hidráulica del líquido tratado de 11 días. Los sólidos suspendidos sedimentados en el fondo de la laguna sufren un proceso de degradación anaeróbico y se acumulan a una velocidad relativamente lenta, a lo largo de varios años. Así, al cabo de un periodo relativamente prolongado, cuando se produzca un sensible arrastre de sólidos suspendidos en el efluente tratado, será necesario remover dicho sedimento, el cual será dispuesto en sitios autorizados por la Autoridad de Control respectiva. En la Figura 2.4 se puede apreciar una representación completa del sistema de tratamiento biológico de la empresa JUGOS S.A., constituido por tres lagunas aeróbicas con su correspondiente disposición de motores en cada una de ellas. Así mismo, en la Figura 2.5 puede observarse una imagen aérea de dichas lagunas.

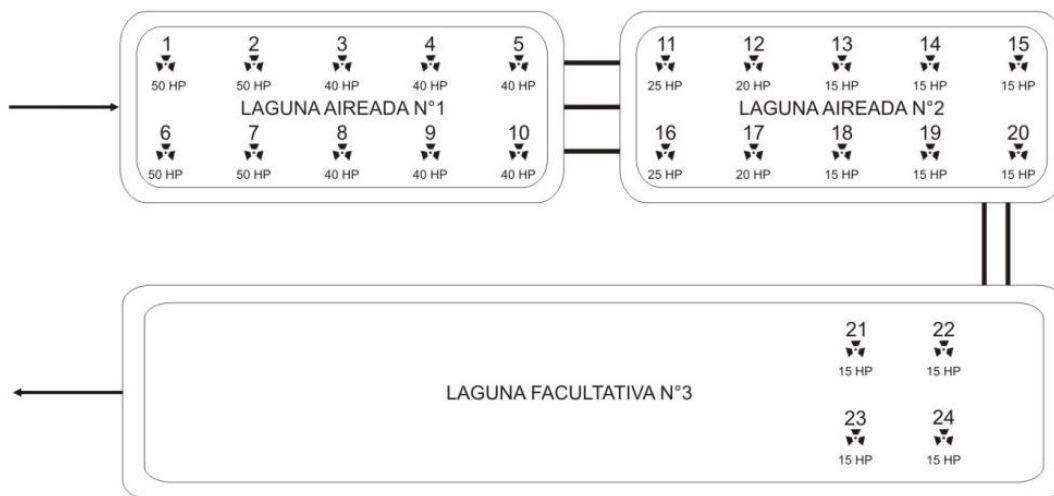


Figura 2.4: Diagrama de la disposición de los equipos aireadores.



Figura 2.5: Foto aérea de las lagunas de tratamiento de efluentes de JUGOS S.A.

2.2.1.3. Desinfección

Previo a la descarga del efluente, el líquido tratado es sometido a una adecuada desinfección, con el fin de asegurar la eliminación de microorganismos patógenos eventualmente presentes. Para ello, se agrega una solución acuosa de hipoclorito de sodio al comienzo del conducto de descarga que conduce el efluente hasta el arroyo Salado. La dosis es aquella que asegure la presencia de cloro residual en el efluente tratado. La dosificación del hipoclorito requerido se efectúa, en solución, mediante dos bombas dosificadoras dispuestas en paralelo, funcionando en forma alternada a un caudal de alrededor de 20 l.h^{-1} . Respecto a la cantidad de hipoclorito de sodio, se recomienda dosificar 2 mg.L^{-1} , y luego se ajusta de forma tal que a la salida del vertedero se detecten valores entre $0,1$ y $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$. En caso de reutilizar el efluente tratado, por ejemplo para riego, es conveniente llevar el contenido de cloro a valores cercanos a $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$ para disminuir la posibilidad de presencia de coliformes. El efluente clorado pasa por gravedad a la cámara de toma de muestra reglamentaria y descarga finalmente

en el arroyo indicado, cumpliendo con los límites permisibles de vuelco establecido por el DPA.

2.2.1.4. Parámetros de diseño

Los parámetros principales tenidos en cuenta para el diseño de las tres lagunas de tratamiento están sintetizados en la Tabla 2.1, y corresponden a valores reales promedio de los últimos años de producción.

Tabla 2.1: Parámetros de diseño para el sistema de tratamiento de efluentes.

Parámetro	Valor	Unidad
<i>Caudal promedio diario</i>	5.000	m ³ /día
<i>Caudal medio</i>	208	m ³ /h
<i>Caudal máximo</i>	250	m ³ /h
<i>Carga orgánica diaria</i>	10.000	kg DBO/día
<i>Carga orgánica inicial</i>	2.000	mg DBO/L
<i>Nitrógeno total</i>	< 10	mg/L
<i>Fósforo total</i>	< 2	mg/L
<i>Temperatura media efluente verano</i>	26	°C
<i>Temperatura media efluente invierno</i>	22	°C
<i>Temperatura media ambiente verano</i>	24	°C
<i>Temperatura media ambiente invierno</i>	7	°C
<i>Período generación efluente</i>	Enero - Mayo	mes

Hay que tener en cuenta que, por el régimen de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos establecido en el Libro Tercero del Código de Aguas, Ley N°2.952, se establecen valores permitidos de vuelco de un efluente industrial para un cuerpo receptor hídrico (presentados en la Tabla 2.2). La empresa JUGOS S.A. realiza muestreos diarios para controlar los parámetros operativos de la planta de tratamiento de efluentes líquidos, y así verificar el cumplimiento de los valores permitidos de vuelco. El muestreo se realiza en cada una de las lagunas de tratamiento y, además, se toma una muestra final del efluente tratado en una cámara de muestreo y aforo que está construida previa a la descarga del efluente en el arroyo Salado.

Tabla 2.2: Parámetros permitidos de vuelco (Libro Tercero del Código de Aguas, 1995).

Parámetro	Valor límite	Unidad
<i>Temperatura</i>	45	°C
<i>pH</i>	6 - 9	-
<i>Conductividad eléctrica</i>	2.500	µS/cm
<i>Sólidos sedimentables 10 minutos</i>	0,5	mg/L
<i>Sólidos sedimentables 2 horas</i>	1	mg/L
<i>DQO filtrada</i>	250	mg/L
<i>DBO₅ filtrada</i>	50	mg/L
<i>Grasas y Aceites</i>	50	mg/L

Parámetro	Valor límite	Unidad
<i>Sulfuros</i>	1	mg/L
<i>Detergentes</i>	4	mg/L
<i>Escherichia coli</i>	2 x 10 ³	NMP/100mL

2.2.2. Verificación del diseño de las lagunas de tratamiento

En función de cumplir con los parámetros exigidos por la autoridad que regula el vuelco de efluentes industriales en un curso hídrico, se pretende verificar los valores críticos de diseño en las lagunas de tratamiento de efluentes, para confirmar que el sistema es adecuado.

2.2.2.1. Lagunas aeróbicas

Para realizar los cálculos, se utilizaron las expresiones desarrolladas por Eckenfelder (2001), aplicadas a sistemas biológicos de mezcla completa sin recirculación que tratan efluentes industriales:

$$DBO_{efla} = \frac{DBO_0}{1 + K_t \cdot X_v \cdot t} \quad (2.1)$$

$$X_v = \frac{a \cdot (DBO_0 - DBO_{ef})}{1 + b \cdot t} \quad (2.2)$$

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2.3)$$

donde DBO_{efla} es la DBO soluble del líquido tratado de la laguna aeróbica en $mg.L^{-1}$, DBO_0 es la DBO del líquido que ingresa a la laguna en $mg.L^{-1}$, K_t es la constante de remoción de la DBO a una temperatura dada en $día^{-1}$, X_v es la

concentración de sólidos suspendidos volátiles en la laguna (SSV) en mg.L^{-1} , a es el coeficiente de síntesis celular en mgSSV.mgDBO^{-1} , b es la tasa de respiración endógena a una temperatura dada en día^{-1} , V es el volumen de las lagunas en m^3 , Q es el caudal diario en $\text{m}^3.\text{día}^{-1}$ y t es la permanencia hidráulica en días.

Luego de combinar y simplificar las ecuaciones 2.1 y 2.2, se obtiene como resultado la siguiente ecuación:

$$DBO_{efla} = \frac{1 + b \cdot t}{a \cdot K_t \cdot t} \quad (2.4)$$

Considerando la ecuación de Arrhenius modificada para su corrección a diversas temperaturas (Benfield & Randall, 1980; Haug, 1993; Kadlec *et al.*, 1996 y 2000; Sheridan *et al.*, 2012), resulta que:

$$K_t = 0,01 \cdot \theta^{(T-20)} \quad (2.5)$$

donde θ es el coeficiente de temperatura, que según Eckenfelder (2001) puede valer de 1,06 a 1,08. Para el diseño de estas lagunas se adopta el valor medio, es decir, un coeficiente de temperatura de 1,07. De esta manera, K_t a 20°C toma el valor de $0,01 \text{ día}^{-1}$, siendo este valor acorde a lo reportado por Eckenfelder (2001) para efluentes que contienen materia orgánica de origen natural. Por otro lado, la tasa de respiración endógena a una temperatura dada se puede calcular como:

$$b = 0,1 \cdot 1,04^{(T-20)} \quad (2.6)$$

De esta manera, b a 20°C toma el valor de $0,1 \text{ día}^{-1}$. Además, con el mismo criterio, se adopta que el coeficiente de síntesis celular, es decir, a es $0,5 \text{ mgSSV.mgDBO}^{-1}$.

La laguna N°1 recibe el efluente crudo con un tratamiento primario por tamizado y sedimentación, por lo que el contenido de sólidos suspendidos puede considerarse despreciable frente a la biomasa existente en las lagunas. Por otro lado, de la Tabla 2.1, se sabe que DBO_0 es 2.000 mg.L^{-1} y Q es $5.000 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$, mientras que de los datos reales del sistema se sabe que la permanencia hidráulica en ambas lagunas aeróbicas es de 6 días y el volumen es de 15.000 m^3 para cada una, con una profundidad o altura de nivel líquido de 2,5 metros, obteniéndose de esta manera una superficie total de ambas lagunas de 12.000 m^2 .

A los efectos de calcular la eficiencia de esta laguna en las condiciones de invierno y verano, es necesario previamente determinar la temperatura del líquido en cada una de ellas, aplicando la fórmula de Mancini & Barnhart (1976):

$$T_{lag} = \frac{A \cdot f \cdot T_{amb} + Q \cdot T_{ef}}{A \cdot f + Q} \quad (2.7)$$

donde T_{lag} es la temperatura media de la laguna en °C, A es el área de la laguna en m^2 , Q es el caudal diario en $\text{m}^3.\text{día}^{-1}$, T_{amb} es la temperatura media ambiente en °C, T_{ef} es la temperatura media del efluente en °C y f es la constante adimensional de Eckenfelder (2001) que para el sistema analizado toma el valor de 0,5.

2.2.2.2. Laguna facultativa

Para realizar los cálculos, se utilizaron nuevamente las expresiones desarrolladas por Eckenfelder (2001), aplicadas a sistemas biológicos que tratan efluentes industriales:

$$DBO_{eflf} = \frac{F + DBO_0}{1 + K_t \cdot t} \quad (2.8)$$

donde DBO_{eflf} es la DBO soluble del líquido tratado de la laguna facultativa en mg.L^{-1} y F toma el valor de 1 para temperaturas de líquido en la laguna inferiores a 10°C y de 1,3 para temperaturas de líquido en la laguna superiores a 10°C . En este tipo de laguna, cuando las precede una laguna aireada aeróbica, Eckenfelder (2001) define que K_t a 20°C toma el valor de 0,2 a $0,4 \text{ día}^{-1}$. Para realizar los cálculos se adoptó el valor más conservativo, es decir $0,2 \text{ día}^{-1}$.

De los datos reales del sistema se sabe que el tiempo de retención en esta laguna es de 11 días y el volumen es de 55.000 m^3 , con una profundidad o altura de nivel líquido de 3 metros, obteniéndose de esta manera una superficie en la laguna de 18.333 m^2 . En esta laguna se completa el tratamiento hasta alcanzar los parámetros permitidos de vuelco, sedimentando asimismo los sólidos biológicos generados en las lagunas aireadas de mezcla completa.

De la Tabla 2.2, el valor límite de DBO_{ef} en la descarga para el efluente industrial es de 50 mg.L^{-1} , bajo cualquier condición climática. Mediante la resolución de las ecuaciones anteriores para los meses donde se registran las mejores y peores condiciones climáticas para el sistema de tratamiento, se pueden obtener los valores límites de la DBO_{ef} a la salida del sistema de tratamiento por lagunaje adoptado. Como puede observarse en la Tabla 2.3, tanto para las condiciones de verano como de invierno, la DBO_{ef} es menor de 50 mg.L^{-1} , por lo que se cumple con las condiciones impuestas para los parámetros de descarga.

Tabla 2.3: Parámetros críticos de diseño.

Parámetro	Verano	Invierno	Unidad
Laguna aeróbica			
T_{lag}	24,9	13,8	°C
K_t	0,014	0,00657	1/día
b	0,12	0,078	1/día
a	0,5	0,5	mg SSV/mg DBO
X_v	569,49	655,83	mg/L
DBO_{efla}	40,95	74,48	mg/L
Laguna facultativa			
T_{lag}	24,3	9,4	°C
K_t	0,27	0,0976	1/día
F	1,3	1	-
$DBO_{eflf crítica}$	13,41	35,92	mg/L

2.2.2.3. Equipos aireadores

Todas las lagunas presentan aireadores mecánicos superficiales del tipo eje vertical y alta velocidad. De acuerdo con Eckenfelder (2001), el requerimiento de oxígeno viene dado por:

$$Kg_{O_2} = a^* \cdot Q \cdot (DBO_0 - DBO_{ef}) + b^* \cdot V \cdot X_v \quad (2.9)$$

donde a^* es el coeficiente de respiración por síntesis celular y b^* es la tasa de respiración endógena. Se adopta, de acuerdo con los rangos dados por Eckenfelder (2001), el valor de 0,5 para a^* y 1,4.b para b^* .

Equipos aireadores en lagunas aeróbicas

Para ambas lagunas se realizó el cálculo en las condiciones más desfavorables, es decir, en el verano, cuando las eficiencias y temperaturas son mayores y, por lo tanto, menores son las concentraciones de oxígeno disuelto en la masa líquida. De esta manera, de la ecuación 2.9 se puede determinar que el requerimiento de oxígeno diario es de 7.767,65 kg_{O2}.día⁻¹, es decir, 323,65 kg_{O2}.h⁻¹. Este oxígeno requerido se repartirá entre ambas lagunas aeróbicas (Laguna N°1 y Laguna N°2).

Equipos aireadores en Laguna N°1

En la primera laguna aireada la remoción de la DBO es mayor que en la segunda debido a que la cinética del proceso biológico es de primer orden. Por lo tanto, el requerimiento total de oxígeno se repartirá entre ambas lagunas en forma proporcional a la DBO removida. De esta manera, resolviendo la ecuación 2.4 para las condiciones de verano, el valor para la DBO del líquido efluente de esta laguna es:

$$DBO_{efla1} = \frac{1 + 0,12.3}{0,5.0,014.3} = 64,76 \text{ mg/L}$$

Por lo tanto, la carga total de la DBO removida en ambas lagunas aireadas aeróbicas es de 9.795,25 kg_{DBO}.día⁻¹, mientras que la carga removida solo en la laguna aireada aeróbica N°1 es de 9.676,20 kg_{DBO}.día⁻¹. En consecuencia, en la Laguna N°1 se remueve el 98,78% de la carga orgánica total, mientras que en la Laguna N°2 el 1,22%, por lo que la cantidad requerida de oxígeno en esta laguna es de 319,70 kg_{O2}.h⁻¹.

El cálculo del coeficiente de transferencia de oxígeno se obtiene, para aireadores mecánicos superficiales del tipo eje vertical y alta velocidad, de la siguiente ecuación (Eckenfelder, 2001):

$$N = N_0 \cdot \frac{(\beta \cdot C_{sew} - C_0)}{C_s} \cdot 1,024^{(T-20)} \cdot \alpha \quad (2.10)$$

donde N_0 es el coeficiente de transferencia de oxígeno en kg_{O2}.(HP.h)⁻¹, C_{sew} es la concentración de saturación de oxígeno a la temperatura y presión del líquido en mg.L⁻¹, C_0 es la concentración de oxígeno disuelto en condiciones de operación en la laguna en mg.L⁻¹, C_s es la concentración de oxígeno disuelto a 20°C y nivel del mar en mg.L⁻¹, T es la temperatura del efluente en °C, α es un valor típico para lagunas aireadas con aireadores superficiales de eje vertical que tratan efluentes libres o con escasa presencia de tensioactivos y β es un valor típico que depende del contenido de sólidos disueltos inorgánicos.

En este tipo de laguna, Eckenfelder (2001) recomienda que α tome el valor de 0,90, mientras que β de 0,95. Por otro lado, se adoptan los siguientes valores para el resto de las variables: N_0 adopta el valor de 1,25 kg_{O2}.(HP.h)⁻¹ ya que es un valor medio en equipos aireadores de buena calidad disponibles en el

mercado medido en agua limpia a 20°C y 1 atm, T vale 24,9°C para dicha laguna en verano, C_{sew} a 24,9°C y 1 atm adopta el valor de 8,4 mg.L⁻¹, C_0 vale 1,5 mg.L⁻¹ y C_s a 20°C y nivel del mar adopta el valor 9,2 mg.L⁻¹. Hay que aclarar que se desprecia la influencia de la presión barométrica por la escasa altura de la localidad respecto al nivel del mar. Por lo tanto, resolviendo la ecuación 2.10, el coeficiente de transferencia de oxígeno para aireadores mecánicos superficiales del tipo eje vertical y alta velocidad es:

$$N = 1,25 \cdot \frac{(0,95 \cdot 8,4 - 1,5)}{9,2} \cdot 1,024^{(24,9-20)} \cdot 0,9 = 0,89 \text{ kg}_{O_2}/\text{HP} \cdot \text{h}$$

De esta manera, la potencia mínima requerida para la Laguna N°1 es:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Kg}_{O_2}}{N} = \frac{319,70}{0,89} = 359,21 \text{ HP}$$

Debido a que en la Laguna N°1 se encuentran en funcionamiento cuatro equipos aireadores rápidos de eje vertical de 50 HP y seis de 40 HP, resultando en una potencia total instalada de 440 HP, se puede asegurar que se cumple con la potencia total requerida para lograr un régimen de mezcla completa en función de las dimensiones adoptadas en dicha laguna. Por otro lado, efectuando el cociente entre la potencia instalada y el volumen de líquido en la laguna, se determina que la densidad de potencia en este caso es de 21,89 W.m⁻³. Este valor excede con amplitud el mínimo requerido (5,5 W.m⁻³) para mantener a todos los sólidos de la laguna en suspensión (Grady *et al.*, 2011).

Equipos aireadores en Laguna N°2

Como ya se indicó anteriormente, la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica en esta laguna es de 1,22%

de la total calculada para el conjunto de ambas lagunas aeróbicas. Por lo tanto, la condición crítica para la selección de los aireadores será la densidad de potencia. Suponiendo que el factor de seguridad adecuado es de 8 W.m^{-3} (Grady *et al.*, 2011), entonces la potencia mínima requerida para la Laguna N°2 es de 160,80 HP.

Como en dicha laguna se encuentran en funcionamiento dos equipos aireadores rápidos de eje vertical de 25 HP, dos de 20 HP y seis de 15 HP, resultando en una potencia total instalada de 180 HP, se puede asegurar que se cumple con la potencia total requerida para lograr un régimen de mezcla completa en función de las dimensiones adoptadas en dicha laguna.

Equipos aireadores en laguna facultativa

Dados los bajos valores de la DBO involucrados y el volumen elevado de la laguna, la condición crítica para la selección de los aireadores será la densidad de potencia. De este modo mantendrá un nivel adecuado de oxígeno disuelto en toda la laguna, permitiendo sólo una zona anaeróbica en el fondo de esta, para lograr la descomposición anaeróbica de los sólidos biológicos que sedimenten. Se propone como valor recomendable para evitar el arrastre de sólidos suspendidos en el efluente tratado un valor de $0,78 \text{ W.m}^{-3}$ (Eckenfelder, 2001; Grady *et al.*, 2011).

De esta manera, la potencia mínima requerida para la Laguna N°3 es de 57,48 HP. Como en esta laguna se encuentran en funcionamiento cuatro equipos aireadores rápidos de eje vertical de 15 HP, esto resulta en una potencia total instalada de 60 HP. Por lo tanto, se puede asegurar que se cumple con la

potencia total requerida para permitir la sedimentación de los sólidos suspendidos remanentes.

2.2.3. Datos experimentales

Los datos experimentales se tomaron en las lagunas de tratamiento de efluentes de la empresa JUGOS S.A. (Figura 2.5) entre los meses de enero y mayo de 2011 (151 días). Para la calibración del modelo matemático que se presenta en la sección 2.3, se registraron *in situ* los datos de temperatura, pH y oxígeno disuelto tres veces por semana en tres puntos y a dos profundidades (0,5 y 1,5 metros). El pH se determinó mediante método potenciométrico empleando un medidor multiparamétrico Hanna XI5521-CR, el cual es calibrado una vez por semana mediante la utilización de tres soluciones buffer de pH 4, 7 y 10. Mientras que el oxígeno disuelto y la temperatura se obtuvieron con un oxímetro YSI ProODO 11D100475 (Figura 2.6), el cual es calibrado cada vez que se enciende con una opción automática del propio equipo.



Figura 2.6. Medición de parámetros críticos en las lagunas de tratamiento.

Con respecto a las determinaciones de la DBO, nutrientes (nitrógeno orgánico, amonio, nitrato, fósforo orgánico y fosfato) y microorganismos (algas, bacterias y levaduras), se tomaron muestras una vez por semana para ser enviadas a un laboratorio externo (Figura 2.7).

Los análisis para la DBO y los nutrientes se llevaron a cabo en el laboratorio de MAS AGUA en General Roca, y las metodologías utilizadas corresponden a la versión 20 del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* preparado por *American Public Health Association (APHA, 1998)*.

Para determinar la concentración de los microorganismos indirectamente, se realizó el cálculo del biovolumen de las células, el cual corresponde a la expresión de volumen total que ocupa la biomasa celular. Se calculó comparando la forma celular con formas geométricas de acuerdo con Hillebrand *et al.* (1999). Los análisis microscópicos se llevaron a cabo tomando las dimensiones de 30 células de cada especie utilizando un microscopio óptico calibrado (ocular micrométrico) Carl Zeiss con un aumento de 400X, y se calculó su volumen celular a partir del cual se obtuvo el volumen medio. Los análisis para algas se llevaron a cabo en los laboratorios del Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) en Bahía Blanca, mientras que las determinaciones de bacterias y levaduras se realizaron en el laboratorio de Microbiología Industrial y de los Alimentos de la Universidad Nacional del Sur.

Los datos recolectados fueron utilizados para la resolución de un problema de estimación de parámetros que se desarrollará en la sección 2.4, y son presentados en las figuras que se detallan en esa misma sección.



Figura 2.7. Toma de muestras para las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas.

Se obtuvieron, además, datos de precipitaciones (Figura 2.8), temperatura (Figura 2.9) y radiación solar (Figura 2.10), que fueron registrados en la Estación Meteorológica Automática del INTA en la zona del ensayo.

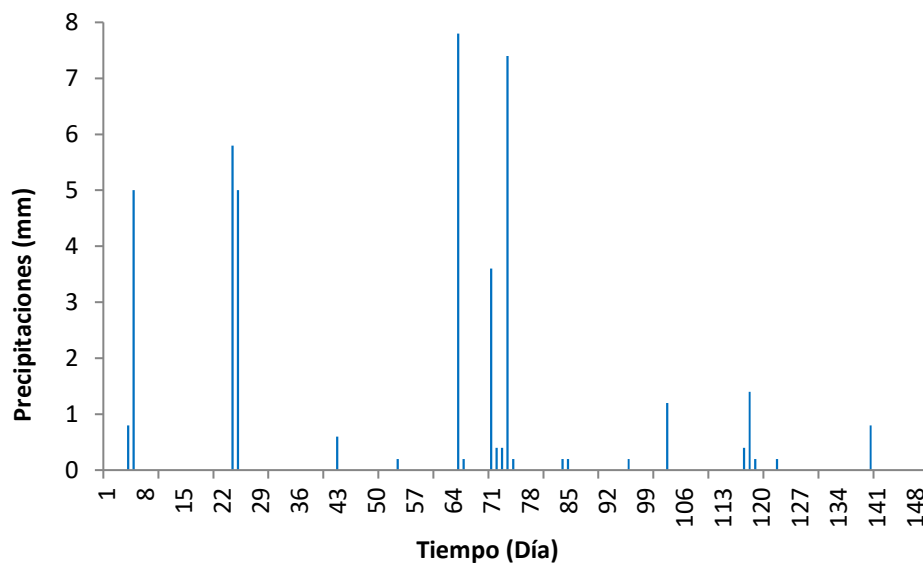


Figura 2.8. Precipitaciones diarias medidas por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).

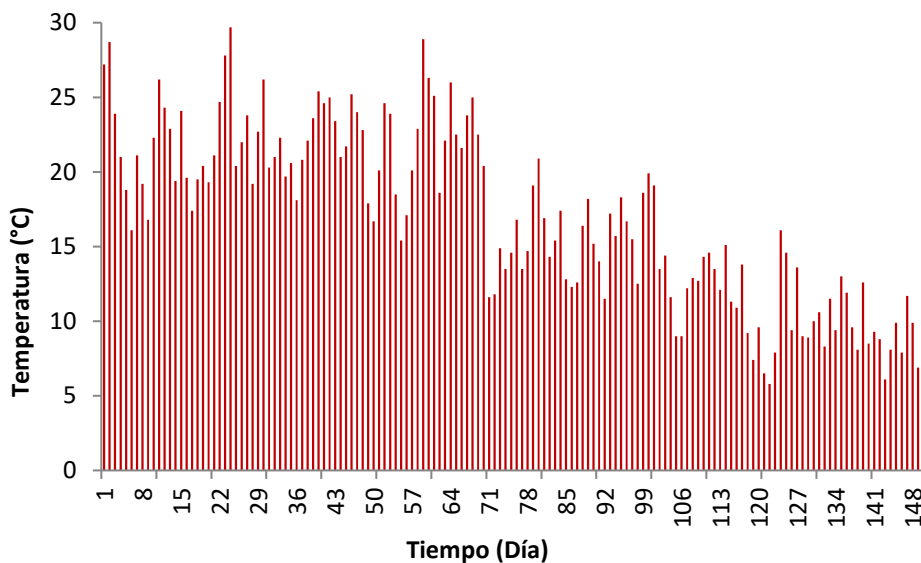


Figura 2.9. Temperatura ambiente media diaria medida por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).

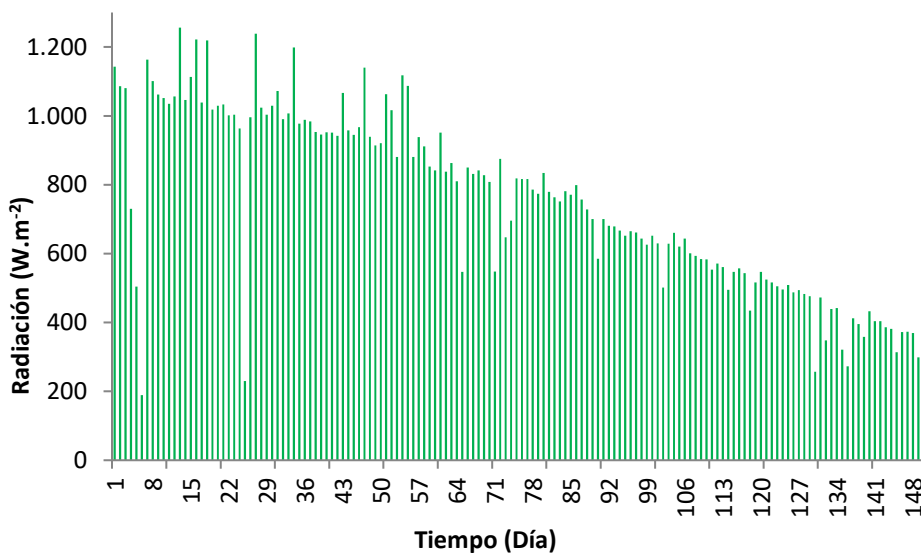


Figura 2.10. Radiación solar media diaria medida por la estación meteorológica del INTA durante los 151 días (enero a mayo de 2011).

2.3 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

En este capítulo se presenta un modelo matemático basado en primeros principios, para representar el sistema de tratamiento biológico de efluentes

industriales de la empresa JUGOS S.A. descrito en la sección 2.2. Se formularon balances de masa dinámicos para los principales componentes del sistema de lagunas de tratamiento biológico: bacterias, levaduras, fitoplancton (cianobacterias, clorófitas y diatomeas), fósforo orgánico (PO), fosfato (PO_4), nitrógeno orgánico (NO), nitratos (NO_3), amonio (NH_4), oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Para el caso de las lagunas aeróbicas se ha considerado una sola capa, ya que la presencia de motores de alta potencia permite suponer que existe mezclado perfecto de toda la masa líquida. Por otro lado, para la laguna facultativa se han implementado dos capas, una superior donde ocurren reacciones aeróbicas y una inferior donde se desarrollan reacciones anaeróbicas, que completan el tratamiento del efluente. De esta manera, se ha discretizado la altura de la columna de efluente en dos capas, con el fin de transformar el sistema de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (Estrada *et al.*, 2009). Este sistema complejo está constituido por ecuaciones diferenciales a derivadas parciales y ecuaciones algebraicas, que al considerarse condiciones homogéneas en cada una de las capas (como sucede en la laguna facultativa) o condiciones homogéneas en toda la columna de agua de las lagunas aireadas, permite transformar el sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales totales que posibilita describir la dinámica del proceso.

En los balances de masa por componente se consideran los caudales de entrada (Q_{in}) y salida (Q_{out}) del tratamiento biológico, el término de transferencia entre las capas, y los términos de generación/consumo, los cuales quedan representados por la siguiente ecuación:

$$\frac{dC_{ijk}}{dt} = \frac{Q_{inij}}{V_{ij}} C_{inijk} - \frac{Q_{outij}}{V_{ij}} C_{ijk} + r_{ijk} - \frac{k_d A_i}{\Delta h V_{ij}} (C_{iUk} - C_{iLk}) - \frac{C_{ijk}}{h_{ij}} \frac{dh_{ij}}{dt} \quad (2.11)$$

$i = \text{Lagunas (Aeróbica, Facultativa)}$

$j = \text{Capas Horizontales (Capa superior, Capa inferior)}$

$k = \text{Bacterias, Levaduras, Algas (cianobacterias, clorófitas, diatomeas), NO, NO}_3, \text{NH}_4, \text{PO, PO}_4, \text{OD, DBO}$

donde C_{ijk} representa las concentraciones de cada componente de cada laguna y/o capa horizontal en mg.L^{-1} , Q_{in} y Q_{out} la entrada y salida a la laguna respectivamente, en l.día^{-1} , h_{ij} la profundidad de cada capa en metros, V_{ij} el volumen de cada capa en m^3 , Δh la distancia entre la mitad de la capa superior y la mitad de la capa inferior en metros, r_{ijk} corresponde al término de generación neta de cada componente de cada laguna y/o capa horizontal en mg.L^{-1} , A_i representa el área de cada laguna en m^2 y k_d es la tasa de difusión Eddy en $\text{m}^2.\text{día}^{-1}$.

Además, se ha incluido el balance de masa global que cuenta con los términos de entrada (Q_{in}) y salida (Q_{out}) al sistema, y las correspondientes a precipitaciones (Q_{rain}) y evaporación (Q_{evap}):

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = Q_{in_i} - Q_{out_i} + Q_{rain_i} - Q_{evap_i} \quad (2.12)$$

Para incorporar las precipitaciones y la evaporación al modelo matemático, se utilizaron aproximaciones mediante funciones sinusoidales, utilizando los datos meteorológicos presentados en la sección 2.2.3. de este capítulo, que corresponde al período en la cual se generan efluentes.

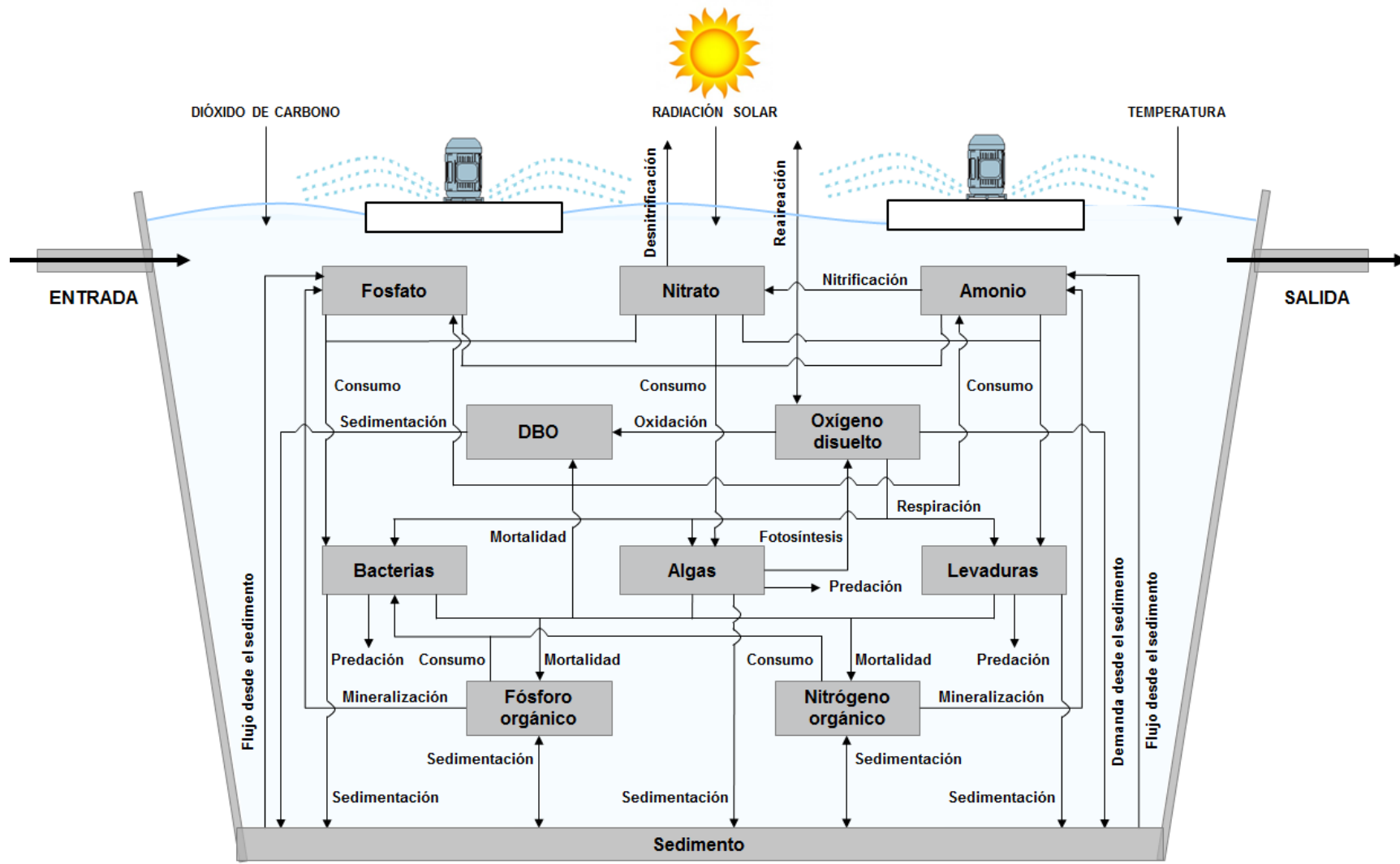


Figura 2.11: Variables de estado y procesos biogeoquímicos involucrados en el modelo matemático.

En la Figura 2.11 se muestra un esquema de las relaciones entre las variables de estado y los principales procesos biogeoquímicos incluidos en el modelo.

Por otra parte, los parámetros fisicoquímicos, estequiométricos y cinéticos del modelo matemático se describen en la Tabla 2.4. Serán utilizados en los términos de generación/consumo de los balances de masa de cada componente mencionado previamente (ecuación 2.11).

Tabla 2.4: Nomenclatura, descripción y unidades de los parámetros utilizados en el desarrollo del modelo matemático del sistema de tratamiento de efluentes de la empresa JUGOS S.A.

Parámetro	Descripción	Unidad
$U_{max,C}$	Tasa máxima de crecimiento de cianobacterias	1/día
bm_C	Tasa de metabolismo basal de cianobacterias	1/día
$\theta_{m,C}$	Ajuste de temperatura para la tasa de metabolismo basal de cianobacterias	s/u
$T_{opt,C}$	Temperatura óptima de crecimiento de cianobacterias	°C
$I_{opt,C}$	Intensidad de luz óptima de crecimiento de cianobacterias	Ly/día
$K_{p,C}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de P por cianobacterias	mg/L
$K_{n,C}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de N por cianobacterias	mg/L
pr_C	Tasa de predación de cianobacterias	1/día
$pH_{opt,C}$	pH óptimo de crecimiento de cianobacterias	s/u
$K_{pH,C}$	Constante de velocidad media de cianobacterias	s/u
$U_{max,D}$	Tasa máxima de crecimiento de diatomeas	1/día

Parámetro	Descripción	Unidad
bm_D	Tasa de metabolismo basal de diatomeas	1/día
$\theta_{m,D}$	Ajuste de temperatura para la tasa de metabolismo basal de diatomeas	s/u
$T_{opt,D}$	Temperatura óptima de crecimiento de diatomeas	°C
$I_{opt,D}$	Intensidad de luz óptima de crecimiento de diatomeas	Ly/día
$K_{p,D}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de P por diatomeas	mg/L
$K_{n,D}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de N por diatomeas	mg/L
pr_D	Tasa de predación de diatomeas	1/día
$pH_{opt,D}$	pH óptimo de crecimiento de diatomeas	s/u
$K_{pH,D}$	Constante de velocidad media de diatomeas	s/u
$U_{max,G}$	Tasa máxima de crecimiento de clorófitas	1/día
bm_G	Tasa de metabolismo basal de clorófitas	1/día
$\theta_{m,G}$	Ajuste de temperatura para la tasa de metabolismo basal de clorófitas	s/u
$T_{opt,G}$	Temperatura óptima de crecimiento de clorófitas	°C
$I_{opt,G}$	Intensidad de luz óptima de crecimiento de clorófitas	Ly/día
$K_{p,G}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de P por clorófitas	mg/L
$K_{n,G}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de N por clorófitas	mg/L
pr_G	Tasa de predación de clorófitas	1/día

Parámetro	Descripción	Unidad
$pH_{opt,G}$	pH óptimo de crecimiento de clorófitas	s/u
$K_{pH,G}$	Constante de velocidad media de clorófitas	s/u
$U_{max,B}$	Tasa máxima de crecimiento de bacterias	1/día
bm_B	Tasa de metabolismo basal de bacterias	1/día
$\theta_{m,B}$	Ajuste de temperatura para la tasa de metabolismo basal de bacterias	s/u
$T_{opt,B}$	Temperatura óptima de crecimiento de bacterias	°C
$K_{O_2,B}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de O ₂ por bacterias	mg/L
$K_{p,B}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de P por bacterias	mg/L
$K_{n,B}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de N por bacterias	mg/L
pr_B	Tasa de predación de bacterias	1/día
$pH_{opt,B}$	pH óptimo de crecimiento de bacterias	s/u
$K_{pH,B}$	Constante de velocidad media de bacterias	s/u
$U_{max,Y}$	Tasa máxima de crecimiento de levaduras	1/día
bm_Y	Tasa de metabolismo basal de levaduras	1/día
$\theta_{m,Y}$	Ajuste de temperatura para la tasa de metabolismo basal de levaduras	s/u
$T_{opt,Y}$	Temperatura óptima de crecimiento de levaduras	°C
$K_{p,Y}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de P por levaduras	mg/L

Parámetro	Descripción	Unidad
$K_{n,Y}$	Constante a la mitad de la saturación para captación de N por levaduras	mg/L
$pH_{opt,Y}$	pH óptimo de crecimiento de levaduras	s/u
$K_{pH,Y}$	Constante de velocidad media de levaduras	s/u
$f_{op,A}$	Fracción del fitoplancton muerto reciclada a fósforo orgánico	s/u
$f_{op,B}$	Fracción de bacterias muertas reciclada a fósforo orgánico	s/u
$f_{op,Y}$	Fracción de levaduras muertas reciclada a fósforo orgánico	s/u
$\alpha_{pc,C}$	Relación estequiométrica fósforo/carbono de cianobacterias	mg P/mg C
$\alpha_{pc,D}$	Relación estequiométrica fósforo/carbono de diatomeas	mg P/mg C
$\alpha_{pc,G}$	Relación estequiométrica fósforo/carbono de clorófitas	mg P/mg C
$\alpha_{pc,B}$	Relación estequiométrica fósforo/carbono de bacterias	mg P/mg C
$\alpha_{pc,Y}$	Relación estequiométrica fósforo/carbono de levaduras	mg P/mg C
k_{mp}	Tasa de mineralización del fósforo orgánico	1/día
θ_{mp}	Ajuste de temperatura para la tasa de mineralización del PO	s/u
K_{mpc}	Constante a la mitad de la saturación para la limitación por microorganismos	mg/L
$f_{on,A}$	Fracción del fitoplancton muerto reciclada a nitrógeno orgánico	s/u
$f_{on,B}$	Fracción de bacterias muertas reciclada a nitrógeno orgánico	s/u
$f_{on,Y}$	Fracción de levaduras muertas reciclada a nitrógeno orgánico	s/u

Parámetro	Descripción	Unidad
$\alpha_{nc,C}$	Relación estequiométrica nitrógeno/carbono de cianobacterias	mg N/mg C
$\alpha_{nc,D}$	Relación estequiométrica nitrógeno/carbono de diatomeas	mg N/mg C
$\alpha_{nc,G}$	Relación estequiométrica nitrógeno/carbono de clorófitas	mg N/mg C
$\alpha_{nc,B}$	Relación estequiométrica nitrógeno/carbono de bacterias	mg N/mg C
$\alpha_{nc,Y}$	Relación estequiométrica nitrógeno/carbono de levaduras	mg N/mg C
k_{mn}	Tasa de mineralización del nitrógeno orgánico	1/día
θ_{mn}	Ajuste de temperatura para la tasa de mineralización del NO	s/u
k_{ni}	Tasa de nitrificación	1/día
θ_{ni}	Ajuste de temperatura para la tasa de nitrificación	s/u
K_{nit}	Constante a la mitad de la saturación para la limitación por O ₂ de la nitrificación	mg/L
k_{dn}	Tasa de desnitrificación	1/día
θ_{dn}	Ajuste de temperatura para la tasa de desnitrificación	s/u
K_{den}	Constante a la mitad de la saturación para la limitación por O ₂ de la desnitrificación	mg/L
α_{on}	Relación estequiométrica oxígeno/nitrógeno para la nitrificación	mg O ₂ /mg N
$\alpha_{oc,A}$	Relación estequiométrica oxígeno/carbono del fitoplancton	mg O ₂ /mg C
$\alpha_{oc,B}$	Relación estequiométrica oxígeno/carbono de bacterias	mg O ₂ /mg C

Parámetro	Descripción	Unidad
$\alpha_{oc,Y}$	Relación estequiométrica oxígeno/carbono de levaduras	mg O ₂ /mg C
α_{op}	Relación estequiométrica oxígeno/fósforo	mg O ₂ /mg P
k_a	Tasa de reaireación	1/día
θ_a	Ajuste de temperatura para la re-aireación	s/u
k_{ot}	Coefficiente de transferencia de oxígeno	mg O ₂ /HP.día
k_{db}	Tasa de oxidación de DBO	1/día
θ_{dbo}	Ajuste de temperatura para la oxidación de DBO	s/u
K_{dbo}	Constante. a la mitad de la saturación para la limitación por O ₂ de la oxidación de DBO	mg/L
K_1	Coefficiente de atenuación de la luz por el fondo	1/m
K_2	Coefficiente de atenuación de la luz por la clorofila a	m ² /mg Cla
ccl	Relación carbono/clorofila a para el fitoplancton	mg C/mg Cla
A_A	Área superficial de la laguna aeróbica	m ²
A_F	Área superficial de la laguna facultativa	m ²
V_A	Volumen de la laguna aeróbica	m ³
V_U	Volumen de la capa superior en la laguna facultativa	m ³
V_L	Volumen de la capa inferior en la laguna facultativa	m ³
h_U	Altura de la capa superior en la laguna facultativa	m

Parámetro	Descripción	Unidad
h_L	Altura de la capa inferior en la laguna facultativa	m
$V_{s,C}$	Tasa de sedimentación de cianobacterias	m/día
$V_{s,D}$	Tasa de sedimentación de diatomeas	m/día
$V_{s,G}$	Tasa de sedimentación de clorófitas	m/día
$V_{s,NO}$	Tasa de sedimentación del nitrógeno orgánico	m/día
$V_{s,PO}$	Tasa de sedimentación del fósforo orgánico	m/día
$V_{s,DBO}$	Tasa de sedimentación del DBO	m/día
S_N	Flujo de amonio desde el sedimento	mg N/ m ² .día
S_P	Flujo de fosfato desde el sedimento	mg P/ m ² .día
K_{DOS}	Cte. a la mitad de la saturación para la limitación por O ₂ del flujo de nutrientes desde el sedimento	mg/L
f_{DNO}	Fracción de nitrógeno orgánico disuelto	s/u
f_{DPO}	Fracción de fósforo orgánico disuelto	s/u
k_{sod}	Demanda de oxígeno del sedimento	1/día
θ_{sod}	Ajuste de temperatura para la demanda de O ₂ del sedimento	s/u
K_{sod}	Constante a la mitad de la saturación para la limitación demanda de O ₂ del sedimento	mg/L
f_{DDBO}	Fracción de DBO disuelto	s/u

2.3.1. Microorganismos

2.3.1.1. Fitoplancton

En este modelo se incorporaron tres grupos taxonómicos de fitoplancton, es decir, cianobacterias (C), diatomeas (D) y clorófitas (G) (Estrada *et al.*, 2009). Los términos de generación/consumo para las cianobacterias, diatomeas y clorófitas tienen en cuenta el crecimiento, metabolismo basal, predación y sedimentación:

$$r_{ijk} = R_{ijk,crecimiento} - R_{ijk,metabolismo} - R_{ijk,predación} - R_{Fjk,sedimentación} \quad (2.13)$$

La tasa de crecimiento de estos tres grupos taxonómicos de fitoplancton depende de la temperatura, la radiación solar, la disponibilidad de nutrientes y el pH del sistema. Para representar estos efectos se utilizan funciones de limitación que pueden tomar valores entre 0 y 1 (Steele, 1962; Vollenweider, 1975; Smith, 1980; Hecky & Kilham, 1988; Zhang *et al.*, 2004; Beran & Kargi, 2004; Schindler *et al.*, 2008; Thamatrakoln & Hildebrand, 2008):

$$R_{ijk,crecimiento} = u_{max,k} \cdot f(T)_{ijk} \cdot f(I)_{ijk} \cdot f(N)_{ijk} \cdot f(pH)_{ijk} \cdot C_{ijk} \quad (2.14)$$

Con respecto a la tasa de metabolismo basal, se asume que aumenta exponencialmente con la temperatura según un comportamiento de tipo Arrhenius:

$$R_{ijk,metabolismo} = b m_k \cdot \theta_{m,k}^{(T_i-20)} \cdot C_{ijk} \quad (2.15)$$

La tasa de predación en este modelo está representado por:

$$R_{ijk,predación} = p r_k \cdot C_{ijk} \quad (2.16)$$

Por último, como las especies de fitoplancton son más densas que el agua, se incluye un término que tiene en cuenta su sedimentación:

$$R_{Fjk, sedimentación} = \frac{v_{s,k} \cdot C_{jk}}{V_j} \quad (2.17)$$

2.3.1.2. Bacterias

Los términos de generación/consumo para las bacterias (Beran & Kargi, 2004) tienen en cuenta el crecimiento, metabolismo basal, predación y sedimentación:

$$r_{ijB} = R_{ijB, crecimiento} - R_{ijB, metabolismo} - R_{ijB, predación} - R_{FjB, sedimentación} \quad (2.18)$$

La tasa de crecimiento de las bacterias depende de la demanda bioquímica de oxígeno, el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y de la disponibilidad de nutrientes:

$$R_{ijB, crecimiento} = u_{max, ijB} \cdot f(DBO)_{ijB} \cdot f(OD)_{ijB} \cdot f(pH)_{ijB} \cdot f(T)_{ijB} \cdot f(N)_{ijB} \cdot C_{ijB} \quad (2.19)$$

Teniendo en cuenta lo desarrollado para el fitoplancton, la tasa de metabolismo basal, de predación y de sedimentación, vienen dadas por:

$$R_{ijB, metabolismo} = bm_B \cdot \theta_{m,B}^{(T_i - 20)} \cdot C_{ijB} \quad (2.20)$$

$$R_{ijB, predación} = pr_B \cdot C_{ijB} \quad (2.21)$$

$$R_{FjB, sedimentación} = \frac{v_{s,B} \cdot C_{jB}}{h_j} \quad (2.22)$$

2.3.1.3. Levaduras

Los términos de generación/consumo para las levaduras (Tarifa *et al.*, 2011) tienen en cuenta el crecimiento, metabolismo basal y sedimentación:

$$r_{ijY} = R_{ijY, crecimiento} - R_{ijY, metabolismo} - R_{FjY, sedimentación} \quad (2.23)$$

La tasa de crecimiento de las levaduras depende del pH, la temperatura y de la disponibilidad de nutrientes:

$$R_{ijY,crecimiento} = u_{max,ijY} \cdot f(pH)_{ijY} \cdot f(T)_{ijY} \cdot f(N)_{ijY} \cdot C_{ijY} \quad (2.24)$$

Teniendo en cuenta lo desarrollado para las bacterias, la tasa de metabolismo basal y de sedimentación, vienen dadas por:

$$R_{ijY,metabolismo} = bm_Y \cdot \theta_{m,Y}^{(T_i-20)} \cdot C_{ijY} \quad (2.25)$$

$$R_{FjY,sedimentación} = \frac{v_{s,Y} \cdot C_{jY}}{h_j} \quad (2.26)$$

2.3.2 Ciclos biogeoquímicos

2.3.2.1. Nitrógeno

En este modelo el nitrógeno está representado por tres variables de estado, es decir, nitrógeno orgánico (NO), amonio (NH₄) y nitrato (NO₃). Los términos de generación/consumo para estas variables tienen en cuenta la mortalidad, mineralización, consumo, sedimento, nitrificación, desnitrificación y sedimentación:

$$r_{ij,NO} = R_{ij,NO,mortalidad} - R_{ij,NO,mineralización} - R_{iUB,NO,consumo} - R_{Fj,NO,sedimentación} \quad (2.27)$$

$$r_{ij,NH4} = R_{ij,NH4,mortalidad} + R_{ij,NO,mineralización} - R_{ij,NH4,consumo} - R_{ij,NH4,nitrificación} + R_{FL,NH4,sedimento} \quad (2.28)$$

$$r_{ij,NO3} = R_{ij,NH4,nitrificación} - R_{ij,NO3,desnitrificación} - R_{ij,NO3,consumo} \quad (2.29)$$

Las bacterias consumen nitrógeno como nitrógeno orgánico y nitrato, mientras que el fitoplancton y las levaduras lo captan como amonio y nitrato, con una

preferencia por el amonio que se modela a través de un factor que depende de la concentración de ambas formas de nitrógeno:

$$R_{iUB,NO,consumo} = \frac{R_{iUB,crecimiento} \cdot C_{iU,NO} \cdot \alpha_{nc,B}}{K_{n,B} + C_{iU,NO}} \quad (2.30)$$

$$R_{ij,NH_4,consumo} = \sum_{k=1}^4 \left(\frac{R_{ijk,crecimiento} \cdot C_{ij,NH_4} \cdot \alpha_{nc,k} \cdot P_{NH_4,k}}{K_{n,k} + C_{ij,NH_4}} \right) \quad (2.31)$$

$$R_{ij,NO_3,consumo} = \sum_{k=1}^5 \left(\frac{R_{ijk,crecimiento} \cdot C_{ij,NH_4} \cdot \alpha_{nc,k} \cdot (1 - P_{NH_4,k})}{K_{n,k} + C_{ij,NH_4}} \right) \quad (2.32)$$

La nitrificación es un proceso en donde el amonio es oxidado a nitrato por bacterias aeróbicas, y este proceso se ha modelado a través de una reacción de primer orden dependiente de la concentración de oxígeno y de la temperatura:

$$R_{ij,NH_4,nitrificación} = k_{ni} \cdot \theta_{ni}^{(T_i-20)} \cdot \frac{C_{ij,OD}}{K_{nit} + C_{ij,OD}} \cdot C_{ij,NH_4} \quad (2.33)$$

El nitrato, además de ser captado por las algas, bacterias y levaduras para su crecimiento, puede sufrir un proceso de desnitrificación por bacterias anaeróbicas en donde el nitrato es reducido a nitrógeno y otras formas gaseosas que son liberadas a la atmósfera:

$$R_{ij,NO_3,desnitrificación} = k_{dn} \cdot \theta_{dn}^{(T_i-20)} \cdot \left(1 - \frac{C_{ij,OD}}{K_{den} + C_{ij,OD}} \right) \cdot C_{ij,NO_3} \quad (2.34)$$

La concentración de amonio aumenta en la columna de líquido a través de la mineralización del nitrógeno orgánico:

$$R_{ij,NO,mineralización} = k_{mn} \cdot \theta_{mn}^{(T_i-20)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^5 C_{ijk}}{K_{mpc} + \sum_{k=1}^5 C_{ijk}} \cdot C_{ij,NO} \quad (2.35)$$

A pesar de que este proceso genera una disminución de la concentración de nitrógeno orgánico, la mortalidad de las algas, bacterias y levaduras produce un aumento de esta forma de nitrógeno y de amonio:

$$R_{ij,NO,mortalidad} = \sum_{k=1}^5 (R_{ijk,metabolismo} \cdot \alpha_{nc,k} \cdot f_{on,k}) \quad (2.36)$$

$$R_{ij,NH_4,mortalidad} = \sum_{k=1}^5 (R_{ijk,metabolismo} \cdot \alpha_{nc,k} \cdot (1 - f_{on,k})) \quad (2.37)$$

La sedimentación de la materia orgánica es otro de los procesos por el cual disminuye la disponibilidad de nitrógeno orgánico en la columna de líquido:

$$R_{Fj,NO,sedimentación} = \frac{v_{s,NO} \cdot (1 - f_{DNO}) \cdot C_{j,NO}}{h_j} \quad (2.38)$$

En el modelo se ha incluido además el término de liberación de amonio desde el sedimento que se ve beneficiada por condiciones de baja concentración de oxígeno (Hamilton & Schladow, 1997):

$$R_{FL,NH_4,sedimento} = S_N \cdot \left(1 - \frac{C_{L,OD}}{K_{DOS} + C_{L,OD}} \right) \cdot \frac{1}{h_L} \quad (2.39)$$

2.3.2.2. Fósforo

En este modelo el fósforo está representado por dos variables de estado, es decir, fósforo orgánico (PO) y fosfato (PO₄). Los términos de generación/consumo para estas variables tienen en cuenta la mortalidad, mineralización, sedimento, consumo y sedimentación:

$$r_{ij,PO} = R_{ij,PO,mortalidad} - R_{ij,PO,mineralización} - R_{iUB,PO,consumo} - R_{Fj,PO,sedimentación} \quad (2.40)$$

$$r_{ij,PO4} = R_{ij,PO4,mortalidad} + R_{ij,PO,mineralización} - R_{ij,PO4,consumo} + R_{FL,PO4,sedimento} \quad (2.41)$$

Las bacterias consumen fósforo como fósforo orgánico y fosfato, mientras que el fitoplancton lo capta en forma de fosfato:

$$R_{iUB,PO,consumo} = \frac{R_{iUB,growth} \cdot C_{iU,PO} \cdot \alpha_{pc,B}}{K_{p,B} + C_{iU,PO}} \quad (2.42)$$

$$R_{ij,PO4,consumo} = \sum_{k=1}^4 \left(\frac{R_{ijk,growth} \cdot C_{ij,PO4} \cdot \alpha_{pc,k}}{K_{p,k} + C_{ij,PO4}} \right) \quad (2.43)$$

La concentración de fosfato aumenta en la columna de líquido a través de la mineralización del fósforo orgánico:

$$R_{ij,PO,mineralización} = k_{mp} \cdot \theta_{mp}^{(T_i-20)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^5 C_{ijk}}{K_{mpc} + \sum_{k=1}^5 C_{ijk}} \cdot C_{ij,PO} \quad (2.44)$$

A pesar de que este proceso genera una disminución de la concentración de fósforo orgánico, la mortandad de las algas, bacterias y levaduras produce un aumento de esta forma de fósforo y de fosfato:

$$R_{ij,PO,mortalidad} = \sum_{k=1}^5 (R_{ijk,metabolismo} \cdot \alpha_{pc,k} \cdot f_{op,k}) \quad (2.45)$$

$$R_{ij,PO4,mortalidad} = \sum_{k=1}^5 (R_{ijk,metabolismo} \cdot \alpha_{pc,k} \cdot (1 - f_{op,k})) \quad (2.46)$$

La sedimentación de la materia orgánica es otro de los procesos por el cual disminuye la disponibilidad de fósforo orgánico en la columna de líquido:

$$R_{Fj,PO,sedimentación} = \frac{v_{s,PO} \cdot (1 - f_{DPO}) \cdot C_{j,PO}}{h_j} \quad (2.47)$$

Se ha incluido el término de liberación de fosfato desde el sedimento:

$$R_{FL,PO4,sedimento} = S_P \cdot \left(1 - \frac{C_{L,OD}}{K_{DOS} + C_{L,OD}} \right) \cdot \frac{1}{h_L} \quad (2.48)$$

2.3.2.3. Oxígeno disuelto

En este modelo el oxígeno disuelto (OD) es una de las variables más importantes del sistema de tratamiento de efluentes. Los términos de generación/consumo para esta variable tienen en cuenta la reaeración atmosférica, respiración/fotosíntesis, aireación por motores, nitrificación, sedimento, oxidación, respiración y mineralización:

$$r_{ij,OD} = R_{iU,OD,reaeración} + R_{ij,OD,respiración/fotosíntesis} + R_{iU,OD,aireadores} - R_{ij,OD,nitrificación} - R_{ij,OD,dbo} - R_{ijk,OD,respiración} - R_{iU,OD,mineralización} - \quad (2.49)$$

$$R_{FL,OD,sedimento}$$

Los principales procesos que incrementan el oxígeno disuelto en la columna de líquido son la reaeración atmosférica, la producción fotosintética de oxígeno y los equipos aireadores:

$$R_{iU,OD,reaeración} = \frac{ka \cdot \theta_a^{(T_i-20)}}{h_i} (C_i^* - C_{ij,OD}) \quad (2.50)$$

$$R_{ij,OD,respiración/fotosíntesis} = \left(\sum_{k=1}^5 R_{i,k,crecimiento} - R_{ijk,metabolismo} \right) \cdot \alpha_{oc,k} \quad (2.51)$$

$$R_{iU,OD,aireadores} = k_{ot} \cdot \frac{P_{mot,i}}{V_i} \quad (2.52)$$

donde C_i^* es la concentración de la saturación de oxígeno del efluente a la temperatura de la superficie (Zhang *et al.*, 2004):

$$C_i^* = 16,5 - \frac{8}{22} T_i \quad (2.53)$$

La concentración de oxígeno disuelto en la columna de líquido disminuye principalmente por la tasa de respiración, la demanda de oxígeno del sedimento y a la utilización de oxígeno en los procesos de nitrificación, mineralización y oxidación de la materia orgánica:

$$R_{ijk,OD,respiración} = \left(\sum_{k=1}^2 R_{ijk,metabolismo} \right) \cdot \alpha_{oc,k} \quad (2.54)$$

$$R_{FL,OD,sedimento} = \left(\frac{k_{sod} \cdot \theta_{sod}^{(T_i-20)}}{h_L} \right) \cdot \left(\frac{C_{L,DO}}{K_{sod} + C_{L,OD}} \right) \quad (2.55)$$

$$R_{ij,OD,nitrificación} = \left(k_{ni} \cdot \theta_{ni}^{(T_i-20)} \cdot \frac{C_{ij,OD}}{K_{nit} + C_{ij,OD}} \cdot C_{ij,NH_4} \right) \cdot \alpha_{on} \quad (2.56)$$

$R_{iU,OD,mineralización}$

$$= k_{mn} \cdot \theta_{mn}^{(T_i-20)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^5 C_{iUk}}{K_{mpc} + \sum_{k=1}^5 C_{iUk}} \cdot C_{iU,NO} \cdot \alpha_{on} \quad (2.57)$$

$$+ k_{mp} \cdot \theta_{mp}^{(T_i-20)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^5 C_{iUk}}{K_{mpc} + \sum_{k=1}^5 C_{iUk}} \cdot C_{iU,PO} \cdot \alpha_{op}$$

$$R_{ij,OD,dbo} = k_{dn} \cdot \theta_{dbo}^{(T_i-20)} \cdot \frac{C_{ij,OD}}{K_{dbo} + C_{ij,OD}} \cdot C_{ij,DBO} \quad (2.58)$$

2.3.2.4. Demanda bioquímica de oxígeno

En este modelo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), al igual que el oxígeno disuelto (OD), es otra de las variables más importantes del sistema de tratamiento de efluentes, y representa la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada por los microorganismos. Los términos de generación/consumo para esta variable tienen en cuenta la mortalidad, oxidación y sedimentación:

$$r_{ij,DBO} = R_{ij,DBO,mortalidad} - R_{ij,DBO,oxidación} - R_{Fj,DBO,sedimentación} \quad (2.59)$$

La concentración de la DBO en la columna de líquido se incrementa por la mortalidad de algas, bacterias y levaduras, y disminuye principalmente por el proceso de oxidación y sedimentación de la materia orgánica:

$$R_{ij,DBO,mortalidad} = \sum_{k=1}^5 (R_{ijk,metabolismo} \cdot \alpha_{oc,k}) \quad (2.60)$$

$$R_{ij,DBO,oxidación} = k_{dn} \cdot \theta_{dbo}^{(T_i-20)} \cdot \frac{C_{ij,OD}}{K_{dbo} + C_{ij,OD}} \cdot C_{ij,DBO} \quad (2.61)$$

$$R_{Fj,DBO,sedimentación} = \frac{v_{s,DBO} \cdot (1 - f_{DDBO}) \cdot C_{j,DBO}}{h_j} \quad (2.62)$$

Así, queda planteado un sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE) que representan el modelo matemático del proceso de las lagunas de tratamiento de efluentes. Dicho modelo se resolvió con enfoques de parametrización del vector de variables de control en el entorno gPROMS.

2.3.3. Evaluación estadística sobre el desempeño del modelo

El desempeño del modelo ha sido evaluado cuantitativamente (con propósitos de calibración) mediante el diagnóstico de tres parámetros estadísticos (Di Maggio *et al.*, 2016), basados en medidas promedio de las variables de estado más importantes (fósforo orgánico, fosfato, nitrógeno orgánico, amonio, nitrato, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, bacterias y levaduras).

El error medio (EM), el error relativo (ER) y el índice de correlación (d), se obtuvieron con las siguientes ecuaciones (Willmott, 1981; Power, 1993; Moriasi *et al.*, 2007; Rode *et al.*, 2007):

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (2.63)$$

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^n y_i} \cdot 100 \quad (2.64)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \quad (2.65)$$

donde \bar{y} es la media de los valores experimentales, y_i son los valores experimentales, \hat{y}_i son los valores obtenidos del modelo dinámico de estimación de parámetros y n es el número de datos experimentales.

2.4 PROBLEMA DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO DE LAGUNAS DE TRATAMIENTO

Se formuló un problema de estimación de parámetros para el modelo de lagunas de tratamiento. La resolución del problema de estimación de parámetros se realiza a los fines de ajustar el modelo matemático, planteado en la sección 2.3, con los datos experimentales disponibles para este sistema. Los datos experimentales, presentados en la sección 2.2.3 para la estimación de parámetros fueron obtenidos durante el período de 151 días (correspondientes a los meses de enero a mayo) para adecuar el funcionamiento de las lagunas de tratamiento de JUGOS S.A. al marco regulatorio de descarga de efluentes exigido en la provincia de Río Negro. El problema de optimización dinámica para la estimación de parámetros se resuelve minimizando la siguiente función objetivo, mediante la manipulación de las variables de control o grados de libertad, que en este caso serán los parámetros del problema de optimización:

$$\varphi(p) = \sum_{l=1}^{N_D} (x(t_l) - \bar{x}_l)^T \cdot W \cdot (x(t_l) - \bar{x}_l) \quad (2.66)$$

donde \bar{x}_i es el conjunto de N_D datos experimentales obtenidos en el tiempo t_i , $x(t_i)^T = [z(t_i)^T]$ son las correspondientes variables diferenciales calculadas para los componentes medidos y W es la matriz de pesos para la función de mínimos cuadrados.

Dicha función objetivo está sujeta al modelo mecanístico desarrollado en la sección 2.3 para las lagunas de tratamiento biológico, que resulta en un sistema de ecuaciones diferencial algebraico (DAE), cuyas condiciones iniciales y cotas sobre las variables se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$p^{LB} \leq p \leq p^{UB} \tag{2.67}$$

$$[X]_i = a[mg/l] \tag{2.68}$$

Por otro lado, p^{LB} y p^{UB} son las cotas inferiores y superiores sobre los parámetros estimados mientras que $[X]_i$, son las condiciones iniciales para las distintas ecuaciones diferenciales expresadas en $mg.L^{-1}$.

Una de las ventajas de trabajar con la plataforma gPROMS es que la misma reduce el índice de los sistemas de ecuaciones diferencial algebraico automáticamente. El índice de un sistema DAE es un número entero que representa el número mínimo de diferenciaciones del sistema DAE (con respecto a la variable independiente), requerida para convertir el DAE en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinario (ODE) para el problema original de variables algebraicas y diferenciales. En general, en los problemas de ingeniería se utilizan hipótesis de modelado que hacen que los problemas resultantes sean de alto índice. Ejemplos de estas hipótesis serían: despreciar el *hold-up* de vapor en el balance de masa en un evaporador de cinco efectos para llevar a cabo la concentración de jugos, o despreciando el *hold-up* de energía interna en el

balance de energía en cada uno de los efectos del evaporador. Se han propuestos diversos algoritmos para la reducción del índice de problemas de alto índice. Uno de estos algoritmos está implementado en la plataforma gPROMS (PSEnterprise, 2009).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados numéricos obtenidos al resolver el problema de optimización dinámica para la estimación de los parámetros óptimos para el modelo de las lagunas. El problema resuelto es de 162 ecuaciones y 209 variables (122 variables algebraicas y 20 diferenciales), que como se mencionó anteriormente, surge de plantear los balances de masa para los principales componentes del sistema de lagunas de tratamiento. El modelo matemático ha sido formulado en un entorno de optimización dinámica y resuelto con una estrategia de parametrización del vector de variables de control (PSEnterprise, 2009), considerando un horizonte de tiempo de 151 días (cinco meses de operación de alta temporada comprendidos entre enero y mayo).

El valor inicial de la función objetivo es de 613,31 y alcanza el valor final de 290,33 en 21 iteraciones (15 segundos). En la Tabla 2.5, se presentan los parámetros óptimos obtenidos:

Tabla 2.5: Set de parámetros óptimos para el modelo de las lagunas de tratamiento.

Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad	Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad
bm_B	0,044	0,039	1/día	$f_{on,B}$	0,500	0,839	s/u
bm_C	0,111	0,127	1/día	$f_{on,Y}$	0,500	0,576	s/u
bm_D	0,043	0,038	1/día	$f_{op,A}$	0,500	0,447	s/u
bm_G	0,047	0,159	1/día	$f_{op,B}$	0,500	0,465	s/u
bm_Y	0,500	0,766	1/día	$f_{op,Y}$	0,500	0,537	s/u
K_1	0,983	1,389	1/m	$\alpha_{nc,B}$	0,140	0,138	mg N/mg C
K_{nit}	3,493	8,545	mg/L	$\alpha_{nc,Y}$	0,140	0,169	mg N/mg C
K_{dbo}	0,500	6,230	mg/L	$\alpha_{pc,B}$	0,030	0,030	mg P/mg C
K_{den}	5,000	1,153	mg/L	$\alpha_{pc,Y}$	0,030	0,027	mg P/mg C
K_{mpc}	1,000	1,095	mg/L	$\alpha_{oc,A}$	3,266	3,322	mg O ₂ /mg C
k_{ni}	0,037	0,030	1/día	$\alpha_{oc,B}$	1,512	1,347	mg O ₂ /mg C
k_{db}	0,090	0,078	1/día	$\alpha_{oc,Y}$	1,612	1,388	mg O ₂ /mg C
k_{dn}	0,040	0,043	1/día	α_{on}	4,570	3,664	mg O ₂ /mg N
k_{mn}	0,030	0,024	1/día	α_{op}	13,333	12,018	mg O ₂ /mg P
k_{mp}	0,038	0,034	1/día	pr_B	0,001	0,0008	1/día

Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad	Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad
$I_{opt,C}$	174,134	246,938	Ly/día	pr_C	0,001	0,001	1/día
$I_{opt,D}$	22,600	31,374	Ly/día	pr_D	0,001	0,084	1/día
$I_{opt,G}$	150,000	150,938	Ly/día	pr_G	0,001	0,523	1/día
$K_{o_2,B}$	0,200	0,168	mg/L	$\Theta_{m,B}$	1,151	1,126	s/u
$K_{p,B}$	0,106	0,093	mg/L	$\Theta_{m,C}$	0,960	1,110	s/u
$K_{p,C}$	0,003	0,003	mg/L	$\Theta_{m,D}$	1,280	1,130	s/u
$K_{p,D}$	0,231	0,268	mg/L	$\Theta_{m,G}$	1,905	3,824	s/u
$K_{p,G}$	0,072	0,302	mg/L	$\Theta_{m,Y}$	1,500	1,536	s/u
$K_{p,Y}$	0,100	0,100	mg/L	Θ_{dbo}	1,050	1,083	s/u
$K_{pH,B}$	185,000	225,774	s/u	Θ_{ni}	1,080	0,950	s/u
$K_{pH,C}$	150,000	128,080	s/u	Θ_{dn}	1,050	1,079	s/u
$K_{pH,D}$	150,000	219,664	s/u	Θ_{mn}	1,124	1,381	s/u
$K_{pH,G}$	150,000	178,664	s/u	Θ_{mp}	1,137	1,242	s/u
$K_{n,B}$	0,010	0,006	mg/L	$U_{max,B}$	0,850	0,981	1/día
$K_{n,C}$	0,025	0,026	mg/L	$U_{max,C}$	0,297	0,264	1/día
$K_{n,D}$	0,065	0,037	mg/L	$U_{max,D}$	1,612	2,538	1/día

Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad	Parámetro	Valor inicial	Valor final	Unidad
$K_{n,G}$	0,045	0,174	mg/L	$U_{max,G}$	1,111	1,355	1/día
$K_{n,Y}$	0,010	0,013	mg/L	$U_{max,Y}$	2,133	1,679	1/día
$f_{on,A}$	0,500	1,239	s/u	-	-	-	-

Por otro lado, en las Figuras 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 se presentan las evoluciones de las principales variables en el sistema de lagunas de tratamiento, correspondientes a fósforo orgánico, fosfato, nitrógeno orgánico, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, bacterias y levaduras, durante el período de tiempo considerado. Se puede observar que los perfiles de concentración obtenidos se ajustan adecuadamente a los datos experimentales utilizados para la resolución del problema de estimación de parámetros. Esto se verifica mediante el cálculo de los índices estadísticos desarrollados en la sección 2.3.3, los cuales se presentan en la Tabla 2.6, dejando en evidencia que el modelo es útil para predecir el comportamiento dinámico de las variables del sistema.

Tabla 2.6: Error medio (EM), error relativo porcentual (ER) e índice de correlación (d) de las principales variables del modelo dinámico.

Variable	EM (mg/L)	ER (%)	d (adimensional)
<i>Fósforo orgánico</i>	0,002	23,7	0,94
<i>Fosfato</i>	0,035	29,2	0,76
<i>Nitrógeno orgánico</i>	0,687	39,3	0,90
<i>Amonio</i>	0,001	33,3	0,94
<i>Nitrato</i>	-0,001	100,8	0,29
<i>Oxígeno disuelto</i>	-0,125	62,8	0,76
<i>DBO</i>	-273,623	35,2	0,90
<i>Bacterias</i>	-0,438	27,7	0,96
<i>Levaduras</i>	-6,143	63,7	0,92

Como se puede observar, los valores adimensionales del coeficiente de correlación (d) se encuentran cercanos a 1, a excepción de la variable de estado que representa la concentración de nitrato en el sistema de tratamiento de efluentes. Esto se debe principalmente a que valor predicho por el modelo para evaluar la performance de esta variable se encuentra alejado respecto del dato experimental. Al no disponer de un conjunto abundante de datos experimentales el ajuste de parámetros se realiza con algunos datos insuficientes. En particular el valor de la concentración de nitrato se encuentra muy alejado del valor

experimental, por lo que, si se descarta este dato para calcular el coeficiente de correlación, se obtiene un valor de 0,88.

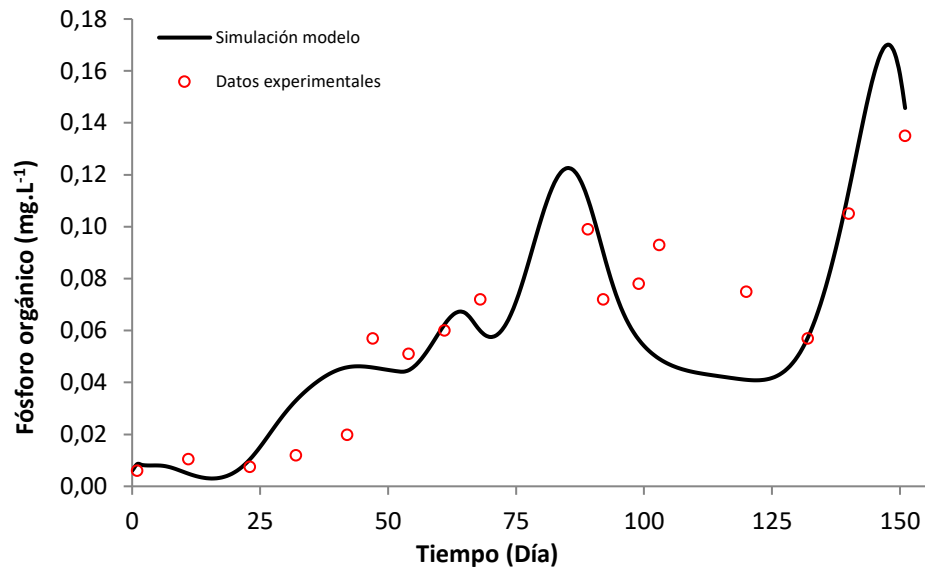


Figura 2.12: Perfil de concentración del fósforo orgánico a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

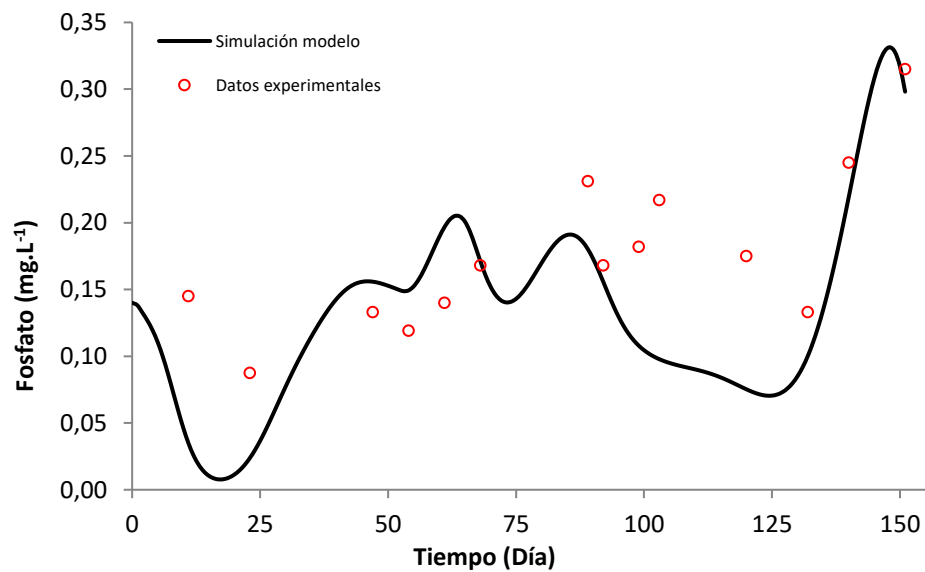


Figura 2.13: Perfil de concentración del fosfato a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

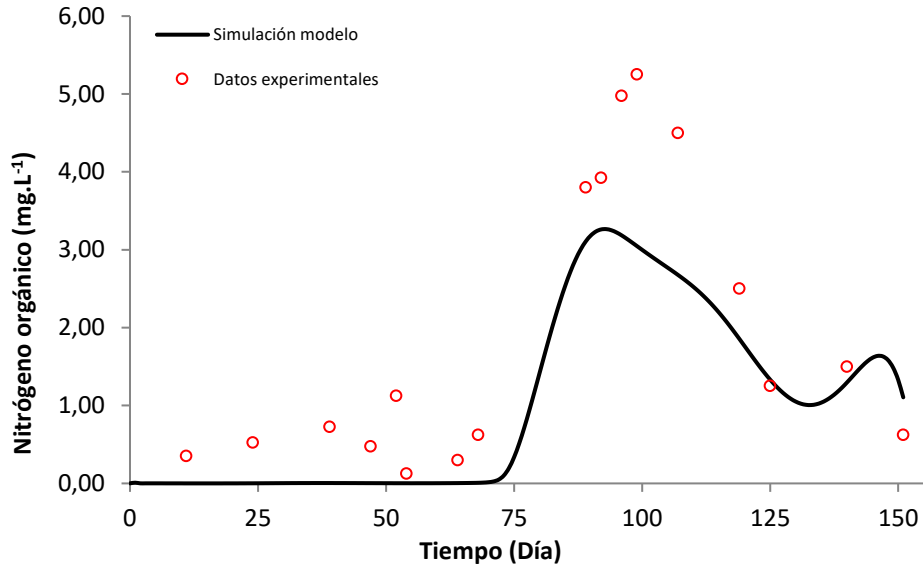


Figura 2.14: Perfil de concentración del nitrógeno orgánico a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

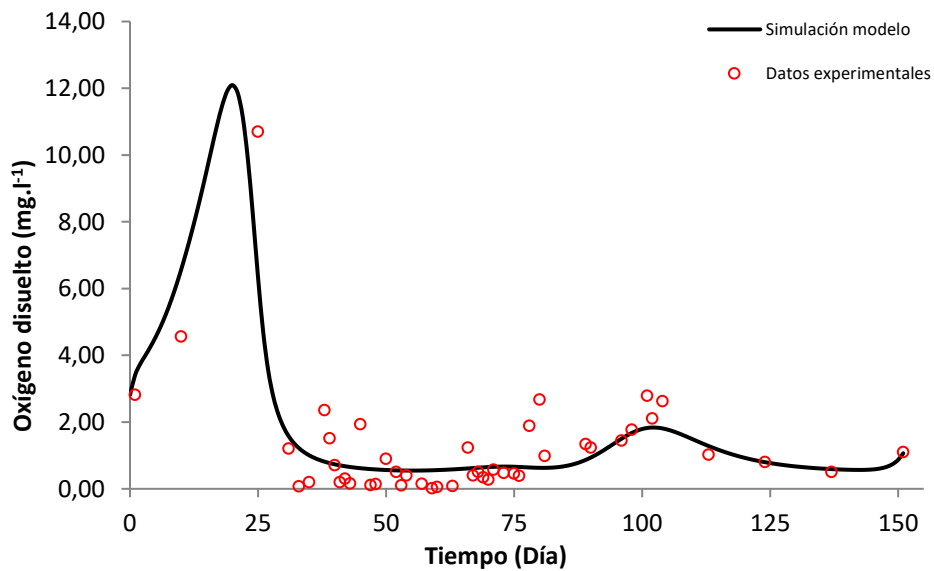


Figura 2.15: Perfil de concentración del oxígeno disuelto a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

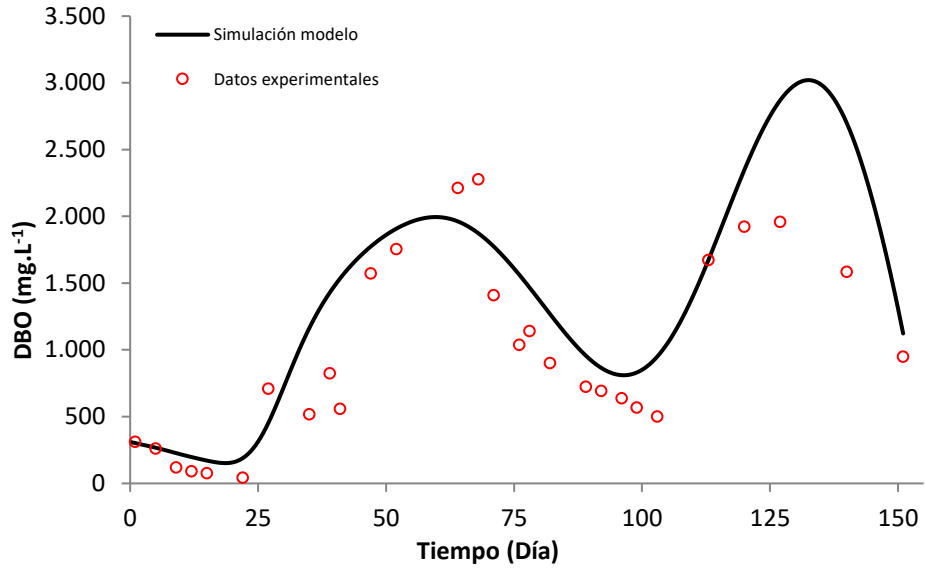


Figura 2.16: Perfil de concentración del DBO a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

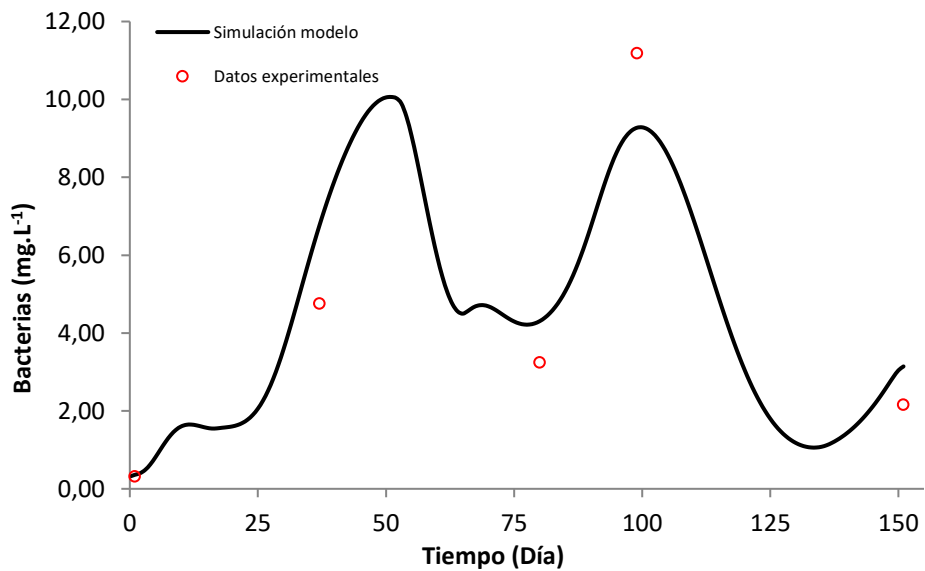


Figura 2.17: Perfil de concentración de bacterias a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

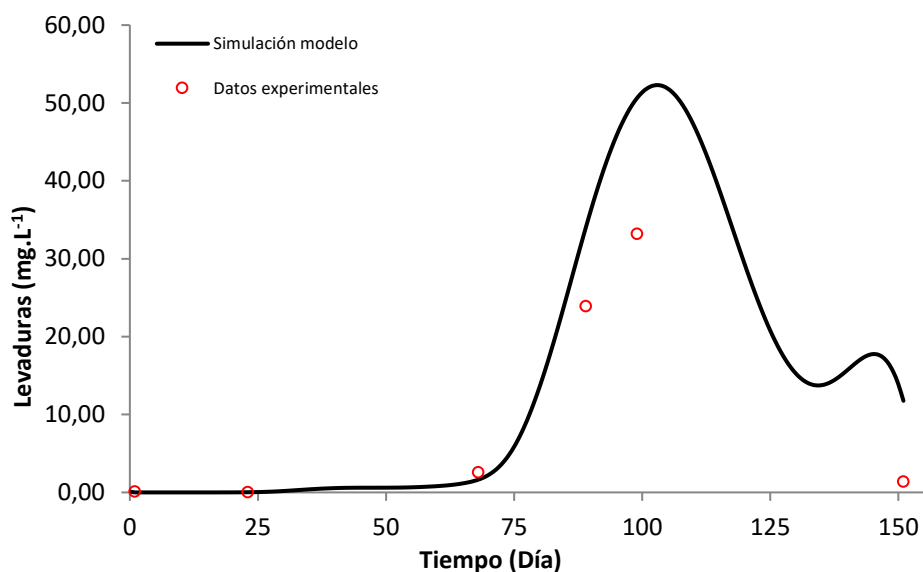


Figura 2.18: Perfil de concentración de levaduras a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de tres muestras.

Con el objetivo de poder comparar y analizar los resultados obtenidos, se presenta en la Figura 2.19 la normalización de los perfiles de concentración de oxígeno disuelto, DBO y bacterias, junto con el caudal de entrada al sistema de tratamiento biológico. Con el fin de interpretar dichos resultados, además se presentan los perfiles normalizados (relación entre el valor temporal de una variable respecto del valor máximo de la misma) de fruta procesada mensualmente en el período de estudio (Figura 2.20), y la comparación entre el ingreso de manzana proveniente directamente de chacra y la que ingresa por descarte de los galpones de empaque (Figura 2.21). En ambos casos la información corresponde al total de fruta procesada o ingresada mensualmente entre los meses de enero y mayo. La normalización de dichos datos se realiza por exigencias de confidencialidad de la empresa.

Debido a que las figuras mencionadas presentan diferentes ejes temporales, se presenta la Tabla 2.7 para identificar el período de días correspondiente con el mes en cuestión:

Tabla 2.7: Equivalencias entre períodos, meses y días.

Período	Mes	Día
1	Enero	1 - 31
2	Febrero	32 - 59
3	Marzo	60 - 90
4	Abril	91 - 120
5	Mayo	121 - 151

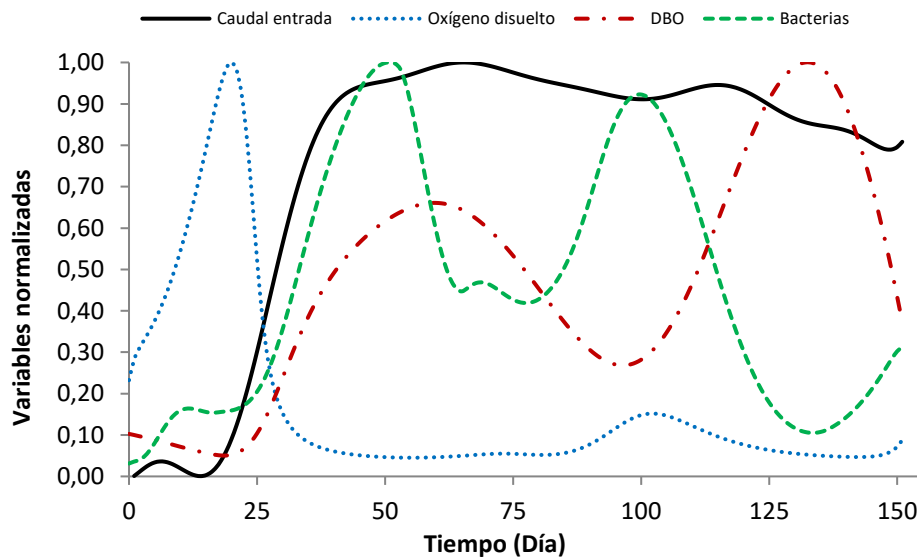


Figura 2.19: Perfiles de concentración de oxígeno disuelto, DBO, bacterias y del caudal de entrada normalizados a lo largo del horizonte de tiempo.

A continuación, para comprender en detalle los resultados obtenidos en la Figura 2.19, se desarrollan las conclusiones correspondientes a cada uno de los períodos descritos anteriormente:

- **Período 1:** Como todos los años, al inicio de este período, la empresa se encuentra en parada de planta a la espera del inicio de la temporada de cosecha hacia finales de enero. Este dato se confirma en la Figura 2.20, donde los volúmenes reales de ingreso de fruta para este período son muy bajos. Por tal motivo, puede apreciarse un aumento en la concentración de oxígeno en la laguna aeróbica debido al bajo caudal de entrada a la laguna. Este poco caudal enviado al sistema de tratamiento, correspondiente a efluente de operaciones de limpieza y mantenimiento del equipamiento, que no contiene elevada carga orgánica, permite de esta manera recuperar las condiciones óptimas de funcionamiento en las lagunas. Por lo tanto, también se aprecian mejoras en las concentraciones de bacterias que serán las responsables de degradar la materia orgánica.
- **Período 2:** Como se puede apreciar en la Figura 2.20, los ingresos de fruta comienzan a ser elevados, destacándose mayor cantidad de pera que de manzana, coincidente con el tiempo de cosecha de la variedad. Esto viene acompañado de un aumento en el caudal de ingreso a las lagunas de tratamiento de efluentes. Como es de esperar, se incrementa la DBO y comienza a progresar el crecimiento de bacterias aeróbicas en la laguna. Por consiguiente, se puede observar la disminución de la concentración del oxígeno disuelto en esta etapa del tratamiento debido a la actividad microbiana. Cabe destacar que el aumento abrupto de la concentración del DBO, se debe principalmente a que el efluente generado durante el procesamiento de la pera es mucho más complejo que el de manzana. Esta afirmación se corrobora con información que ha recabado la empresa durante todos estos años de operación, ya que no

hay trabajos científicos que expliquen y demuestren esta problemática que diariamente afecta este tipo de industrias. Esta elevada carga orgánica sumada a la falta de oxígeno disuelto al final de este período provoca una disminución considerable en la concentración de bacterias aeróbicas.

- **Período 3:** Como se ve en la Figura 2.20, puede apreciarse que comienza a invertirse la cantidad procesada de pera y manzana, siendo esta última de mayor proporción. De esta manera, puede observarse una disminución en la DBO, lo que genera una estabilización de la concentración de bacterias.
- **Período 4:** En este período se puede confirmar que el efluente generado durante el procesamiento de manzana es más adecuado para el sistema de tratamiento biológico, ya que mejora la concentración de bacterias y oxígeno disuelto, lo cual permite alcanzar un mínimo en la concentración de DBO.
- **Período 5:** Como se puede observar en la Figura 2.20, comienza a disminuir la cantidad de fruta procesada, por lo tanto, el caudal de efluente que ingresa a la laguna sigue la misma tendencia. En este periodo, además, ocurre un incremento significativo de la DBO, y por consiguiente una disminución en la concentración de bacterias y oxígeno disuelto, asociado al estado de la fruta procesada en el período anterior. Para comprender esta situación, es necesario recurrir a la Figura 2.21, donde se aprecia cómo se modifica el origen de la fruta procesada durante toda la temporada. En esta figura, solo se describe la evolución de ingreso de manzana, ya que como se mencionó anteriormente, es la fruta de mayor

impacto sobre las condiciones operativas de las lagunas de tratamiento de efluente. Es importante destacar que, al inicio de la temporada de cosecha, la fruta que se industrializa tiene un excelente estado y proviene principalmente de los descartes de los galpones de empaque, mientras que la fruta que se procesa al final de la temporada presenta un mayor grado de madurez y proviene de las chacras. Esta condición impacta negativamente sobre el funcionamiento del sistema de tratamiento, ya que, al procesar fruta con alto grado de madurez, el efluente generado presenta una carga orgánica muy elevada.

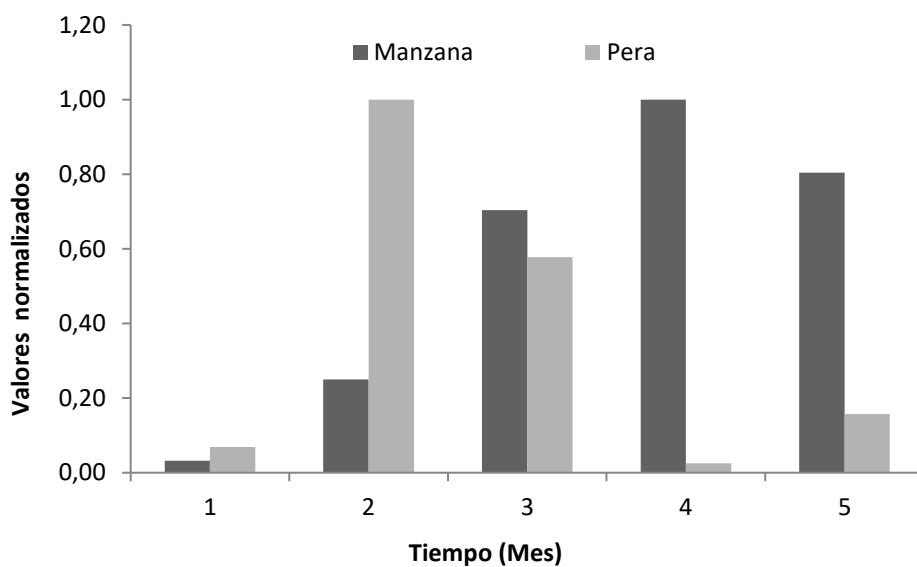


Figura 2.20: Fruta procesada mensualmente en el período de estudio.

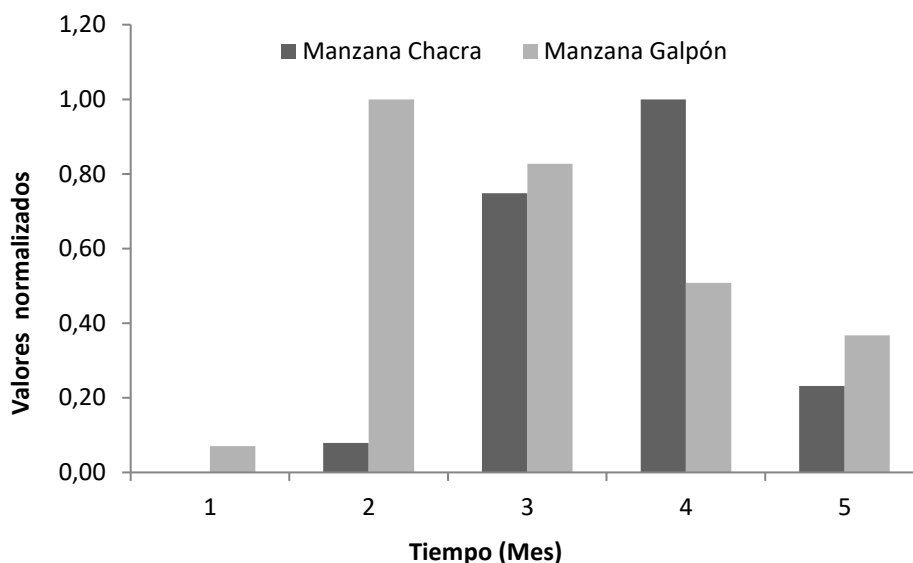


Figura 2.21: Manzana recibida mensualmente proveniente de chacra y galpón de empaque.

2.6 MEJORAS PROPUESTAS AL SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

A partir del modelado y análisis del sistema de tratamiento de efluentes, se pudo detectar que las altas cargas orgánicas de ingreso, debidas principalmente a las fluctuaciones entre las moliendas de manzana y pera, ocasionan regularmente la falta de oxígeno en todo el sistema. De esta manera, se pudo verificar que los motores de eje vertical que se encontraban instalados en el sistema de tratamiento, no lograban una transferencia adecuada de oxígeno al medio líquido para que los microorganismos puedan degradar el efluente industrial.

Por lo tanto, se trabajó en el rediseño del sistema de tratamiento. Entre los factores determinantes que afectan al sistema, el coeficiente de transferencia de oxígeno es fundamental para generar un ambiente óptimo a los microorganismos que permite modificar los parámetros permitidos de vuelco, siendo una de las opciones el reemplazo de los equipos aireadores que se encontraban instalados.

En el mercado se pudo encontrar un equipo aireador que permite incrementar la oxigenación del agua de manera más efectiva, debido a que el mismo genera

flujos tangenciales al cuerpo de agua, aumentando la superficie de contacto entre aire y agua.

A continuación, se presentan dos motores en funcionamiento, donde puede apreciarse la diferencia entre ambos (Figura 2.22). Por un lado, tenemos los aireadores con hélice, los cuales son los originales del sistema y aportan $0,8 \text{ kg O}_2 \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$, mientras que por otro lado, se pueden apreciar los aireadores con helicoide que generan una tasa de aireación de $1,2 \text{ kg O}_2 \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$.

Además, en la Figura 2.23 se presenta cada uno de los aireadores anteriormente mencionados, donde es visible la parte sumergida del aireador responsable del movimiento del volumen líquido que permite la transferencia de oxígeno a la laguna.

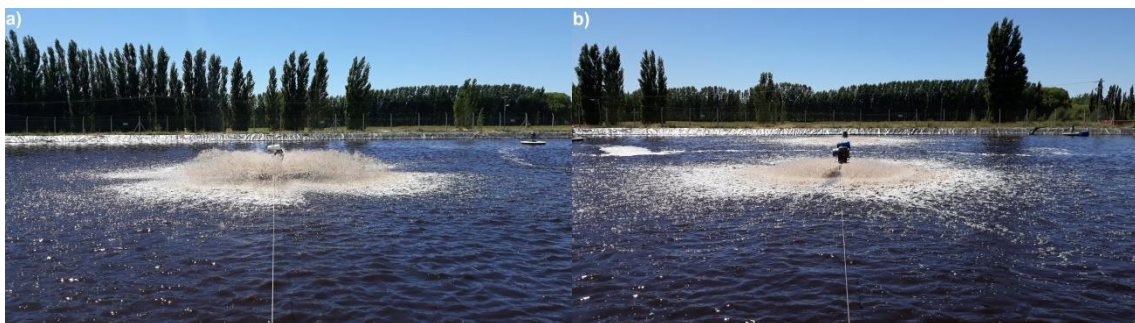


Figura 2.22: Equipo de aireación con hélice de $0,8 \text{ kg} \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$ (a) y equipo de aireación con helicoide de $1,2 \text{ kg} \cdot (\text{HP} \cdot \text{h})^{-1}$ (b).

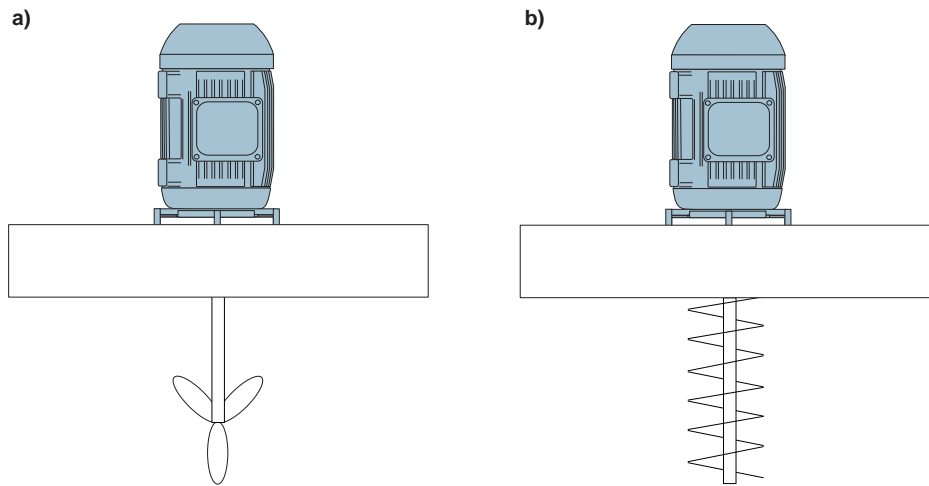


Figura 2.23: Equipo de aireación con hélice (a) y equipo de aireación con helicoides (b).

En la Figura 2.24, se muestra una comparación de los registros de oxígeno disuelto en la laguna aeróbica para diferentes equipos aireadores. Cabe destacar que los datos correspondientes a los aireadores con hélice son los utilizados en el desarrollo del modelo matemático presentado en la sección 2.3. Con la implementación de los equipos aireadores con helicoides, se mejoró significativamente la concentración de oxígeno en el volumen líquido. De esta manera, se aseguran condiciones más adecuadas para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica del efluente industrial en la laguna aeróbica. Esta condición resulta favorable para disminuir la DBO en la laguna facultativa, y así cumplir los parámetros permitidos de vuelco.

Esta afirmación se comprueba en la Figura 2.25, donde puede visualizarse la normalización de la concentración de la DBO a la salida del sistema de tratamiento, previo al vertido del efluente al arroyo Salado. Los registros de la DBO con la utilización de aireadores con helicoides son menores a los obtenidos con los equipos de aireación con hélice. La normalización de dichos datos se realiza por exigencias de confidencialidad de la empresa.

Sin embargo, para verificar la mejora de la aireación en la DBO previo al vuelco, se debe comparar la DBO de alimentación al sistema de tratamiento para confirmar que los efluentes generados son de similares características. De esta manera, en la Figura 2.26 puede observarse que los registros de la DBO a la entrada del sistema de lagunaje son parecidos, fluctuando entre los 590 y 3.000 mg.L⁻¹ durante la alta temporada.

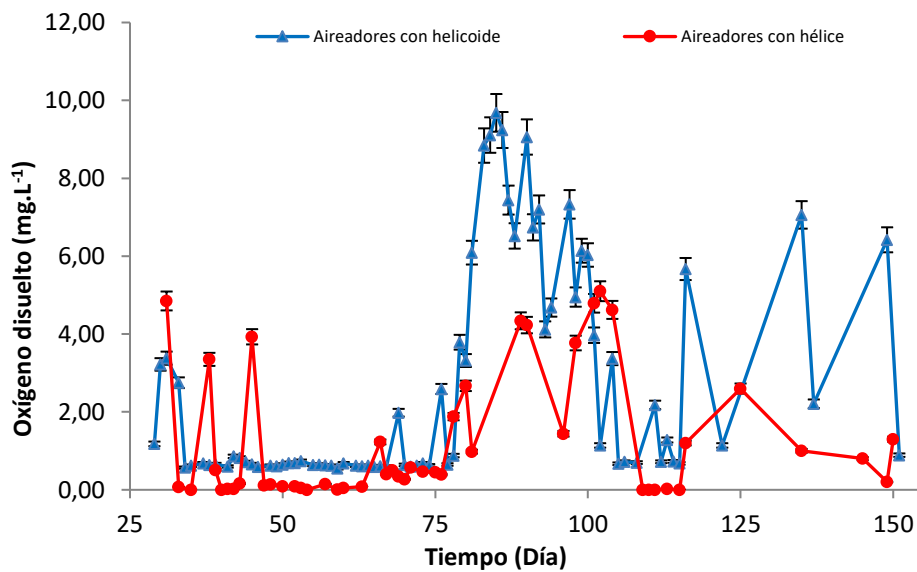


Figura 2.24: Datos reales de oxígeno disuelto con dos tipos de aireadores diferentes a lo largo de los meses de operación de las lagunas de tratamiento. Los valores son promedios de las mediciones ± desvío estándar.

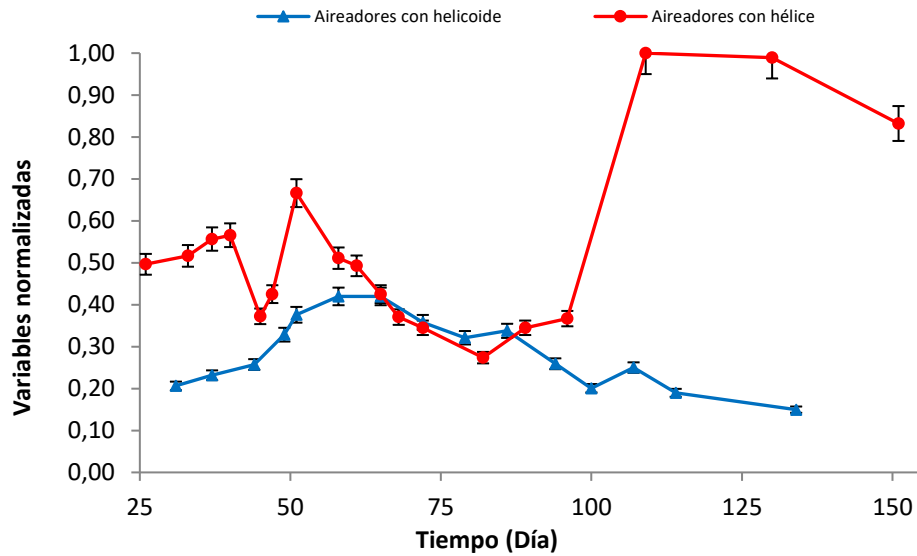


Figura 2.25: Datos normalizados de la DBO a la salida de las lagunas de tratamiento a lo largo de los meses de operación. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

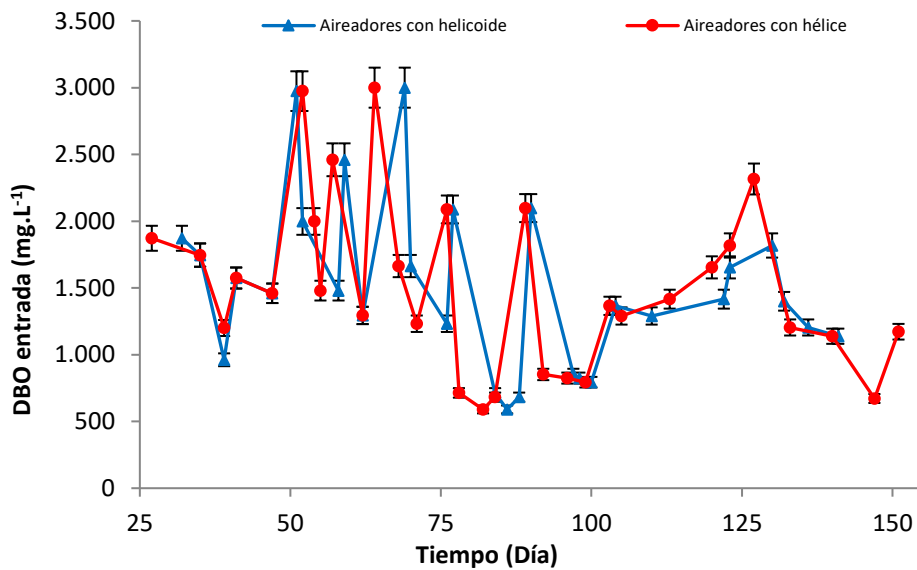


Figura 2.26: Datos reales de la DBO a la entrada de las lagunas de tratamiento a lo largo de los meses de operación. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

2.7 PROBLEMAS ASOCIADOS AL TRATAMIENTO INDUSTRIAL DE EFLUENTES LÍQUIDOS

A continuación, se listan algunos de los problemas que surgieron durante el trabajo realizado para llevar a cabo este capítulo. Una de las cuestiones más

relevantes detectadas como inconveniente operativo es tener que operar el sistema con un volumen de efluente superior al de diseño. Sumado a este punto, enviar a la planta de tratamiento cualquier efluente que se genera durante el procesamiento de alimentos sin tener en cuenta sus características fisicoquímicas o sin realizar algún acondicionamiento previo (por ejemplo, Efluente de manzana vs Efluente de pera), puede ocasionar una desestabilización del sistema. Otro tema muy importante, es que los sistemas de tratamiento necesitan de mano de obra calificada para operar sin inconvenientes y muchas veces no se cuenta con personal capacitado. Cada una de estas cuestiones influye significativamente en tres variables críticas: pH, temperatura y oxígeno disuelto, que son muy importantes para asegurar el control de las lagunas de tratamiento. Estas variables deben encontrarse en el siguiente rango para un buen funcionamiento del sistema:

$$7,0 \leq pH \leq 8,5$$

$$8,0^{\circ}C \leq T \leq 40,0^{\circ}C$$

$$1,0 \text{ mg/L} \leq OD \leq 3,0 \text{ mg/L}$$

Cuando estos parámetros no se encuentran dentro de ese rango, suelen aparecer problemas que ocasionan un alejamiento del régimen normal de trabajo en el sistema de tratamiento.

Cuando ocurren reacciones anaeróbicas indeseables en el sistema de tratamiento aeróbico, pueden generarse diversos compuestos orgánicos que en principio producen malos olores, pero además atacan los materiales metálicos y ocasionan corrosión en los mismos (Middlebrooks *et al.*, 1982). En esta

situación, los sensores metálicos que sostienen los equipos de aireación pueden cortarse, provocando que los motores se inviertan y dañen, ocasionando de esta manera que la transferencia de oxígeno al medio líquido disminuya, si el equipo aireador no es reemplazado rápidamente.

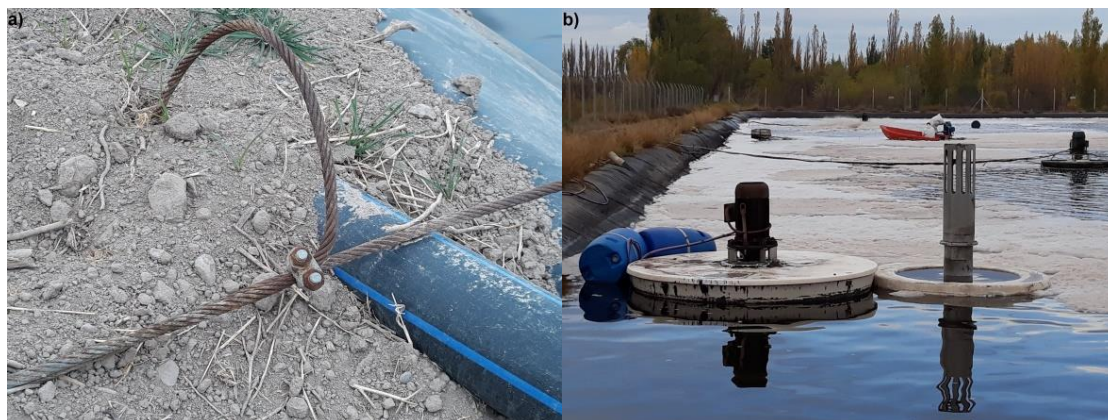


Figura 2.27: Sensores metálicos rotos por efecto de la oxidación (a) y aireadores invertidos en la laguna aeróbica (b).

Otro fenómeno habitual, asociado al crecimiento de microorganismos indeseable, es la formación de espuma en las lagunas aeróbicas. Esto ocurre principalmente por las fluctuaciones del pH hacia valores básicos. En este sentido, se produce una deficiencia en la transferencia de oxígeno, pero además, la espuma impide la penetración de la luz solar en la columna de agua (Conagua, 2015; Tilley *et al.*, 2018). En estas situaciones, es importante controlar diariamente el pH, y realizar el agregado de ácidos o bases para mantener el pH en el rango anteriormente descrito.



Figura 2.28: Generación de espuma en la laguna de tratamiento.

Con respecto a la laguna facultativa, en donde ocurren reacciones aeróbicas en la capa próxima a la superficie y reacciones anaeróbicas en el fondo de la misma, durante una operación normal los sólidos biológicos provenientes de la laguna aeróbica sedimentan y se depositan en el fondo de la laguna. Sin embargo, cuando el sistema se encuentra fuera de régimen, se produce mayor cantidad de reacciones anaeróbicas en la columna de líquido. Los gases que se generan en estas reacciones ocasionan el levantamiento de estos sedimentos hasta la superficie de la laguna, de manera que finalmente se incumpla la normativa referida a los parámetros permitidos de vuelco. Como solución a este problema, los sedimentos superficiales se agrupan mediante la utilización de un sistema de redes como se muestra en la Figura 2.29. Una vez colectados los sedimentos superficiales se emplea un sistema de riego con el fin de vencer la fuerza de flotación y lograr la precipitación de estos hasta el fondo de la laguna.



Figura 2.29: Levantamiento de sedimentos en la laguna facultativa.

Debido al aumento de las reacciones anaeróbicas, otro problema que surge es el desarrollo de la bacteria *Thiopedia rosea*, la cual convierte el hidrógeno sulfurado e hidrosulfurado a azufre. En estos casos, la laguna se torna de color rojizo, dando el nombre de “laguna rosada” (García-Ruesta, 2008).



Figura 2.30: Enrojecimiento de la laguna de tratamiento por aparición de *Thiopedia rosea*.

Uno de los problemas que normalmente no es tenido en cuenta, pero resulta ser el de mayor impacto en los sistemas de tratamiento de efluentes corresponde a la rotura de la geomembrana. Es importante remarcar que estos sistemas de tratamiento requieren de mano de obra calificada y capacitada para realizar el mantenimiento y operación de cada uno de los elementos de las lagunas. Si no se realizan maniobras controladas durante los movimientos de los aireadores

para su mantenimiento o reemplazo, es muy habitual que se produzca el daño de la geomembrana que impermeabiliza el suelo. De esta manera, el efluente puede ingresar entre esta y el suelo, y se presentan condiciones propicias para el crecimiento de microorganismos anaeróbicos, los cuales generan gran cantidad de gases, y provocan el levantamiento de la geomembrana. Por tal motivo, se debe vaciar la laguna para reparar dicha rotura, que demorará varios meses en volver a estar disponible. Esta situación se torna crítica, ya que se corre el riesgo de no cumplir con los parámetros permitidos de descarga al estar operando con un sistema de tratamiento de efluentes incompleto.



Figura 2.31: Levantamiento de la geomembrana por rotura debido a malas maniobras operativas.



Figura 2.32: Reemplazo de geomembrana por varias roturas.

Por último, es importante resaltar que, para alcanzar y mantener en el tiempo los objetivos propuestos en función de cumplir con la legislación ambiental, es de vital importancia conocer los costos necesarios para lograr cumplir con los parámetros permitidos de vuelco de los efluentes industriales de la empresa en un curso hídrico que el organismo regulador exige. Por lo general, es muy difícil determinar los costos reales asociados al tratamiento de efluentes porque al estar constituido por un sistema biológico el comportamiento del mismo se torna complejo. Es por esto que los costos de inversión inicial y los gastos de funcionamiento varían mucho con el fin de evitar deficiencias durante la operación del sistema que puedan ocasionar multas económicas por infracción a las normas nacionales. La bibliografía existente es limitada y solo intenta realizar una evaluación aproximada del comportamiento de los costos para distintas tecnologías de tratamiento en función de los caudales y características del efluente.

Para el análisis económico estimativo de costos se utilizaron datos reales suministrados por la empresa JUGOS S.A., los cuales son presentados en porcentajes por exigencias de confidencialidad de la compañía. Los costos de inversión inicial fueron de 1.900.000 dólares, y corresponden a las inversiones que fueron necesarias para la construcción de la infraestructura física del sistema, entre los que se destacan los estudios preliminares del terreno, diseño de ingeniería, estudios de impacto ambiental, movimiento de suelo, obras de albañilería, colocación de geomembrana impermeabilizante, instalación del sistema de bombeo, compra de equipos aireadores e instalación del tendido eléctrico. Por otro lado, los gastos de funcionamiento que debieron realizarse para garantizar el buen desempeño de los procesos y operaciones del

tratamiento de efluentes para asegurar que el sistema sea operado y mantenido de manera eficiente, son presentados en la Figura 2.33 y están asociados a los costos de operación, mantenimiento y salarios del personal. Como puede observarse, el consumo eléctrico es el gasto más importante seguido por los costos de mantenimiento. El suministro eléctrico de este sector representa el 26,3% del costo total que la empresa paga de facturación eléctrica, mientras que el costo de mantenimiento constituye el 3,9% del total. Estos gastos de funcionamiento asociados al sistema de tratamiento de efluentes incrementan en un 2,6% los costos de procesamiento para la obtención de los jugos concentrados. Es importante resaltar que los datos reportados intentan solo estimar los costos directos asociados al sistema de tratamiento secundario, pero sin involucrarse en los valores exactos de cada uno de los rubros que componen el costo total del sistema. Para determinar un análisis riguroso se deberían incluir los costos directos del sistema de tratamiento primario y varios costos indirectos con por ejemplo los análisis de laboratorio para el seguimiento del proceso de tratamiento.

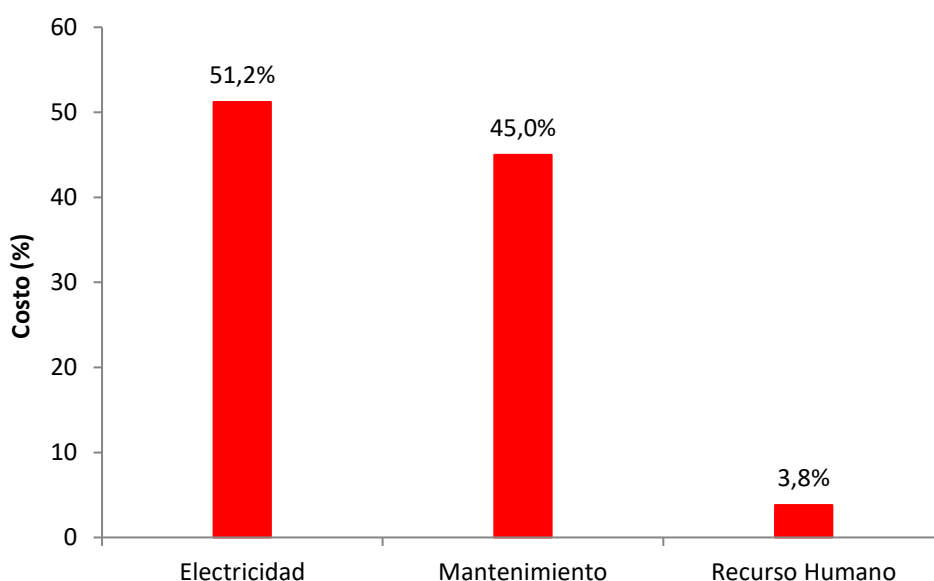


Figura 2.33: Distribución de costos de funcionamiento del sistema de tratamiento de efluentes.

2.8 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó el diseño de las lagunas de tratamiento de efluentes industriales de una agroindustria, donde fue posible estimar los valores críticos de diseño que aseguran que se cumplirá con la normativa referida a los parámetros permitidos de descarga. Posteriormente, se formuló un modelo matemático dinámico basado en primeros principios que ha resultado de mucha utilidad para la empresa JUGOS S.A. Se realizó la calibración de dicho modelo utilizando datos experimentales del sitio de estudio, resolviendo un problema de estimación de parámetros dinámico en el entorno gPROMS.

En base a los resultados experimentales y simulaciones del modelo matemático se detectó la limitación de oxígeno en la laguna aeróbica. Esta limitación se redujo considerablemente con la modificación de los aireadores, lo que llevó a una mejora en la eficiencia de la degradación del sistema de tratamiento biológico que permite reducir el impacto ambiental de los efluentes generados.

El modelo matemático riguroso, calibrado con datos específicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria juguera, es una herramienta útil para la optimización del funcionamiento de las diferentes lagunas de tratamiento a través de la formulación de problemas de control óptimo que tengan como variables de control la aireación y la alimentación de nutrientes según los caudales de entrada de materia orgánica. Además, constituyen herramientas poderosas para el diseño y ampliación del sistema de tratamiento si la empresa decide aumentar su volumen de producción, dando soporte en la toma de decisiones durante el proceso productivo.

Capítulo 3

COMPOSTAJE DE ORUJO DE MANZANA Y PERA PROVENIENTES DE UNA INDUSTRIA JUGUERA

3.1. INTRODUCCIÓN

La industria de los jugos concentrados de manzana y pera obtenidos en las agroindustrias del Alto Valle de Río Negro constituyen importantes *commodities* para la economía de la región, ya que el 95% del jugo producido se exporta, siendo Estados Unidos el principal comprador para su utilización en el endulzado de gaseosas. La actividad de la agroindustria alimentaria ligada al procesamiento de jugo de distintas variedades de manzana (*Malus domestica*) y pera (*Pyrus communis*) genera grandes volúmenes de residuos denominados orujos o bagazos, ya que aproximadamente el 30% de la producción nacional de manzanas y peras se procesa con fines industriales (Bevilacqua & Storti, 2011; Sánchez & Villarreal, 2012). En la región Patagónica se generan anualmente 360.000 toneladas de orujos provenientes de la producción de jugos concentrados y otras bebidas (Laos, 2013), siendo el destino principal la alimentación de rumiantes o la disposición final en rellenos sanitarios a cielo abierto (INTA, 2014). Los residuos sólidos industriales que son generados durante la producción de jugos concentrados pueden ser considerados como residuos no tóxicos y no peligrosos, por las características propias del procesamiento de frutas. Siempre y cuando se manipulen adecuadamente estos residuos, se puede destacar que no representan un peligro efectivo ni potencial para la salud humana y para el ambiente. Sin embargo, la gran cantidad de residuos sin ningún tipo de tratamiento que se acumulan año a año podrían representar un impacto ambiental negativo de considerable magnitud (Aramberri, 2018).

Los residuos generados en estas industrias están constituidos en gran medida por lignocelulosa, que es el principal componente de la pared celular de las

frutas. Básicamente están compuestos por tres tipos de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina, y presentan una organización estructural compleja, lo cual representa un factor limitante para su biodegradación (Commanday & Macy, 1985; Pérez *et al.*, 2002; Sánchez, 2009). La mayor parte de esta biomasa, a excepción de los subproductos de la agricultura o silvicultura, carece de valor económico en el contexto productivo y su acumulación por lo general causa problemas ambientales (Ravera *et al.*, 2008; Sánchez, 2009; Al-Momany & Ananbeh, 2011; Laos, 2013). La biodegradación de estos residuos de naturaleza lignocelulósica, con las herramientas biotecnológicas actuales permitirían la disminución de la contaminación ambiental (Rodríguez *et al.*, 2018).

Los grandes volúmenes producidos diariamente hacen necesario buscar alternativas de mayor valor agregado, por lo que analizar otras opciones para el aprovechamiento de esta biomasa residual es de interés no solo desde el punto de vista ambiental, brindando opciones para la disposición final de los mismos evitando su acumulación y posterior contaminación, sino también desde la visión económica, dando valor agregado a un residuo industrial de bajo costo. La relevancia de la propuesta en esta tesis radica en la necesidad de encontrar procedimientos que permitan reutilizar los desechos agroindustriales a fin de disminuir la contaminación ambiental y obtener una rentabilidad adicional en el Alto Valle de Río Negro.

La biodegradación aeróbica de residuos orgánicos constituye una forma simple y eficiente para transformar los desechos agroindustriales en acondicionadores de suelo (Matheus, 2004), realizando además tratamientos enzimáticos de elevado costo sobre dichos residuos (Howard *et al.*, 2003). Se han estudiado los beneficios sobre las propiedades químicas del suelo mediante la aplicación de

una enmienda a partir de alperujo (Ordóñez *et al.*, 1999). Se evaluaron los efectos de la restauración de la fertilidad de los suelos degradados por el cultivo de maíz utilizando un compost elaborado a partir de desechos sólidos de la industria azucarera (Arrieche & Mora, 2005), y además se analizaron los efectos del uso de residuos compostados de esta misma agroindustria sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Quiroz Guerrero & Pérez Vázquez, 2013). Por otro lado, se ha empleado bagazo de uva sin ningún tratamiento previo como enmienda orgánica en campos de cultivo, y se concluyó que es necesario someter al bagazo a un proceso de vermicompostaje antes de ser aplicado como enmienda orgánica al suelo con el fin de evitar la liberación de polifenoles que pueden inhibir el crecimiento de las raíces y en consecuencia afectar el desarrollo de las plantas (Martínez-Cordeiro *et al.*, 2013).

A nivel regional se han realizado estudios sobre la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos utilizando orujo de manzana y otros residuos (Laos *et al.*, 2012b). Estos desechos agroindustriales también se han utilizado como constituyente potencial en la elaboración de sustratos para la producción de hongos comestibles lignocelulósicos, entre los que se destacan especies del género *Pleurotus* (Martínez *et al.*, 2013; Rodríguez, 2014; Agüero *et al.*, 2015; Filippi *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2015). Además, se han realizado investigaciones empleando este orujo biodegradado por *Pleurotus* en la ración alimenticia de pollos de engorde (Cayolo *et al.*, 2019). La caracterización de subproductos de la industrialización de la manzana en vistas a su posible utilización en alimentación animal ha sido estudiada por varios autores. Se han informado incrementos de la digestibilidad luego de una fermentación en fase sólida del bagazo por levaduras adicionando urea y maíz molido (Becerra Bernal

et al., 2008). Se analizaron los efectos de la adición de bagazo de manzana fermentado sobre una dieta consistente en heno de avena, ensilaje de maíz y concentrado de levaduras, lográndose un incremento en los valores de digestibilidad *in vitro* (Mancillas Flores *et al.*, 2013). También se ha empleado “manzarina”, elaborada a partir de bagazo de manzana y manzana de descarte, para evaluar el valor nutritivo en el engorde de bovinos (Rodríguez Muela *et al.*, 2010).

Kopčić *et al.* (2014) trabajaron en el compostaje de una mezcla de orujo de manzana y residuos de tabaco a escala laboratorio con el fin de evaluar la eficiencia de biodegradación de la mezcla. Mao *et al.* (2017) estudiaron los efectos de la adición de orujo de manzana sobre la conservación de nitrógeno durante el compostaje de estiércol porcino, para inhibir las emisiones gaseosas de amoníaco y óxido nitroso. Pan *et al.* (2018) utilizaron orujo de manzana como suplemento ácido para el compostaje de lodos de depuradora. Hank & Hrebeckova (2023) determinaron la compostabilidad del papel, orujo de manzana y estiércol de caballo en un compostador eléctrico. Si bien algunos autores que han utilizado orujos de manzana y pera para la obtención de compost, los mismos se han centrado en el co-compostaje con otros residuos agroindustriales. Sin embargo, no se han encontrado en la literatura trabajos científicos en donde se haya estudiado la factibilidad de elaboración de compost empleando solamente residuos agroindustriales de manzanas y peras mediante un proceso de compostaje aeróbico en pilas con volteos.

La utilización de este tipo de tecnologías como lo es el compostaje permite el aprovechamiento de estos desechos agroindustriales para generar acondicionadores de suelo, que pueden ser utilizados tanto en fruticultura como

en horticultura. Por otro lado, el proceso de compostaje se convierte en una de las más atractivas elecciones, ya que por un lado es un tratamiento relativamente de bajo costo, pero por otro lado, permite recuperar parte de la materia orgánica que se pierde del suelo a través del proceso productivo. En otras palabras, se podría decir, que por medio del compostaje podemos devolver al suelo lo que del suelo se ha extraído.

Los orujos de manzana y pera se caracterizan por presentar una composición química constituida principalmente por agua, celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas (Nawirska & Kwaśniewska, 2005; Novozymes, 2011; Rocha Parra, 2018 y 2019). Este subproducto presenta una elevada resistencia a la descomposición aeróbica, debido principalmente al bajo pH y a la elevada humedad la cual impide el ingreso de aire. Estas características generan la aparición de malos olores y atracción de vectores, además de generar gases de efecto invernadero, por lo que es crucial controlar los parámetros operativos durante el procesamiento para la obtención de compost.

El procesamiento de los residuos orgánicos mediante la implementación de un proceso de compostaje es una práctica milenaria y siempre estuvo asociado a las buenas prácticas agrícolas para obtener nutrientes minerales que pueden ser utilizados por las plantas y para mejorar la estructura del suelo. El mismo consiste en un proceso biooxidativo controlado donde se transforma la materia orgánica cruda en un producto con valor agrícola: se origina un material orgánico que pasa por una etapa termofílica, durante la cual se produce la reducción de patógenos y de semillas de malezas, y otra etapa de maduración durante la que se degradan sustancias fitotóxicas, finalizando en un producto inocuo que no atrae vectores (“inodoro”) y que contiene nutrientes y materia orgánica estable

de lenta liberación de nitrógeno (Mazzarino *et al.*, 2012). En este sentido es indispensable realizar un control de las variables operativas como son el tamaño de partícula, aireación, humedad, temperatura, y variables de estabilidad y madurez (Mazzarino *et al.*, 2012), para obtener productos finales homogéneos, estables e inocuos (Kulcu & Yaldiz, 2004; Zayed & Abdel-Motaal, 2005; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013; Román *et al.*, 2013; Cruz *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2017). El principal indicador que se utiliza para evaluar la eficiencia del proceso de compostaje es el cumplimiento de una etapa termofílica y la posterior disminución de la temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente, mientras que el test de germinación es muy utilizado para evaluar la madurez del compost (Iannotti *et al.*, 1994; Cooperband *et al.*, 2003).

La aireación es un factor importante para que ocurra el compostaje, ya que el aporte de oxígeno es necesario para que se produzca la degradación aeróbica de los residuos. Una de las técnicas de producción de compost más simples es el compostaje en pilas o hileras. Los métodos de compostaje en pilas se clasifican según su movimiento en estáticas o con volteo (Sztern & Pravia, 1999), mientras que según el método de aireación puede ser natural o forzado. Si bien el sistema de aireación natural en pilas estáticas no es tan eficiente como el que se lleva a cabo cuando se emplea el sistema de volteo, demanda menor tecnología y mano de obra, reduciendo los costos operativos de producción (Röben, 2002; Lavado, 2012; Cruz *et al.*, 2015). En el caso del compostaje en pilas estáticas, es factible alcanzar una buena aireación agregando una cierta proporción de materiales estructurantes, como restos de poda, virutas de madera y hojarasca entre otros (Leconte, 2010; Satti *et al.*, 2012), que evitan la excesiva compactación de los residuos y situaciones anaeróbicas que reducirían la

velocidad del proceso. Otra forma de favorecer el suministro de oxígeno en este método de compostaje, es el diseño de una red de tuberías dispuestas en el interior de las pilas, de tal manera que el aire ingrese por convección en forma continua en toda la pila (Röben, 2002; Lavado, 2012; Cruz *et al.*, 2015). En relación con la temperatura, la actividad microbiana durante el proceso de compostaje produce cambios de modo que pueden distinguirse varias etapas de duración variable según el tipo de residuos y metodología de compostaje. Se comienza el proceso con una primera etapa mesófila o mesotérmica, con variaciones de temperatura entre los 10 a 45°C, continúa una etapa termófila, con temperaturas entre los 45 a 75°C en la cual se eliminan los patógenos mesófilos, hongos, esporas, larvas de insectos, semillas de malezas y microorganismos patógenos. Luego de esta etapa tan importante prosigue nuevamente una segunda etapa mesófila, con temperaturas inferiores a los 40°C, y por último, el proceso de compostaje finaliza con una fase de enfriamiento y maduración, en donde la temperatura desciende hasta valores próximos a la temperatura ambiente. Las normas de la USEPA (1993), exigen en sus directrices que para obtener compost en pilas estáticas se deben asegurar tres días consecutivos con temperaturas mayores o iguales a 55°C, mientras que para pilas con volteo se deben cumplir 15 días no consecutivos con temperaturas mayores o iguales a 55°C y al menos 5 volteos.

Además, para asegurar las condiciones óptimas del compostaje es importante mantener una humedad entre 50 y 60%, para lo cual es necesario humectar las pilas siempre que sea necesario. Por debajo del 40% se reduce el metabolismo microbiano, mientras que valores inferiores a 20% son altamente restrictivos. El exceso de agua, tampoco favorece el proceso, ya que al desplazar el aire de los

espacios porosos se establecen situaciones anaerobias (Röben, 2002; Íñiguez *et al.*, 2011; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013; Cruz *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2017).

La relación C/N (como carbono y nitrógeno orgánico total) es otro parámetro importante que debe ser controlado, siendo los valores recomendados para iniciar el proceso de 25-35/1, mientras que en el compost final se recomiendan valores de 20-25/1 para evitar inmovilización de nitrógeno cuando se lo aplica al suelo (Mazzarino *et al.*, 2012). Una baja relación C/N en los residuos al inicio del compostaje provoca la pérdida de nitrógeno por volatilización o lixiviación del amoníaco, mientras que una elevada relación C/N generalmente extiende la duración del proceso. La adición de estiércol de diferentes orígenes, además de aportar microorganismos que favorecen el proceso de compostaje, permite modificar la relación C/N por ser un material rico en nitrógeno. El pH óptimo de la pila de compost es de valores cercanos a la neutralidad, es decir pH 7, para favorecer las actividades microbianas e impedir la volatilización del amoníaco (Íñiguez *et al.*, 2011; Martínez Gutiérrez *et al.*, 2013; Cruz *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2017).

A nivel nacional existe la Resolución 264/2011 de SENASA (2011), la cual luego fue modificada por la Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA (2019), que regula el marco normativo para la producción, registro y aplicación de compost.

La empresa JUGOS S.A., como se destacó anteriormente, genera anualmente a partir de la producción de jugos concentrados de manzana y pera alrededor de 25.000 toneladas de orujos, por lo que la encrucijada de qué hacer con tanta cantidad de residuos es idéntica a la que sucede con las industrias jugueras del resto del mundo. Sumado a este tema, el preocupante cambio climático que está

sufriendo el Alto Valle de Río Negro en los últimos años está deteriorando el ambiente, generando aumentos de temperatura y precipitaciones, entre otros (Ferraro, 2007). Estas variaciones en el clima ocasionan escenarios cambiantes y de incertidumbre (Escala, 2011), pudiendo afectar hasta en un 80% la respuesta de los cultivos en términos de calidad y cantidad de producción (Rodríguez, 2019). Estas modificaciones en el clima regional, no solo afectan a la producción agroindustrial, sino que además está afectando notablemente los sistemas de tratamiento de residuos mediante el proceso de compostaje. Por un lado, las excesivas precipitaciones hacen inaccesible los predios donde se realiza dicha actividad debido a la inestabilidad de terreno, y por otro lado, las elevadas temperaturas ambientales provocan en algunos casos la autoignición de las pilas de compost (Nelson, 2003; Portal Videla, 2013).

En este contexto, es necesario promover el diseño de tecnologías tendientes a optimizar el proceso de obtención de compost. La eficiencia del proceso de compostaje depende, en gran medida, de alcanzar lo antes posible la etapa termofílica (Contardi & Errasti, 2012), controlando el oxígeno, la temperatura y la humedad en la pila, con el fin de que los microorganismos trabajen correctamente para lograr la degradación de la materia orgánica.

En el capítulo 2 se presentó el tratamiento de efluentes líquidos por lagunaje de JUGOS S.A. En el presente capítulo, se aborda el tratamiento de los residuos sólidos por compostaje. De esta manera, se pretende analizar el manejo integral de los residuos sólidos y líquidos de una industria juguera.

3.1.1. Objetivos

- Producir compost mediante hileras con volteos a partir de orujo de manzana y pera generados durante el proceso productivo para la obtención de jugos concentrados.
- Evaluar el proceso de compostaje a partir de orujo de manzana con el agregado de material estructurante para reducir los tiempos de procesamiento mediante pilas estáticas.

3.1.2. Hipótesis y predicciones

- El compostaje de orujos de la industria juguera mediante el sistema de hileras con volteos permitirá obtener una enmienda con valor agrícola. Predicción: El sistema de tratamiento utilizando un rotovator será adecuado para la obtención de un compost que cumpla con la normativa vigente.
- La incorporación de material estructurante mejorará la aireación y la eficiencia del proceso de compostaje. Predicción: El agregado de aserrín y chips de poda disminuirá el tiempo requerido por el proceso para alcanzar la madurez.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Generación de residuos

La empresa JUGOS S.A. genera residuos sólidos en tres etapas del proceso productivo (Mesa de Selección, Turbo Extractores y Decanters), y en tres sectores del tratamiento primario de efluentes industriales (Sistema de Enrejado, Tamiz Giratorio y Sedimentador), que pueden apreciarse en la Figura 3.1.

Todos estos residuos son transportados hasta una tolva de almacenamiento para luego ser retirados por un camión habilitado para tal fin. El proceso productivo genera aproximadamente unas 200 t.día⁻¹ de residuos sólidos, constituidos principalmente por restos de frutas, cáscaras, semillas, pedúnculos y paredes celulares. Antiguamente la empresa enviaba estos residuos a disposición final en rellenos sanitarios con habilitación municipal o eran utilizados por crianceros para alimentación animal (Fernández Mayer, 2014). Sin embargo, era de interés de la empresa desarrollar algún mecanismo para la reutilización de estos residuos aportando un mayor valor agregado y minimizando el impacto ambiental que pudiera generarse con el mal manejo de los mismos. Dentro de las alternativas propuestas, el desarrollo de un mejorador de suelo fue la elección más apropiada y accesible.

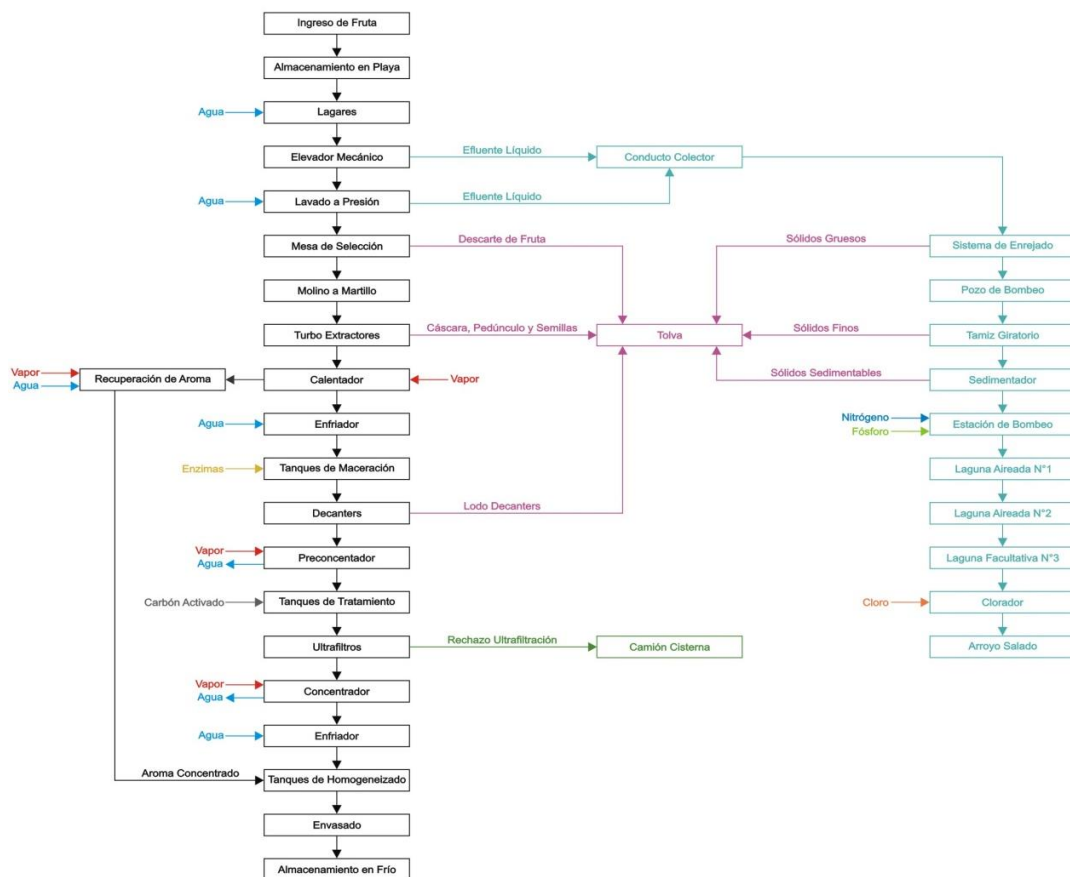


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la generación de residuos sólidos de la empresa JUGOS S.A.

3.2.2. Ubicación y armado de hileras

El ensayo de compostaje se realizó en la localidad de Chichinales en un terrero salino sódico (Figura 3.2), provincia de Río Negro, en un predio de 35 hectáreas (39°07'36.4" S y 66°56'58.1" O) entre los meses de junio de 2012 y agosto de 2013.



Figura 3.2: Vista aérea del predio en la localidad de Chichinales donde se realizó el compostaje.

Durante este período se registraron temperaturas medias mensuales que variaron entre 5 y 22°C, presentando además 199 mm de precipitación total (Figura 3.3). En la Figura 3.4 se puede apreciar el incremento de las precipitaciones en los últimos años registradas en la Estación Meteorológica Automática del INTA en la zona del ensayo.

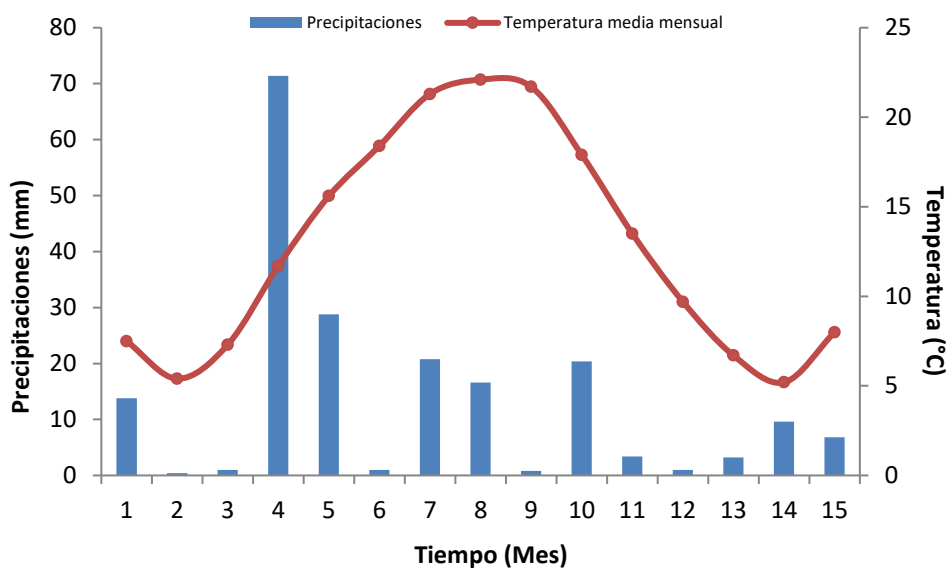


Figura 3.3: Temperaturas medias mensuales y precipitaciones totales durante el período de ensayo.

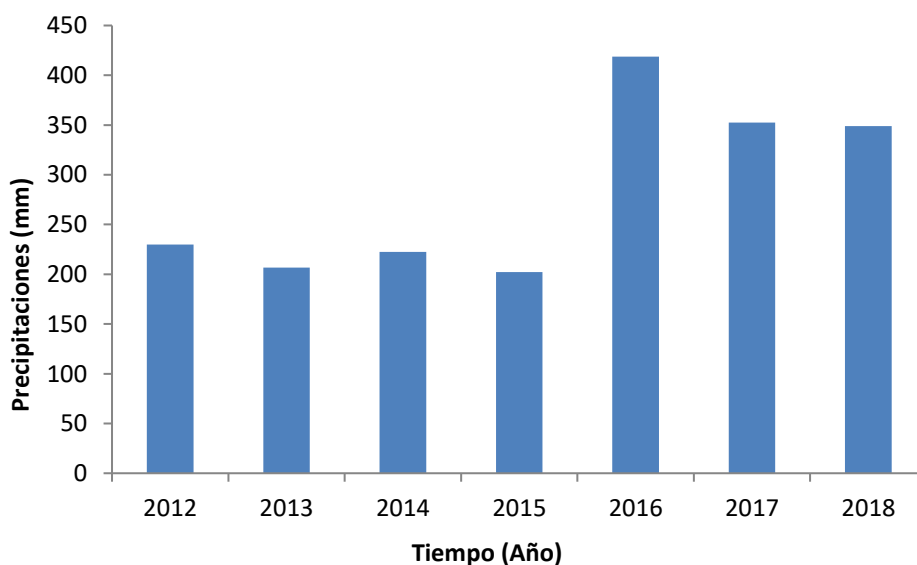


Figura 3.4: Precipitaciones anuales en la zona del ensayo.

El orujo fue transportado desde la Empresa JUGOS S.A. hasta el predio donde se realizó el ensayo por medio de un camión habilitado para tal fin. Se armaron dos hileras, una de orujo de manzana y la otra de orujo de pera, de aproximadamente 1.200 m³ (Figura 3.5). Cabe destacar que no se realizó el agregado de ningún tipo de material adicional, ya que la finalidad fue analizar la potencialidad de obtener compost solamente a partir de los orujos de fruta. Se

tomaron muestras compuestas (Íñiguez *et al.*, 2011) de los orujos para determinar las características fisicoquímicas (humedad, pH, conductividad eléctrica, cenizas, extracto seco, proteínas totales, fibras insolubles, fibras solubles, fibra cruda, materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno total, nitratos, nitritos, fósforo total y fosfatos) en los laboratorios del Centro de Investigación y Asistencia Técnica a la Industria (CIATI) en Villa Regina.



Figura 3.5: Hileras de orujo para el tratamiento de compostaje.

Para la obtención del compost se utilizó el sistema de compostaje en hileras con volteo (Gavilanes-Terán *et al.*, 2017). El orujo fue dispuesto en hileras trapezoidales de 0,5 x 10 x 150 metros al comienzo del proceso por las características propias del orujo generado, que contenía demasiada humedad (86-88%) y se desmoronaba. Luego de un par de meses de secado se pudo trabajar con hileras de 1,0 x 1,5 x 150 metros (Figura 3.6).

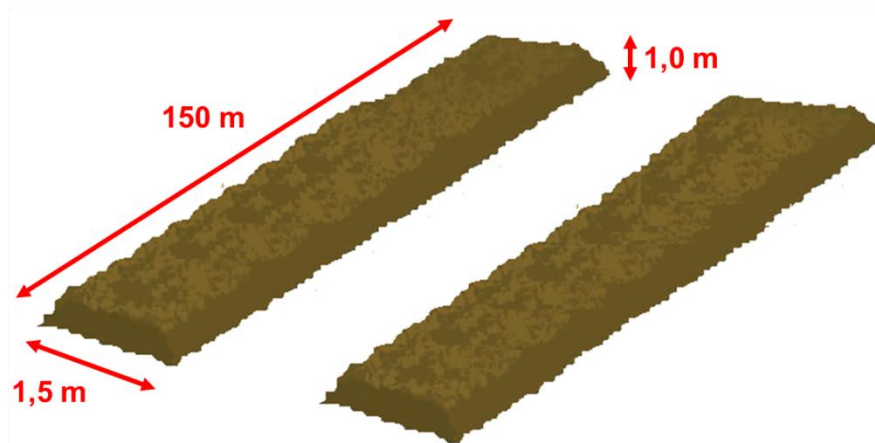


Figura 3.6: Dimensiones de las hileras de compost.

Para todas las maniobras necesarias durante el procesamiento se utilizó una pala cargadora frontal Michigan R45C (Figura 3.7).



Figura 3.7: Pala cargadora Michigan R45C.

Por otro lado, para realizar el volteo se utilizó un rotovator fabricado por la empresa Fabher SRL (Figura 3.8) impulsado por un tractor New Holland TD65F (Orden, 2018). Durante el procesamiento se realizaron varios volteos para las hileras de manzana y pera. Esto permitió, por un lado, bajar la temperatura y, por otro lado, mejorar la homogeneización y aireación durante el proceso de compostaje, ya que elimina el excesivo calor, controla la humedad y aumenta la

porosidad de la hilera que mejora la ventilación. La frecuencia de mezclado dependió de factores como la temperatura (nunca inferior de 55°C para asegurar la reducción de patógenos) y el contenido de humedad (nunca inferior al 40%), entre otras variables. Debido a la dificultad de disponer de agua para la hidratación de las hileras por medio de un camión regador, se realizó todo el ensayo a su humedad natural más el rehumedecimiento por las precipitaciones del período (Figura 3.3).



Figura 3.8: Rotovator para el volteo de las hileras.

La temperatura durante el procesamiento fue controlada una vez por semana en cinco puntos y a dos profundidades (0,20 y 0,40 metros), siempre a una altura media y en ambos lados de la hilera. Los controles se realizaron mediante la utilización de un termómetro digital Testo 110 (Figura 3.9), que se encontraba calibrado por contraste con un termómetro de termorresistencia tipo PT100. Sin embargo, los registros se duplicaron cuando se acercaba a la temperatura máxima establecida para el ensayo. Es clave asegurar la etapa termofílica durante el proceso de compostaje, ya que cumpliendo con los rangos de temperatura deseados se garantiza por un lado la reducción de patógenos y por otro lado la eliminación de las semillas de maleza (Costa *et al.*, 1991; Rynk, 1992; Wang *et al.*, 2005).

Para controlar la humedad y el pH durante el proceso de compostaje, se tomaron muestras compuestas mensuales de cada una de las hileras (Íñiguez *et al.*, 2011). Cada muestra compuesta por fecha de muestreo estaba constituida por tres submuestras de aproximadamente dos litros, tomadas a 0,30 y 0,40 metros de profundidad (Leconte, 2010).



Figura 3.9: Termómetro Testo para la medición de temperatura.

Cuando el tratamiento culminó, momento en el cual la temperatura de las hileras se estabilizó en un valor próximo a la temperatura ambiente, se tomaron nuevamente muestras compuestas (Íñiguez *et al.*, 2011) para ser enviadas al laboratorio ya mencionado con el fin de realizar una caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos (pH, humedad, conductividad eléctrica y materia orgánica) y el porcentaje de algunos nutrientes (nitrógeno total, fósforo total, potasio, calcio y magnesio). Además, se realizó la determinación del índice de germinación.

3.2.3. Métodos de análisis

La humedad se calculó por gravimetría a 70°C en estufa de secado Marca ORL hasta peso constante (Sadzawka *et al.*, 2005). Una vez alcanzado el peso constante, las muestras se retiraron y llevaron a un desecador, donde se enfriaron a temperatura ambiente. Se pesaron nuevamente en balanza analítica Shimadzu AUY220 con precisión 0,001 g. El porcentaje de humedad se calculó como:

$$H\% = \left(\frac{a - b}{a} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

donde $H\%$ es el contenido de agua en %, a es la masa en g de la muestra húmeda y b es la masa en g de la muestra seca a 70°C.

El pH y la conductividad eléctrica se determinaron mediante método potenciométrico empleando un medidor multiparamétrico Hanna XI5521-CR, el cual es calibrado una vez por semana mediante la utilización de tres soluciones buffer. Se utilizaron tubos de centrífuga de 50 mL, donde se colocaron 4 g de compost y se agregaron 40 mL de agua destilada, logrando un extracto acuoso en relación 1:10 (García *et al.*, 1991; Laos *et al.*, 2002). Los tubos se colocaron en un agitador orbital DragonLab CK-0180-E en posición horizontal y dispuestos en el sentido del eje del mismo. Se agitaron durante dos horas y luego se dejaron decantar por unos 15 minutos. La medición de pH y de conductividad eléctrica se realizó sumergiendo el bulbo del electrodo a media altura de la columna de sobrenadante.

Las cenizas se determinaron por calcinación de las muestras en mufla a 550°C hasta peso constante (Laos *et al.*, 2002).

El extracto seco se determinó gravimétricamente a 70°C en estufa de secado hasta peso constante, de manera similar a lo indicado para la determinación de la humedad.

La determinación de fibra dietaria se realizó mediante determinación enzimática y gravimétrica. Primero, las muestras libres de grasas y de azúcares se digirieron enzimáticamente mediante el empleo de un kit para la reacción. Luego, se precipitó la fibra con etanol absoluto y se sometió a lavados con etanol y acetona. Se sometió a un secado en estufa y luego se pesó. Una parte de la muestra se empleó para la determinación de proteínas y la otra se sometió a calcinación en mufla a 550°C para la obtención del valor de cenizas. La fibra dietaria total se obtuvo por la diferencia de peso entre las proteínas y las cenizas. La determinación de fibras solubles e insolubles se determinó lavando el residuo obtenido por vía enzimática con agua.

La fibra cruda se determinó por digestión ácida y alcalina de la muestra para obtener un residuo de fibra cruda y sales, que luego se sometió a calcinación en mufla a 550°C para la obtención del valor de fibra cruda.

La materia orgánica se determinó por ignición a 550°C (Navarro *et al.*, 1990). El carbono orgánico se calculó a partir del valor obtenido de materia orgánica dividiéndolos por 1,8 (Laos *et al.*, 2002).

El nitrógeno total se determinó mediante el método de Kjeldahl y el nitrógeno proteico se calculó a partir del valor de nitrógeno total. Los nitratos y nitritos se determinaron mediante espectrofotometría empleando el método de Griess.

El fósforo total se determinó mediante el método colorimétrico, basado en el desarrollo de color con heptamolibdato de amonio y ácido ascórbico de la muestra calcinada previamente en mufla (Sparks *et al.*, 1996). El fosfato se determinó por estequiometría a partir del valor obtenido de fósforo total.

El potasio, calcio y magnesio se determinaron mediante espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo en un equipo ICP-MS Agilent 7700x con muestras tratadas previamente mediante digestión por microondas en un digestor MARS 6.

Los análisis a los orujos y compost de manzana y pera se llevaron a cabo en el laboratorio ya mencionado. Cabe destacar que las muestras de compost se acondicionaron previamente mediante tamizado por una malla de 5 mm.

Para estimar la reducción del volumen de cada una de las hileras durante el procesamiento se analizaron mensualmente los parámetros geométricos, para realizar el cálculo de la pérdida por diferencia entre el volumen inicial y final del proceso de compostaje (Rynk, 1992; Íñiguez *et al.*, 2006 y 2011).

En las muestras finales se realizó la prueba de germinación con semillas de ryegrass y tomate con el fin de determinar la madurez del producto final (Zucconi *et al.*, 1981; Pascual *et al.*, 1997). Para dicha determinación se utilizaron extractos 1:10 de compost:agua en cajas de petri con papel de filtro humedecido con aproximadamente 3 mL del extracto, usando como muestra control agua destilada. Se sembraron por cada caja 20 semillas de ryegrass y 20 de tomate, y se incubaron a una temperatura entre 21 y 23°C durante 5 días en oscuridad. Luego se procedió al recuento de las semillas germinadas y a la medición del largo de las raíces, con el fin de calcular la germinación relativa de semillas

(GRS), el crecimiento relativo de raíces (CRR) y el índice de germinación (IG) como:

$$GRS = \left(\frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el control}} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$CRR = \left(\frac{\text{Longitud de raíces en el extracto}}{\text{Longitud de raíces en el control}} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$IG = \frac{GRS \cdot CRR}{100} \quad (3.4)$$

3.2.4. Experiencia a gran escala

El desafío de la empresa era realizar el escalado del ensayo para el tratamiento de todos los residuos generados durante el procesamiento de manzanas y peras para la obtención de los jugos concentrados. Por tal motivo se continuaron armando hileras trapezoidales paralelas a las que se prepararon para el estudio (Figura 3.10), y se utilizó el mismo equipamiento disponible para el ensayo (Figura 3.7 y 3.8).

Debido a la gran cantidad de orujo generado, se armaron hileras dispuestas longitudinalmente con una separación entre ellas de unos 10 metros (Figura 3.10), para el buen desplazamiento del equipamiento utilizado para el compostaje.

Las hileras fueron armadas e identificadas con un código alfanumérico (Figura 3.11) que permitió realizar un seguimiento de las mismas logrando de esta manera un control exhaustivo de trazabilidad en los productos obtenidos. Dependiendo del plan de producción de la empresa, que varía entre molienda de manzana o pera según el stock de ingreso a la fábrica, se fueron armando hileras de cada variedad de fruta con las mismas dimensiones que en el ensayo

(0,5 x 10 x 150 metros). Por tal motivo, algunos lotes de manzana o pera están constituidos por más de una hilera.

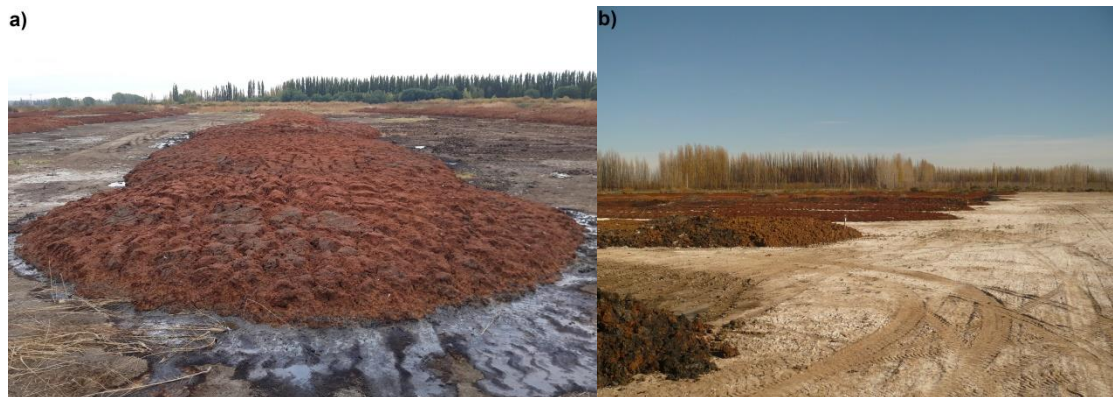


Figura 3.10: Hileras de orujo trapezoidales para el tratamiento de compostaje (a) y disposición longitudinal de todas las hileras de orujo (b).



Figura 3.11: Identificación alfanumérica para la trazabilidad del producto.

3.2.5. Ensayo con material estructurante

El objetivo de este ensayo fue analizar una alternativa para optimizar el proceso de compostaje con el fin de alcanzar lo antes posible la etapa termofílica, ya que las pilas a las que no se le agregó ningún tipo de material estructurante presentaron una demora de aproximadamente 5 meses para conseguir dicha etapa dependiendo de las condiciones climáticas. El proceso de compostaje para

este ensayo se llevó a cabo por el método de pilas estáticas. Se armaron tres pilas constituidas por orujo de manzana, aserrín y chips para evaluar el perfil de temperatura al incorporar este material estructurante, las cuales fueron mezcladas con la pala cargadora Michigan (Figura 3.12). El material estructurante utilizado era un residuo del procesamiento de la madera de álamo generado en un aserradero próximo al predio donde se realizó el ensayo.



Figura 3.12: Mezclado de pilas de orujo de manzana con material estructurante.

Las proporciones empleadas se presentan en la Tabla 3.1, donde puede apreciarse la realización del ensayo por triplicado. Las tres primeras pilas estaban armadas solo por una batea del camión que transporta el orujo a Chichinales (pilas control), mientras que las tres pilas siguientes, están formadas por un viaje de orujo, un viaje de aserrín y un viaje de chips, es decir, 1:1:1 en volumen (Figura 3.13).

Tabla 3.1: Composición de las pilas en estudio, siendo el ± el error de la báscula de pesado.

Pila	Orujo	Aserrín	Chips	Unidad
<i>Pilas control</i>				
1	16.820 ± 80	-	-	kg
2	17.120 ± 80	-	-	kg
3	16.040 ± 80	-	-	kg
<i>Pilas con material estructurante</i>				
4	16.100 ± 80	3.640 ± 80	3.260 ± 80	kg
5	15.800 ± 80	3.480 ± 80	3.300 ± 80	kg
6	16.800 ± 80	4.220 ± 80	3.400 ± 80	kg

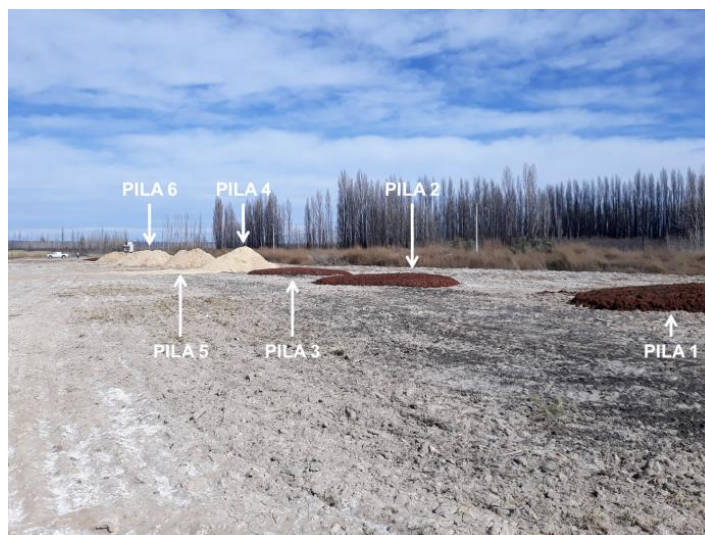


Figura 3.13: Disposición final de las pilas en estudio con material estructurante.

Las pilas control estaban constituidas en promedio por 16 toneladas de orujo de manzana, mientras que las pilas con estructurante contenían en promedio 16 toneladas de orujo, 4 de aserrín y 3 de chips (Figura 3.14).



Figura 3.14: Pila de compostaje control (a) y pila con material estructurante (b).

Se realizaron controles diarios de temperatura de las pilas a distintas profundidades con el mismo termómetro digital Testo 110 (Figura 3.15), para verificar la evolución del perfil por el agregado del material estructurante.



Figura 3.15: Registro diario de la temperatura en las pilas de compostaje.

A modo de prueba, se utilizó un Dispositivo Most que es muy utilizado en el embarque de productos alimenticios perecederos, ya que permite rastrear la ubicación y temperatura en tiempo real. El mismo se conecta a la nube de forma permanente, por lo que los usuarios pueden rastrear de inicio a fin el producto mediante un teléfono o una Tablet. Este dispositivo se incorporó en el centro de una de las pilas con material estructurante (Figura 3.16), con el fin de registrar la temperatura durante el proceso de compostaje, y poder así realizar una

comparación con las mediciones realizadas mediante la utilización del termómetro digital Testo 110.



Figura 3.16: Dispositivo Most para el registro de temperatura.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Características de los materiales originales

Las características fisicoquímicas de los orujos que se emplearon para la realización del ensayo se presentan en la Tabla 3.2. Es importante destacar que no se observan variaciones significativas entre muestras de orujos según la época del año.

Tabla 3.2: Características del orujo de manzana y pera. LC: Límite de cuantificación. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.

Característica	Orujo Manzana	Orujo Pera	Unidad
<i>Contenido de agua</i>	88,40 \pm 4,42	86,30 \pm 4,31	%
<i>pH</i>	3,80 \pm 0,19	4,00 \pm 0,20	-
<i>Conductividad eléctrica</i>	1,67 \pm 0,10	1,56 \pm 0,09	dS/m
<i>Cenizas</i>	2,3 \pm 0,16	3,8 \pm 0,26	g/kg
<i>Extracto seco</i>	13,40 \pm 0,53	19,10 \pm 0,76	g/100g
<i>Proteínas totales</i>	6,60 \pm 0,79	10,70 \pm 1,28	g/kg
<i>Fibras insolubles</i>	5,94 \pm 0,71	11,84 \pm 1,42	g/100g
<i>Fibras solubles</i>	< LC = 0,05	< LC = 0,05	g/100g
<i>Fibra cruda</i>	3,69 \pm 0,47	7,17 \pm 0,93	%
<i>Materia orgánica</i>	59,50 \pm 5,85	67,10 \pm 6,81	g/100g
<i>Carbono orgánico</i>	34,51 \pm 3,41	38,92 \pm 3,82	g/100g
<i>Nitrógeno total</i>	1.055 \pm 126,6	1.712 \pm 205,4	mg/kg
<i>Relación C/N</i>	32,71 \pm 3,59	22,73 \pm 2,51	%
<i>Nitratos</i>	< LC = 5	< LC = 5	mg/kg
<i>Nitritos</i>	< LC = 5	< LC = 5	mg/kg
<i>Fósforo total</i>	148 \pm 22,2	195 \pm 29,2	mg/kg
<i>Fosfatos</i>	453 \pm 67,9	597 \pm 89,5	mg/kg

3.3.2. Perfiles de temperatura y contenido de agua

Las temperaturas promedio de cada una de las hileras registradas durante todo el ensayo se muestran en la Figura 3.17. Luego de 3 a 4 meses de una etapa en donde las hileras lograron secarse lo suficiente para que los microorganismos pudieran actuar, es que comenzó el incremento de temperatura, alcanzando un valor máximo de 71,5°C en el caso de la hilera de pera y 62,5°C en la de manzana. Como puede observarse, ambas hileras presentaron un perfil de temperatura similar, pero con un cierto desfasaje. Esto puede deberse a la composición y a la más rápida pérdida de humedad del orujo de pera después del primer mes de armadas las hileras (Figura 3.18), lo que permitió que alcanzara antes las temperaturas termofílicas. Es de destacar el marcado ascenso de la temperatura en un lapso corto de tiempo, por lo que se sobrepasó ampliamente el valor de temperatura mínima control (55°C).

Para controlar la temperatura durante el proceso se realizaron varios volteos (6 para la hilera de manzana y 7 para la de pera) mediante la utilización del rotovator (Figura 3.8), que permite oxigenarlas para que los microorganismos aeróbicos continúen con la degradación de la materia orgánica (Uribe *et al.*, 2001; Orden, 2018).

Ambas hileras presentaron una fase termofílica muy larga de aproximadamente unos 6 meses, y una estabilización de la temperatura de las hileras próxima a la temperatura ambiente a unos 420 días del comienzo del proceso de compostaje. Estos periodos son muy largos en comparación con estudios de otros autores que experimentaron procesos de compostaje en otras matrices, alcanzando

productos estables en menos de la mitad del tiempo (Tognetti, 2007; Leconte, 2010; Orden, 2018).

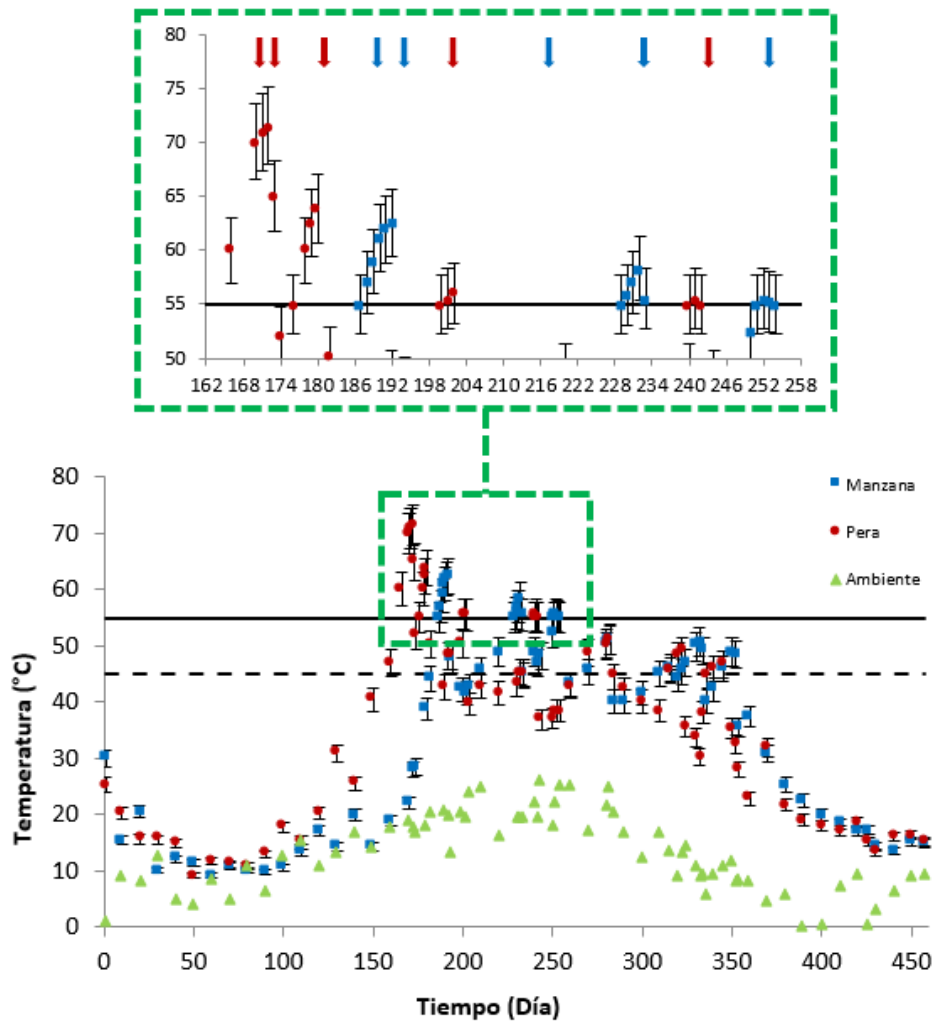


Figura 3.17: Perfiles de temperatura durante todo el proceso de compostaje. Las flechas indican los volteos realizados en cada una de las hileras durante la etapa termofílica. La línea punteada indica el valor límite de la etapa termofílica (45°C), mientras que la línea entera indica el valor mínimo para la reducción de patógenos (55°C). Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

Según el registro de temperatura observado, se puede asegurar que el compostaje desarrollado cumple con la normativa de la USEPA (1993), que exige para pilas con volteo un mínimo de 15 días no consecutivos con

temperaturas mayores o iguales a 55°C y al menos 5 volteos. De esta manera, al cumplir con este requisito se garantiza la reducción de patógenos y la eliminación de las semillas de maleza, entre otros (Costa *et al.*, 1991; Rynk, 1992; Wang *et al.*, 2005).

La elevada humedad ocasionó la demora del comienzo del proceso de compostaje por aproximadamente 4 a 5 meses (Figura 3.17). Esto se debió a la insuficiente concentración de oxígeno para comenzar con el proceso (Titko *et al.*, 1996). Esto es concordante con el comportamiento de la humedad (Figura 3.18), donde se observó un descenso muy gradual al comienzo del proceso, en ambos casos, pero luego se destaca una bajada abrupta y marcada durante toda la etapa termofílica.

Las hileras no tenían ningún tipo de recubrimiento, por lo que las precipitaciones que se presentaron durante el periodo de ensayo las hidrataron naturalmente, siendo este mecanismo el único posible para la rehumectación de las mismas.

Es importante resaltar, que al no poder controlar la hidratación de las hileras, puede disminuir la actividad de los microorganismos cuando el contenido de humedad es menor de 40% y se detiene completamente cuando es menor al 15% (Gray *et al.*, 1971; Gómez Rosales *et al.*, 2013). En este estudio, se pudo finalizar con un contenido de humedad por encima del 40%, mínimo recomendado por varios autores (Rynk *et al.*, 1992; Tognetti, 2007).

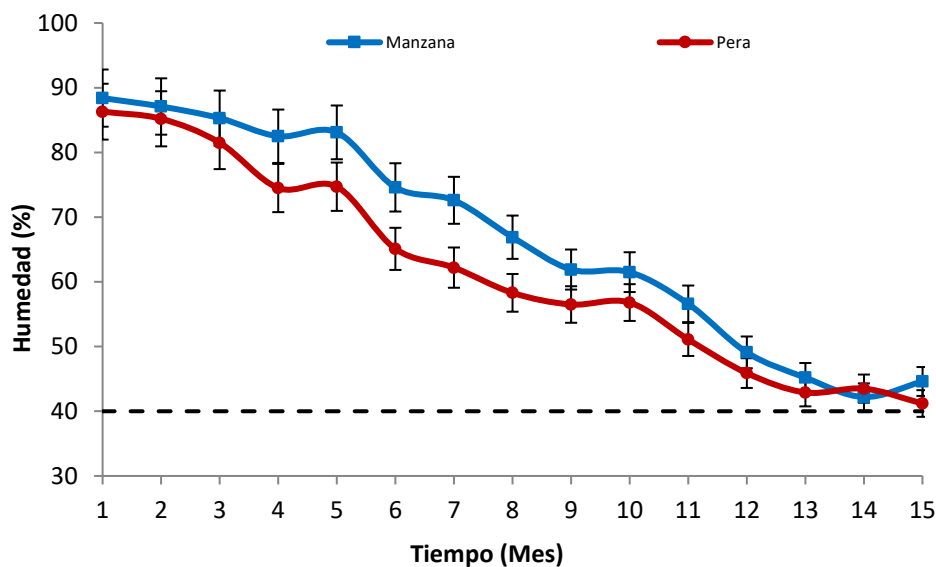


Figura 3.18: Perfiles de contenido de agua durante todo el proceso de compostaje. La línea punteada indica el valor ideal de humedad para el compost terminado (40%). Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.

3.3.3. Cambios en el pH y reducción del volumen

Los perfiles de pH a lo largo de todo el proceso de compostaje son diferentes a los presentados en bibliografía, donde suelen mantenerse durante todo el proceso entre 6,0 a 8,0 (Sánchez-Monedero, 2001; Tognetti, 2007; Leconte *et al.*, 2009; Leconte, 2010; Orden, 2018). En este caso, los orujos iniciales presentan un pH fuertemente ácido (3,8 para manzana y 4,0 para pera), coincidente con la acidez propia de cada una de las frutas. Luego de un par de meses se observó una marcada alcalinización para ambos tratamientos a medida que avanzaba el procesamiento (Figura 3.19), con una posterior estabilización en valores normales cercanos a 7,0 al final del compostaje, similares a los reportados en la literatura (Sánchez-Monedero *et al.*, 2001; Amir *et al.*, 2005; Leconte *et al.*, 2009). Este parámetro es muy importante en el proceso de compostaje, ya que influye en la velocidad de degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos (Sharma *et al.*, 2018). La

variación observada en el pH durante el proceso de compostaje, puede deberse al desarrollo de varias reacciones como la degradación de los ácidos carboxílicos y los fenoles (Nayak *et al.*, 2013; Varma *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2018). Por otro lado, el aumento de la actividad microbiana (alta producción de CO₂) en presencia de calcio (de la pared celular de vegetales) y baja acidificación (baja mineralización de nitrógeno por bajo contenido de nitrógeno orgánico) puede conducir a la formación de carbonatos que regulan el pH alrededor de 8 (Castán *et al.*, 2016), generando entonces el aumento del pH como apreciamos en este estudio.

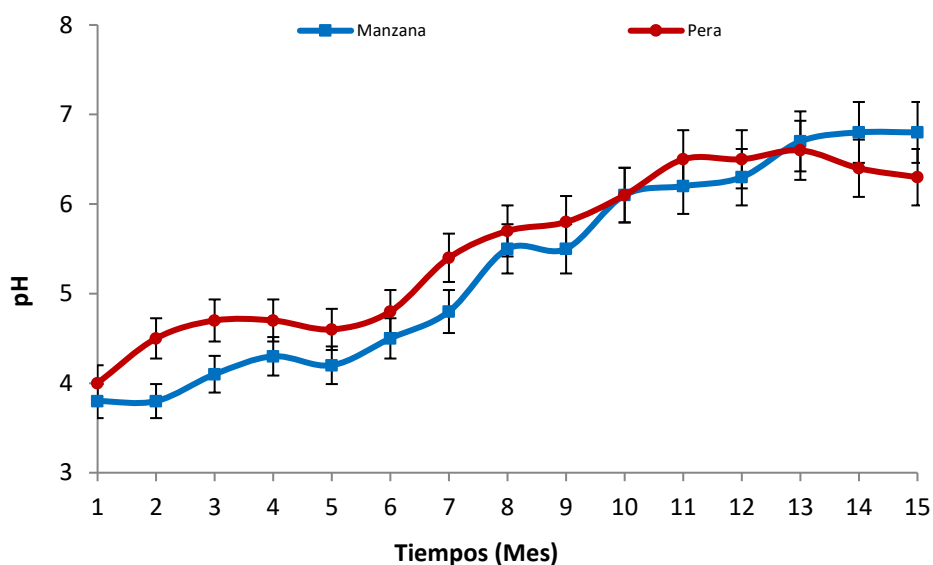


Figura 3.19: Perfiles de pH para el proceso de compostaje. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.

Con respecto al volumen del material a compostar, la hilera de manzana alcanzó una reducción del 88,89%, mientras que para la pera fue de 89,42% (Tabla 3.3 y Figura 3.20), siendo estos valores superiores a los encontrados en la literatura para investigaciones con diferentes matrices, la cual reporta reducciones en el rango de 72 al 77% (Gouxue *et al.*, 2001; Leconte, 2010; Íñiguez *et al.*, 2006 y 2011).

Tabla 3.3: Cambio de volumen de las hileras durante el compostaje. Los valores son promedios de tres mediciones \pm desvío estándar.

Hilera	Volumen Inicial (m ³)	Volumen Final (m ³)	Disminución (%)
Manzana	1.350 \pm 54	150 \pm 5	88,89 \pm 0,10
Pera	1.210 \pm 48	128 \pm 4	89,42 \pm 0,10

No se apreciaron diferencias significativas entre ambos tratamientos al finalizar el procesamiento, aunque si fue notable la diferencia en los primeros meses de compostaje donde se observó una mayor reducción de volumen en la hilera de orujo de pera. Esta diferencia puede asociarse a la composición (Figura 3.18), lo que permitió comenzar antes la etapa termofílica. Al final del proceso de compostaje, para ambos tratamientos, se obtuvo en promedio un 11% de producto final en relación al orujo inicial, causando así una reducción significativa luego de 457 días de iniciado el ensayo de compostaje (Figura 3.21).

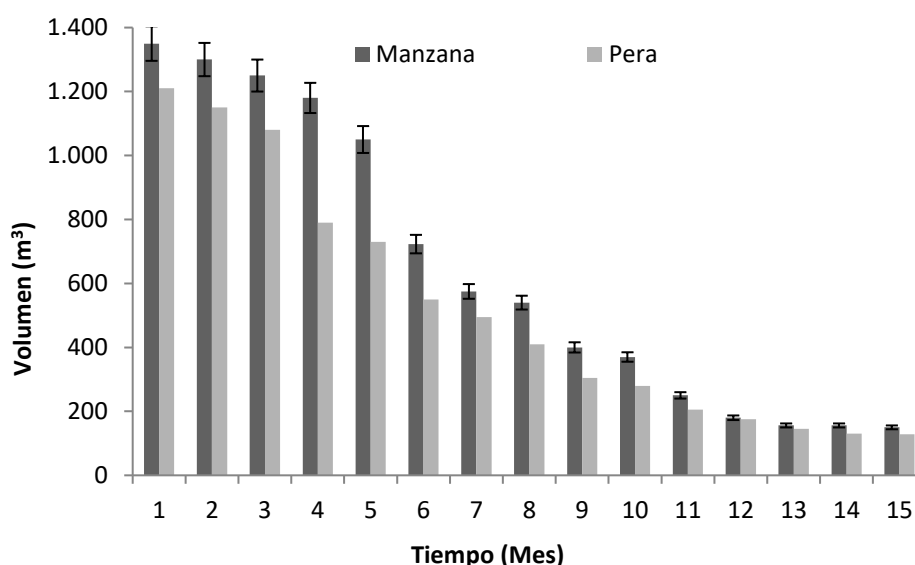


Figura 3.20: Cambio de volumen de las hileras durante el compostaje. Los valores son promedios de tres mediciones \pm desvío estándar.



Figura 3.21: Hileras de compostaje a tiempo cero (a) y a 457 días del armado (b).

3.3.4. Análisis fisicoquímicos e indicadores de madurez

En la Tabla 3.4, se presentan las determinaciones realizadas en los compost obtenidos al final del procesamiento. Según la norma IRAM (2011) para “Compostaje Aeróbico” y la Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA (2019) que establece el “Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost” de la Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental de la Nación Argentina y el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria, se puede afirmar que los compost obtenidos a partir de orujos de manzana y pera, presentaron los parámetros fisicoquímicos dentro de los rangos establecidos por las normas de referencia, que también se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Análisis fisicoquímicos de los compost finales de manzana y pera. Los valores son promedios de tres muestras \pm desvío estándar.

Característica	Compost Manzana	Compost Pera	Norma IRAM	Resolución Conjunta	Unidad
<i>Materia orgánica</i>	38,20 \pm 3,79	44,50 \pm 4,39	-	> 20	%
<i>pH</i>	6,80 \pm 0,34	6,30 \pm 0,31	6,00 - 8,00	5,00 - 8,50	-
<i>Conductividad eléctrica</i>	2,57 \pm 0,15	1,53 \pm 0,09	< 3,00	< 4,00 - < 6,00	dS/m

Característica	Compost Manzana	Compost Pera	Norma IRAM	Resolución Conjunta	Unidad
<i>Humedad</i>	44,60 ± 2,23	41,20 ± 2,06	< 40	< 60	%
<i>Nitrógeno total</i>	2,05 ± 0,24	1,95 ± 0,23	> 2,00	-	%
<i>Relación C/N</i>	10,35 ± 1,24	12,67 ± 1,52	< 20	< 20	%
<i>Fósforo total</i>	0,24 ± 0,03	0,30 ± 0,04	0,15 – 1,5	-	%
<i>Potasio</i>	0,67 ± 0,08	0,66 ± 0,07	-	-	%
<i>Calcio</i>	1,22 ± 0,14	1,30 ± 0,15	-	-	%
<i>Magnesio</i>	0,41 ± 0,04	0,33 ± 0,03	-	-	%

Como indicador de madurez (que significa la desaparición de las sustancias fitotóxicas que pueden generarse durante el compostaje), se determinó el índice de germinación (IG) que varió entre 64,9 y 73,3% para las determinaciones con semillas de ryegrass y tomate, respectivamente (Tabla 3.5 y Figura 3.22). De acuerdo a este resultado (superior al 60%), puede afirmarse que los compost alcanzaron la madurez suficiente para considerarse libre de fitotoxinas (Costa *et al.*, 1991; Bernal *et al.*, 1998; Gómez-Brandón *et al.*, 2008; Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA, 2019).

Tabla 3.5: Indicador de madurez utilizando semillas de ryegrass y tomate. Los datos son promedio de tres repeticiones.

Determinación	Compost Manzana	Compost Pera	Unidad
Ryegrass			
<i>GRS</i>	97,5	101,1	%
<i>CRR</i>	73,1	72,6	%
<i>IG</i>	71,2	73,3	%
Tomate			
<i>GRS</i>	94,1	91,3	%
<i>CRR</i>	70,6	71,1	%
<i>IG</i>	66,4	64,9	%

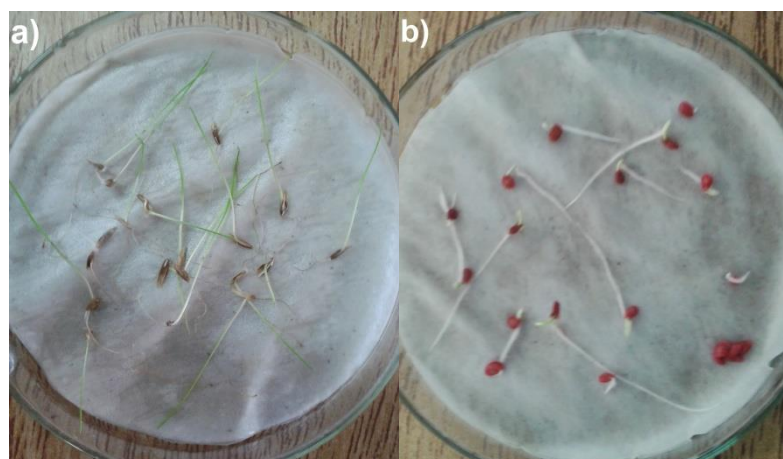


Figura 3.22: Germinación de semillas de ryegrass (a) y semillas de tomate (b).

Cabe destacar que por falta de recursos económicos no se midieron algunos de los indicadores que establece la Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA (2019), como estabilidad, reducción de patógenos y elementos potencialmente tóxicos.

3.3.5. Compostaje a nivel industrial

En la Figura 3.23, se presentan las cantidades normalizadas de fruta molida y de orujo generado luego del procesamiento para la obtención de jugos concentrados, en los últimos 8 años de la empresa JUGOS S.A. La normalización de dichos datos se realiza por exigencias de confidencialidad de la empresa. Relacionando ambas cantidades, se observó que el porcentaje de generación de residuos sólidos fluctuó entre un mínimo de 18,77% hasta un máximo de 21,23%, siendo el promedio anual para todos los años de 20%. De esta manera, se evidenció la necesidad de aplicar una tecnología apropiada para el tratamiento de esta gran cantidad de residuos generados durante la industrialización de manzanas y peras que no tienen un mercado para el consumo en fresco.

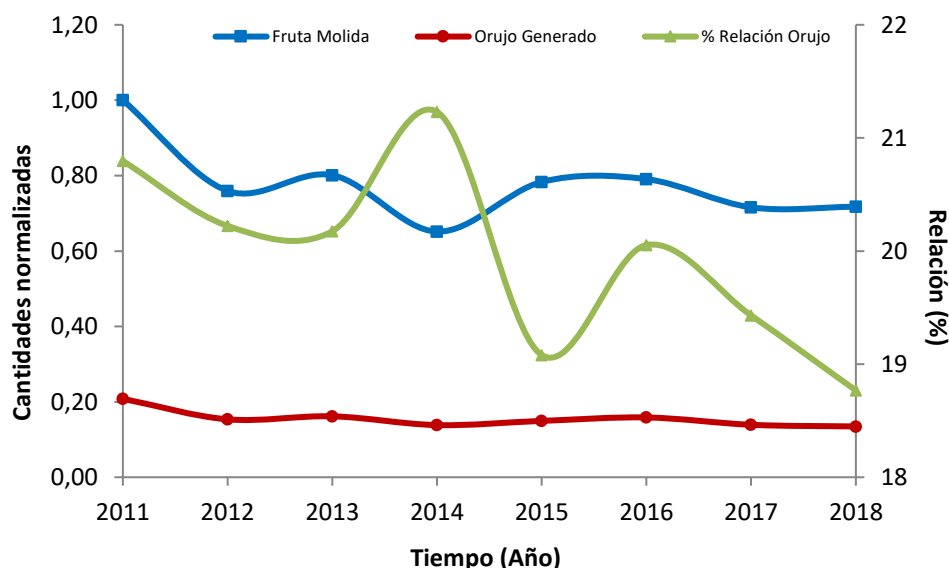


Figura 3.23: Cantidad de fruta procesada y orujo generado en los últimos años.

En la Figura 3.24 se puede apreciar la disposición longitudinal de todas las hileras armadas con los residuos generados durante el procesamiento, tanto de manzanas como de peras. A modo de comparación, en la Figura 3.25 se puede

observar la disposición real de las hileras por medio de una imagen satelital. Las hileras se armaron dependiendo del periodo de molienda planificado por la empresa, variando entre moliendas de manzana y pera según el stock de fruta en la playa de almacenamiento. Por esta situación, se generaron lotes que están conformados por más de una hilera. Además de la imagen satelital presentada, puede destacarse que el predio queda totalmente ocupado por la generación anual de residuos. Como el período total de procesamiento entre el período de reducción de humedad y después el compostaje ronda los 15 meses, es necesario buscar alternativas de optimización para evitar el solapamiento de los orujos generados en años consecutivos.

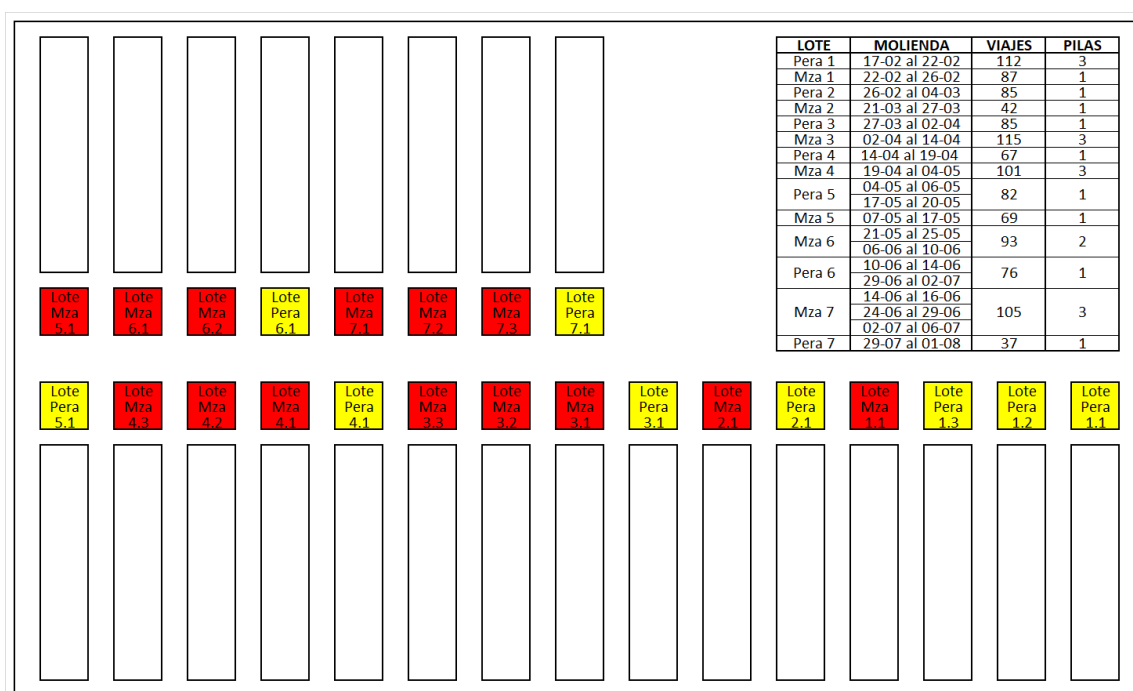


Figura 3.24: Vista aérea de la disposición longitudinal de todas las hileras de orujo.



Figura 3.25: Vista satelital de la disposición longitudinal de todas las hileras de orujo.

Para el procesamiento de las hileras de orujo se siguió la misma metodología de trabajo utilizada para las dos hileras estudiadas anteriormente. Debido a la gran cantidad de material a compostar, el proceso de compostaje a escala industrial presentó complicaciones operativas. La falta de equipamiento adecuado, que suele ser de un elevado costo, para poder procesar todas las hileras de manera apropiada fue la principal limitante (Röben, 2002; Rostagno, 2015; Orden, 2018). Esta restricción generó que los tiempos de procesamiento se extendieran aún más, y por otro lado, se evidenció una excesiva deshidratación de las hileras que no eran trabajadas correctamente. En tal sentido, la humectación de las hileras mediante un camión regador se torna realmente necesario para cumplir con los parámetros operativos.

A pesar de estas dificultades, se pudieron procesar todas las hileras (Figura 3.26), y la cantidad normalizada de compostaje obtenido se puede apreciar en la Tabla 3.6, donde nuevamente se verifica que luego del procesamiento se obtiene en promedio un 11% de producto final en relación al orujo inicial. La

normalización de dichos datos se realizó por exigencias de confidencialidad de la empresa.

Tabla 3.6: Generación de compost a partir de orujo de manzana y pera.

Lote	Viajes	Orujo	Compost	% Compost
Pera				
1	112	1,00	0,12	11,69
2	85	0,77	0,09	12,23
3	85	0,78	0,08	10,11
4	67	0,60	0,06	10,13
5	82	0,76	0,09	12,19
6	76	0,66	0,07	10,04
7	37	0,32	0,04	11,68
Manzana				
1	87	0,76	0,07	9,44
2	42	0,37	0,05	12,35
3	115	0,96	0,12	12,31
4	101	0,92	0,11	11,62
5	69	0,63	0,07	10,52
6	93	0,83	0,08	9,12
7	105	0,85	0,10	12,20



Figura 3.26: Hileras de compostaje terminadas luego del procesamiento.

3.3.6. Problemas asociados al tratamiento industrial de residuos sólidos

Durante el proceso normal de compostaje, el orujo se va deshidratando generando una costra superficial rígida de longitud variable alrededor de toda la hilera (Figura 3.27). Sin embargo, realizando el volteo en el momento preciso no se genera ningún tipo de inconveniente durante el procesamiento.

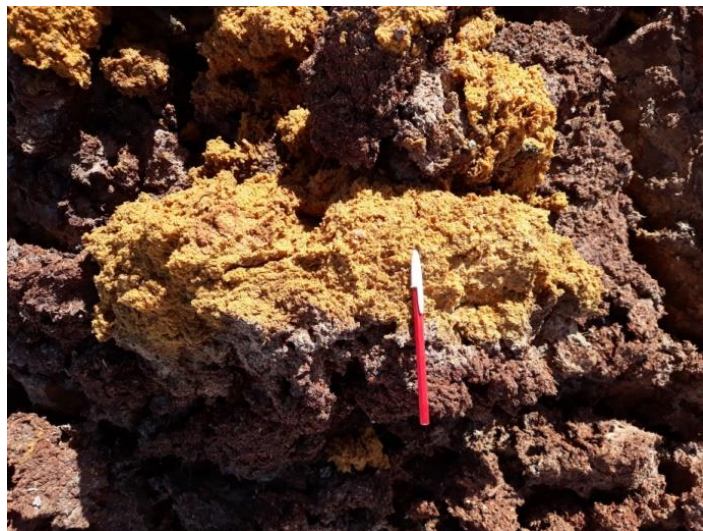


Figura 3.27: Deshidratación del orujo a compostar.

Como se mencionó anteriormente, al no contar con maquinaria industrial que tenga la capacidad de procesar rápidamente todo el orujo a compostar, se

genera una deshidratación excesiva del mismo acompañada de formación de masas compactas e impermeables de gran resistencia a la acción mecánica del equipamiento. De hecho, la rigidez de los mismos es problemática, ya que suele producir la rotura de las cuchillas del rotovator durante el volteo de las hileras (Figura 3.28). Este inconveniente no solo deja fuera de servicio la maquinaria por un periodo prolongado, sino que además puede ocasionar daños físicos al operario que maneja el tractor impulsor del rotovator.



Figura 3.28: Rotura de paletas del rotovator.

La siguiente problemática, y una de las más complejas, es debido a las modificaciones climáticas que se están generando en la región. Las excesivas precipitaciones registradas en los últimos años (Figura 3.4), provocan que el predio donde se realiza el compostaje quede inaccesible para el ingreso de la maquinaria que realiza el procesamiento de las hileras (Figura 3.29). En este caso, las alternativas para solucionar el inconveniente son limitadas, y cualquiera

que se elija involucra un gasto monetario elevado que la empresa no está en condiciones de afrontar, debido principalmente a la situación económica del país.

Además de ser inundable, otro de los inconvenientes serios del predio, es que al tratarse de un terrero salino sódico existe un alto riesgo de contaminar a las hileras durante los volteos, como se pudo verificar en algunos casos de compost donde se midió alta conductividad eléctrica. En la vista aérea del predio donde se realizó el ensayo (Figura 3.30), se aprecian las diferencias antes y después de comenzar con el proceso de compostaje en el sector.



Figura 3.29: Excesivas precipitaciones en el predio donde se realiza el compostaje.

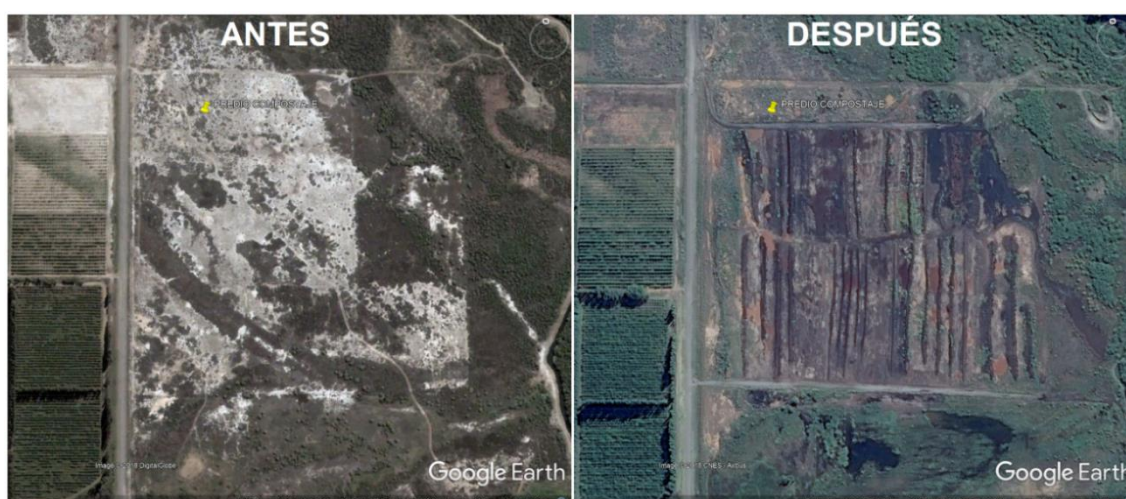


Figura 3.30: Imagen satelital del predio donde se realizó el compostaje, antes de comenzar a realizar el ensayo y luego de un par de años de producción de compost.

La combinación entre el calentamiento global y las dificultades presentadas por el manejo inadecuado de los residuos, principalmente por la falta de equipamiento industrial acorde al volumen a procesar, suele generar deshidrataciones extremas en las hileras. Si estas condiciones no son revertidas, puede ocurrir en la peor de las circunstancias la autoignición del material a compostar (Figura 3.31), y una vez comenzado el fuego las probabilidades de propagación del mismo por todo el predio son muy altas (Buggeln & Rynk, 2002). Este compostaje que entra en autoignición ya no puede utilizarse como enmienda orgánica, ocasionando por un lado, la pérdida de un producto con alto valor agregado, pero además, produciendo humo y olores desagradables que contaminan el aire (Marueco, 2011). En este caso, como ya se comentó anteriormente, es sumamente necesario humectar las hileras y realizar volteos periódicos con maquinaria industrial adecuada para no llegar a esta situación.



Figura 3.31: Autoignición de las hileras de compostaje.

Por último, es necesario conocer el análisis económico para el tratamiento de los residuos sólidos mediante el proceso de compostaje, el cual depende del volumen y característica del orujo generado. Para los costos estimativos se

utilizaron datos reales suministrados por la empresa JUGOS S.A., los cuales son presentados en porcentajes por exigencias de confidencialidad de la compañía. Los costos de inversión inicial fueron de 300.000 dólares, y corresponden a las inversiones necesarias para el desarrollo del sistema de tratamiento, entre los que se destacan los estudios preliminares del terreno, estudios de impacto ambiental, movimiento de suelo, obras de albañilería, colocación de cerco perimetral y compra de maquinaria. Por otro lado, los gastos de funcionamiento son presentados en la Figura 3.32 y están asociados a los costos de transporte, mantenimiento, combustible y salarios del personal. Como puede observarse, el costo de transporte es el gasto más importante ya que el orujo generado durante el proceso productivo debe ser transportado unos 10 kilómetros por un camión habilitado para tal fin desde la empresa hasta el predio donde se realiza el compostaje, evidenciando de esta manera que el procesamiento sería mucho más rentable si dicho predio se encontraría más cerca del lugar de generación. Estos gastos de funcionamiento asociados al sistema de tratamiento de residuos sólidos incrementan en un 0,6% los costos de procesamiento para la obtención de los jugos concentrados. Es importante resaltar que los datos reportados intentan solo estimar los costos directos asociados al sistema de tratamiento para poder cuantificar el precio de venta que debería tener el compost producido.

De un relevamiento propio realizado en diferentes establecimientos de cría de animales se pudo determinar que el precio de venta de los guanos (chivo, oveja y gallina), que son utilizados tradicionalmente en las chacras de la región como abono para el suelo, tienen un precio de venta que es entre un 32,7 y 58,9% menor que el valor que debería tener el compost para cubrir los gastos de funcionamiento de la planta de tratamiento. Como es sabido, la incorporación de

enmiendas orgánicas estabilizadas proporciona una mejor calidad del suelo en relación a las propiedades físicas, químicas y biológicas, por lo que deberían ser una opción segura para el reemplazo de los guanos de animales. Sin embargo, los productores frutihortícolas del Alto Valle de Río Negro que se encuentran atravesando un período de crisis con pérdidas de rentabilidad en la producción, debido a la situación económica nacional, siguen optando por la utilización de estiércoles sin ningún tipo de tratamiento por el menor precio en comparación con los compost, a pesar de que a nivel internacional la tendencia indica que se están dejando de emplear los guanos por las restricciones en su aplicación debido a que representan una potencial fuente de patógenos. En este sentido, el análisis económico indicaría que no es rentable para la empresa la producción de compost, ya que es muy difícil competir con estas alternativas más económicas que son habitualmente empleadas. A pesar de esto, el tratamiento de los residuos sólidos por compostaje empleado por JUGOS S.A. sigue siendo la opción más factible y beneficiosa, ya que le permite reducir de una temporada a otra los grandes volúmenes de orujos generados diariamente. Es de recordar, por otro lado, que la empresa exporta la mayor parte de lo que produce y que las exigencias mundiales a nivel de los países importadores les confiere ventajas competitivas a aquellas empresas que cumplen con las normas ambientales, de responsabilidad social y de sostenibilidad en cuanto a la reducción del uso de recursos, el tratamiento de los residuos y el aprovechamiento de los subproductos generados.

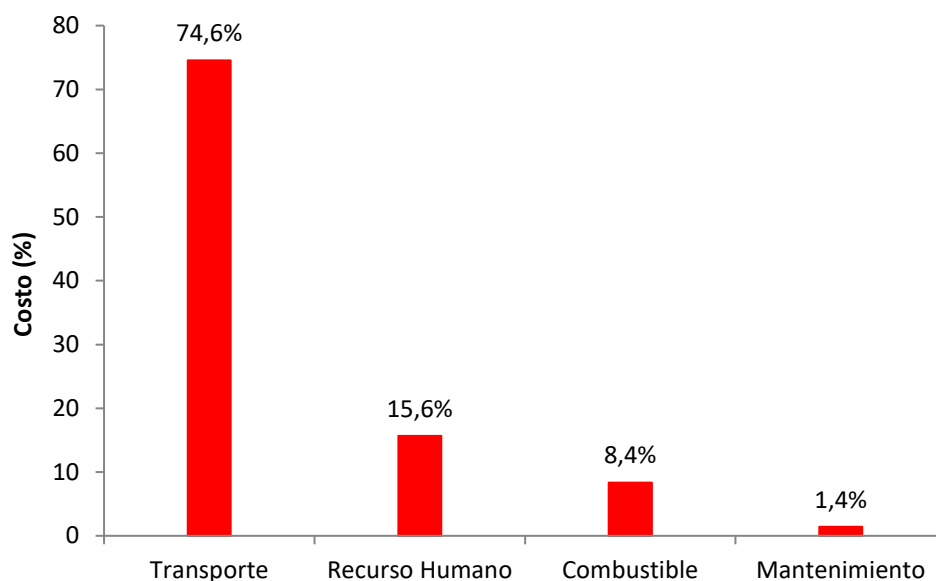


Figura 3.32: Distribución de costos de funcionamiento del sistema de tratamiento de residuos sólidos.

3.3.7. Perfiles de temperatura con material estructurante

Las temperaturas promedio de cada una de las pilas registradas durante la primera etapa del proceso de compostaje se muestran en la Figura 3.33. Se puede observar que los perfiles presentan exactamente la misma tendencia, tanto para las tres pilas control como las tres pilas con material estructurante. Cabe destacar que solo se muestra el perfil de los primeros 150 días de tratamiento, en donde se aprecia claramente como asciende abruptamente la temperatura de las pilas a las cuales se le agregó aserrín y chips, entrando en etapa termofílica luego de 10 días de realizar el mezclado, coincidente con los resultados obtenidos para otras matrices testeadas (Cooperband & Middleton, 1996; Levanon & Pluda, 2002; Sundberg *et al.*, 2004; Tognetti, 2007; Contardi & Errasti, 2012). Estas tres pilas permanecieron por cinco días a temperaturas superiores a los 55°C, y alcanzaron un promedio máximo de 58°C a los 45 días

de comenzado el ensayo, siendo estas altas temperaturas un indicador de condiciones adecuadas de compostaje (Tognetti, 2007).

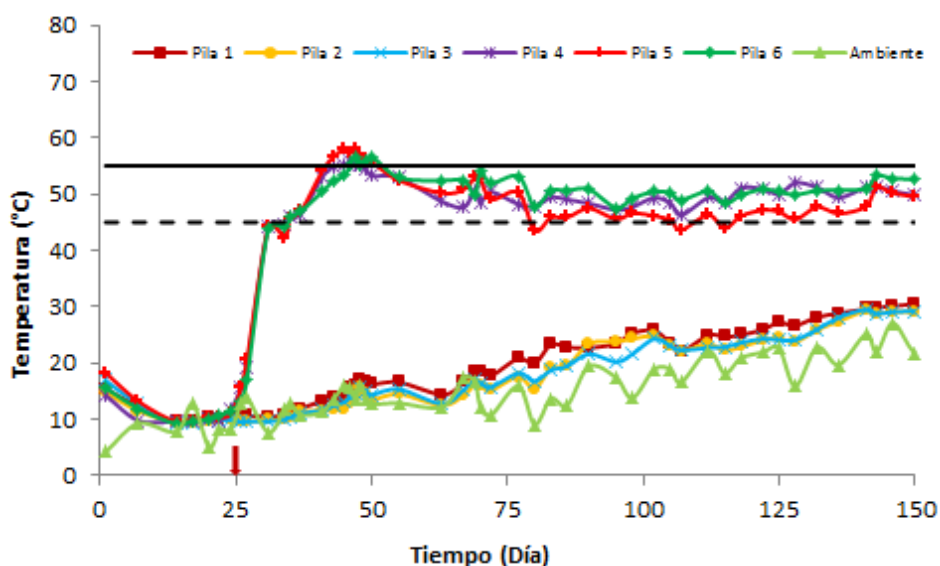


Figura 3.33: Perfiles de temperatura durante parte del proceso de compostaje. La flecha indica el día donde se realizó el mezclado del orujo de manzana con el material estructurante para el armado de cada una de las pilas. La línea punteada indica el valor límite de la etapa termofílica (45°C), mientras que la línea entera indica el valor mínimo para la reducción de patógenos (55°C). Las pilas 1, 2 y 3 son el control sin material estructurante, mientras que las pilas 4, 5 y 6 son con material estructurante. Los valores son promedios de las mediciones.

Según el registro de temperatura observado, se puede asegurar que el compostaje desarrollado cumple con las normas de la USEPA (1993), que exige en sus directrices que para obtener compost en pilas estáticas se deben asegurar tres días consecutivos con temperaturas mayores o iguales a 55°C. Como era de esperar, las pilas empleadas como control presentaron un incremento de temperatura muy lento similar al primer ensayo realizado (Figura 3.17), alcanzando temperaturas máximas de 30°C luego de 5 meses de tratamiento. Estos resultados indican que el agregado de estructurante asegura condiciones de aireación en las pilas al ser un material seco con diferente

tamaño de partículas que aseguran poros de diferente tamaño, siendo posiblemente el chip el que más ha contribuido a esto, y la absorción del exceso de humedad, lo cual es favorecido principalmente por el aserrín. Así mismo, el agregado de material carbonado aumenta notablemente la actividad microbiana, permitiendo además una mayor capacidad de retención de agua y superficie de contacto para la accesibilidad al ataque microbiano, en concordancia con lo indicado por varios autores (Tognetti, 2007; Leconte, 2010).

Para controlar la temperatura de manera más precisa, el dispositivo Most fue incorporado en el centro de la Pila 5, por lo que en la Figura 3.34 se puede observar la comparación entre ambos registros de temperatura. Como era de esperar, el dispositivo inalámbrico presenta valores de temperatura superiores a los datos tomados con el termómetro digital. Esta diferencia, en promedio de unos 5°C, es muy razonable ya que por lo general el centro de la pila está a mayor temperatura que las capas más próximas a la superficie (Ullé, 2009; Robles Mitma, 2015). Como se mencionó anteriormente, la temperatura es unos de los parámetros más importantes para el control del proceso de compostaje, ya que permite verificar el cumplimiento de la etapa termofílica y detectar la evolución de la actividad biológica. Es por esto que la utilización de herramientas tecnológicas inalámbricas para el tratamiento de residuos agroindustriales es sumamente importante, no solo para la toma de decisiones y la ejecución de acciones de control, sino además para contar con información inmediata y confiable (Porter *et al.*, 2005; Wolfert *et al.*, 2017; Orden, 2018).

Cabe destacar que solo se pudo estudiar el comportamiento en la etapa termofílica de estas pilas, pero no fue posible analizar las características

fisicoquímicas y microbiológicas por falta de recursos económicos, lo que impide evaluar la calidad de las mismas.

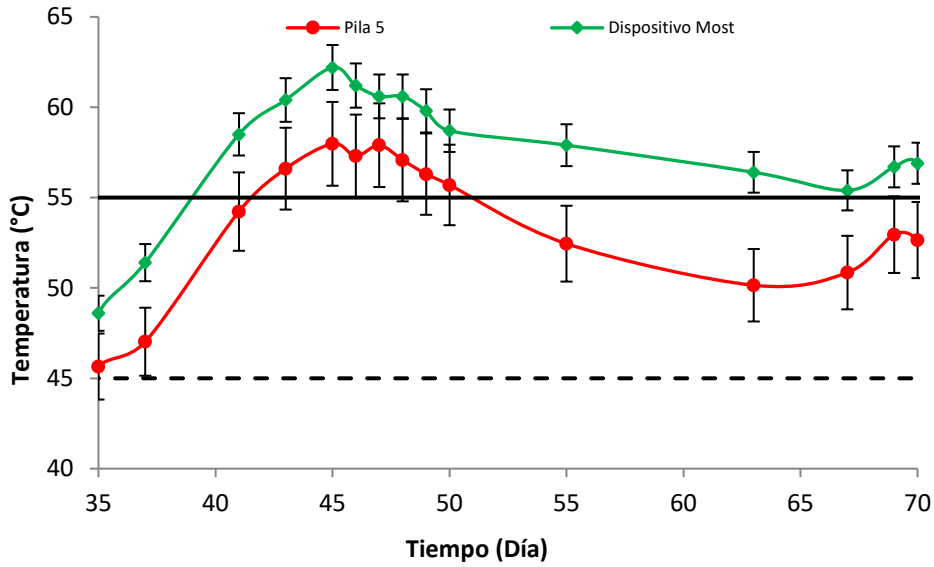


Figura 3.34: Comparación entre los perfiles de temperatura generados entre el termómetro digital Testo y el dispositivo Most. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

3.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se demostró que el empleo del orujo de manzana y pera como únicos sustratos para la obtención de compost representa una opción viable, que permite transformar un residuo en un recurso productivo. Además, se destaca que todos los ensayos de compostaje se realizaron empleando volúmenes de subproductos a gran escala.

Los orujos generados durante el proceso productivo para la obtención de jugos concentrados pueden ser compostados con éxito mediante hileras con volteos, obteniéndose productos con valor agrícola, que cumplen con las normativas vigentes respecto a tiempos y temperaturas durante la etapa termofílica, parámetros fisicoquímicos y madurez. Por otra parte, las evidencias indican que el agregado de aserrín y chips de la industria maderera posibilita la reducción en los tiempos de procesamiento, resultando en una opción factible para optimizar la obtención de compost.

El compostaje es una opción factible y económicamente atractiva para producir enmiendas orgánicas de interés comercial a través de los orujos generados en la industria juguera, logrando alcanzar una reducción significativa del volumen de los residuos generados. De esta manera, se puede minimizar el impacto ambiental de una disposición inadecuada de los mismos. Para ambos tratamientos, tanto el de manzana como de pera, se alcanzaron reducciones similares de aproximadamente el 89%. Para lograr esto es indispensable realizar el procesamiento manteniendo controladas las variables más importantes, como son la temperatura, humectación y oxigenación de las hileras. Además, es importante destacar que el compost obtenido cumple con la normativa de la

USEPA y con la reglamentación nacional, si bien no se llegaron a medir todos los parámetros exigidos.

Debido a la elevada humedad de los orujos iniciales, los períodos de procesamiento son muy largos requiriendo alrededor de 15 meses para obtener productos estabilizados, de los cuales aproximadamente 5 meses se pierden en reducir la humedad del material. Esto obliga a contar con un predio de amplia disponibilidad de espacio, que soporte el solapamiento de producción de compost en temporadas sucesivas.

Sin embargo, la incorporación de un material estructurante se vislumbra como una alternativa factible que podría solucionar este problema. Los resultados indicaron que es muy favorable la utilización de materiales ricos en carbono, como lo son el aserrín y los chips, para alcanzar rápidamente una de las etapas más importantes del proceso de compostaje como lo es la etapa termofílica. De esta manera, se optimizan los tiempos de procesamiento para la obtención de productos estabilizados.

En lo que respecta al procesamiento a gran escala, es viable la obtención de compost a partir de residuos agroindustriales. Sin embargo, para lograrlo es sumamente importante contar, en primer lugar, con un predio de gran superficie para el acopio y tratamiento de los orujos que sea libre de sales que puedan contaminar las hileras, en segundo lugar, disponer de un sistema de riego para la hidratación de las hileras, y por último, adquirir equipamiento industrial adecuado que garantice la capacidad de procesar la gran cantidad de residuo generado anualmente, permitiendo de esta manera acortar los plazos de producción de compost para su rápida comercialización.

Capítulo 4

ALTERNATIVAS PARA LA UTILIZACIÓN DE COMPOST DE PERA EN AGRICULTURA

4.1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, la producción anual de peras en 2017 fue de aproximadamente 611.000 toneladas. El 75% de ese valor se destina al consumo en fresco, ya sea para exportación (60%) o mercado interno (15%), mientras que el 25% restante (152.750 toneladas), se emplea en la producción de jugos concentrados y otras bebidas (Secretaría de Política Económica, 2017). El 60% (92.000 toneladas) de la pera destinada a industria se descarta como orujos o bagazos (Laos, 2013). Cabe destacar que, de la producción nacional de peras, el 73% (446.000 toneladas) corresponde a la provincia de Río Negro (Avellá *et al.*, 2018). El aprovechamiento de los orujos mediante compostaje y posterior utilización como enmienda orgánica, constituye una alternativa de valor agrícola.

Actualmente, el apogeo de las producciones agroecológicas ha permitido la creciente incorporación de las enmiendas orgánicas a los esquemas productivos, por lo que aumentó notablemente el mercado de la producción de compost (Ullé & Díaz, 2018). En la Argentina, alrededor de 90 plantas industriales están realizando un tratamiento de sus residuos agroindustriales para obtener enmiendas o fertilizantes orgánicos, convirtiéndose en un nuevo nicho económico (Orden, 2016). Estas prácticas de manejo, en una agricultura sustentable, promueven la recirculación de nutrientes a través del compostaje de los residuos orgánicos, minimizando de esta manera los impactos en el ambiente.

Se han estudiado los beneficios de la aplicación de compost de cachaza (Quiroz Guerrero & Pérez Vázquez, 2013) y bagazo de uva (Martínez-Cordeiro *et al.*, 2013) sobre las propiedades de los suelos observando que se favorece la

mineralización de la materia orgánica, la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo, y la formación de agregados. Se ha determinado que el aporte de vermicompost derivado de cachaza y estiércol de bovino disminuye la densidad aparente del suelo, fomenta la formación de agregados estables en agua y promueve una estructura granulada y menos compacta (Sánchez Hernández *et al.*, 2005). Además, se ha encontrado que la vinaza obtenida a partir de melaza, aporta el doble de nutrientes que la obtenida directamente de jugo de caña de azúcar, y al irrigar con vinazas y agregar un complemento de 60 kg.ha⁻¹ de nitrógeno, aumenta el nivel de potasio, hierro y fósforo, así como el pH (Bautista Zúñiga *et al.*, 2000).

El compost aplicado en agricultura proporciona innumerables beneficios, principalmente como mejorador de la calidad del suelo favoreciendo no sólo las propiedades físicas, sino también químicas y biológicas (Tognetti, 2007; Sharma *et al.*, 2017; Vázquez & Loli, 2018). Así, por ejemplo, se ha evaluado la restauración de la fertilidad de suelos degradados por sucesivos cultivos de maíz adicionando un compost elaborado a partir de residuos de la industria azucarera (Arrieche & Mora, 2005). Por otro lado, se ha analizado el efecto del uso de compost de este tipo de industria sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Quiroz Guerrero & Pérez Vázquez, 2013).

La aplicación de enmiendas orgánicas tanto en sistemas agroecológicos como en producciones convencionales con manejo sustentable es de carácter estratégico, ya que permite reutilizar los residuos generados durante el proceso productivo mediante el reciclado de los nutrientes (Kabisch, 2011; iQonsulting, 2019). Sin embargo, la escala a procesar y el ambiente donde se produzca determinarán si esta alternativa es factible de implementación sin restricciones

en cultivos agrícolas. Por otro lado, hay que tener en cuenta que para la, es sumamente necesario analizar en cada caso cual es la dosificación recomendada ($t.ha^{-1}$) teniendo que analizar el tipo y estado del suelo aplicación de compost en horticultura o fruticultura para la incorporación de mismo (Muñoz Villalobos *et al.*; 2013; Rodríguez *et al.*, 2017; Maldonado *et al.*, 2018).

Existe abundante bibliografía respecto de la aplicación de compost en diferentes investigaciones para horticultura (Ordóñez *et al.*, 1999; Clark *et al.*, 2000; Matheus, 2004; Bongiovanni Ferreyra *et al.*, 2015; Fiasconaro *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2017; Maldonado *et al.*, 2018). Diversos autores han estudiado el empleo de compost como sustrato alternativo para la obtención de plantines hortícolas y en cultivos bajo cubierta, en reemplazo de otros productos no renovables y de alto costo como la turba (Bustamante *et al.*, 2008; Herrera *et al.*, 2008; Belal & El-Mahrouk, 2010; Jayasinghe *et al.*, 2010; Fan *et al.*, 2015; Gavilanes-Terán *et al.*, 2017). Por otro lado, hay diversos estudios en relación a la influencia de la aplicación de compost en el crecimiento de las plantas y sobre el rendimiento y la calidad de tomate (Maynard, 1995; Copetta *et al.*, 2011; Pane *et al.*, 2015). A nivel local (Patagonia Argentina), se ha evaluado el efecto del compost de manzana elaborado por la empresa JUGOS S.A. sobre el crecimiento de plantines de lechuga empleando dosis variables de enmienda y suelos con diferente salinidad (Martínez *et al.*, 2017).

En relación a la fruticultura, Moran & Schupp (2002) realizaron determinaciones con el fin de evaluar el crecimiento temprano y la precocidad de manzanos mediante el empleo de orujo de manzana. Rosen & Bierman (2005) abordaron las diferencias entre la aplicación de estiércol fresco y compostado, de diferentes animales, sobre árboles frutales. Baldi *et al.* (2010) evaluaron el incrementó de la

producción en plantas de duraznos empleando un compost de estiércol de vaca. Li *et al.* (2020) estudiaron el efecto de la aplicación de compost de estiércol de cabra y paja de trigo fortificado con polvo de roca sobre las propiedades del suelo, la actividad microbiana del suelo y el rendimiento y calidad de la fruta en un monte frutal de manzanas. Si bien existe abundante bibliografía respecto a la aplicación en fruticultura de enmiendas orgánicas de co-compostaje de residuos de diferente origen, en este capítulo se hará hincapié en los efectos de la aplicación de compost a partir de residuos de la fruticultura sin mezclar con ningún otro residuo.

4.1.1. Objetivo

- Analizar los efectos de la aplicación de compost de pera sobre un monte frutal del Alto Valle de Río Negro en un suelo franco arenoso.

4.1.2. Hipótesis y predicciones

- El agregado de compost sobre un monte frutal mejora la producción frutícola. Predicción: La aplicación de compost de pera en un monte frutal del Alto Valle de Río Negro mejorará las propiedades del suelo y por ende las características del monte frutal.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental INTA Alto Valle (39°01'27.0" S y 67°44'10.6" O), y fue conducido por la Ingeniera Agrónoma del INTA Rosa de Lima Holzmann. Se evaluó el efecto de la aplicación de compost de pera como mejorador de las propiedades físicas y químicas del suelo, y las

características del monte frutal, así como también el efecto en varios Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) tanto en el suelo como en la fruta.

4.2.2. Enmienda orgánica utilizada

Para el ensayo se utilizó el compost de pera que fue descrito en el capítulo anterior. Las propiedades fisicoquímicas del compost utilizado fueron: pH = 6,3, conductividad eléctrica (CE) = 1,53 dS.m⁻¹, materia orgánica (MO) = 44,5%, humedad (Hu) = 41,2%, nitrógeno (N) = 1,95%, relación C/N = 12,67, fósforo (P) = 0,30%, potasio (K) = 0,66%, calcio (Ca) = 1,30% y magnesio (Mg) = 0,33%.

4.2.3. Diseño experimental

Se estableció un ensayo durante 3 temporadas y se realizó un diseño experimental completamente aleatorizado de 4 tratamientos, sobre un monte frutal de peras plantado con las variedades *Abate Fetel* y *Beurré D'Anjou* (Figura 4.1). Se aplicó compost tanto en las filas frutales (Compost Fila "CF") como en las calles (Compost Calle "CC"), comparando en cada caso con su correspondiente testigo sin ningún tipo de aplicación (Testigo Calle "TC" y Testigo Fila "TF").

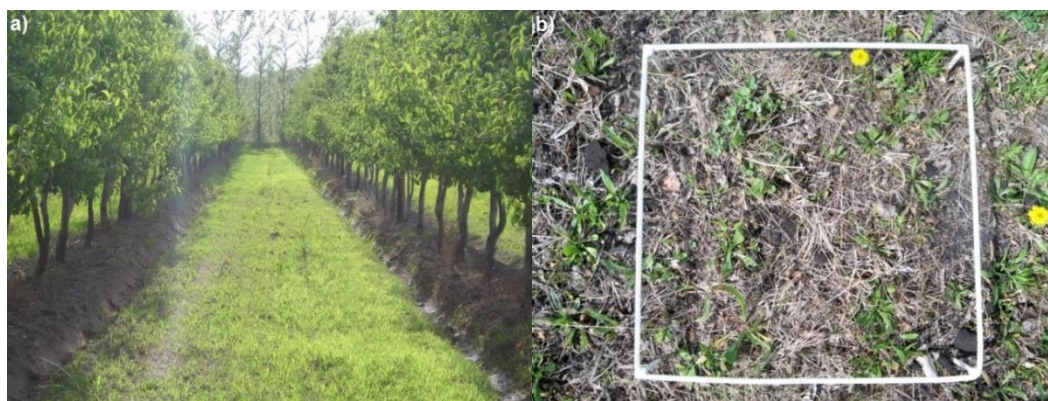


Figura 4.1: Cuadro de perales donde se realizó el ensayo (a) y densidad de aplicación de 8 t.ha⁻¹ de compost (b).

Se aplicaron 8 t.ha⁻¹ de compost en primavera cada año (Figura 4.1), tanto en las calles como en las filas, según recomendación de los profesionales de la Estación Experimental INTA Alto Valle que evaluaron las características del suelo y del compost para determinar la dosis a utilizar. Los diversos trabajos que se han encontrado recomiendan dosis altas de compost (20 a 40 t.ha⁻¹), donde se destaca el riesgo de contaminación con fósforo que tienen los compost ricos en este nutriente, como son los de origen animal (Hesketh & Brookes, 2000; Sims & Sharpley, 2005; Kowaljow & Mazzarino, 2007; Mazzarino *et al.*, 2008). En este sentido, los residuos de origen vegetal son pobre en fósforo, por lo que suelen mezclarse con otros subproductos para mejorar el aporte de este nutriente durante la aplicación.

El cuadro frutal presentaba un suelo superficialmente franco arenoso de pH moderadamente alcalino, salino sódico pero de baja conductividad eléctrica, bajo contenido de materia orgánica y reacción al ácido clorhídrico evidenciando presencia de carbonatos. El mismo se manejó tradicionalmente, con rastreadas invernales para incorporar el compost (Villarreal & Santagni, 2004; Angel & Vázquez, 2014). La vegetación era espontánea con gramíneas anuales y leguminosas principalmente, siendo el riego por surco (Demin, 2014; López-Olivari; 2016).

El diseño al azar de la distribución de los tratamientos se muestra en la Figura 4.2, donde se representan en color azul las localizaciones donde se realizó la aplicación de compost, tanto en las filas de plantas como en las calles de separación de las mismas.

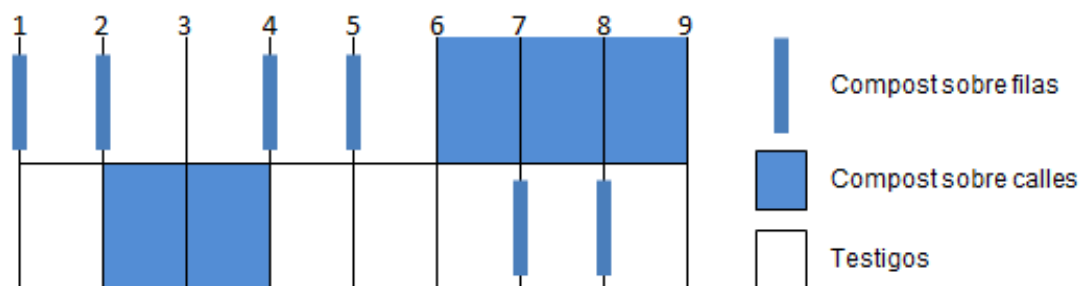


Figura 4.2: Filas frutales desde el N°1 a N°8 donde se realizó el ensayo y la distribución de los tratamientos en filas y calles.

Para realizar las determinaciones fisicoquímicas, tanto en la fruta como en el suelo, se tomaron muestras compuestas para los tratamientos (Benitez, 2001; Budaba, 2004; Gergoff Grozeff, 2006; Íñiguez *et al.*, 2011; Sosa & Alvarenga, 2012; De Bustos, 2013). Los análisis se llevaron a cabo en los laboratorios del Centro de Investigación y Asistencia Técnica a la Industria (CIATI) en Villa Regina. Cabe destacar que las muestras de fruta fueron tomadas en verano, mientras que las de suelo en invierno.

Para las muestras de suelo tratadas con compost y sin ningún tratamiento (testigos), se analizó pH, humedad, cenizas, conductividad eléctrica, materia orgánica, carbono orgánico, nitratos, nitritos y nitrógeno total. Los métodos empleados para evaluar estos parámetros fisicoquímicos fueron desarrollados en la sección 3.2.3 del capítulo 3. Por otra parte, se determinaron varios EPT (cadmio total, cinc total, cobre total, cromo total, mercurio total, níquel total y plomo total), mediante espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo en un equipo ICP-MS Agilent 7700x con muestras tratadas previamente mediante digestión por microondas en un digestor MARS 6.

Dentro de la amplia gama de indicadores para evaluar la calidad de los suelos, se determinaron las siguientes propiedades físicas: densidad aparente, compactación subsuperficial (penetrometría a 30 cm de profundidad) e infiltración básica (Holzmann, 2010). La densidad aparente se determinó por el método del cilindro (Coile, 1936), mediante la utilización de un cilindro de 10 cm de alto y 6,20 cm de diámetro interno (Figura 4.3). Además de la densidad aparente, otra metodología sencilla y con valores aceptables de la compactación es la penetrometría, también conocida como resistencia a la penetración (Wolkowski, 1990). Se realizó a una profundidad de 30 cm para los diferentes tratamientos, mediante la utilización de un penetrómetro de golpe (Figura 4.3). La infiltración básica se determinó utilizando el anillo simple de carga constante que acompaña a la valija edafológica del USDA adaptada por el Instituto de Suelos-CIRN-INTA (Figura 4.3).



Figura 4.3: Extracción de muestra para determinar la densidad aparente (a), determinación de penetrometría (b) y determinación de infiltración básica (c).

Con respecto a las determinaciones en el monte frutal de peras, los parámetros vegetales analizados fueron el diámetro de tronco, altura de planta, área foliar e índice verde (Rodríguez Mendoza *et al.*, 1998; UTHSCSA, 2002; Hochmaier, 2010; Holzmann, 2010). En cada una de las plantas del monte frutal en estudio, se midió la circunferencia del tronco a los 10 cm del suelo para evaluar el crecimiento reflejado en diámetro de tronco, y se midieron los ejes de cada planta para determinar la altura de las mismas. El área foliar se midió con un *scanner* Hewlett Packard ScanJet 4C usando “Image Tool 3.0” para determinar la proyección de la sombra de la planta, mientras que para el índice verde se

utilizó el equipo medidor SPAD-502 que detecta el contenido de clorofila en las hojas.

Para finalizar, se cosecharon peras al azar de todo el monte frutal para evaluar la acumulación de arsénico en las peras luego de varias aplicaciones de compost. Este metal pesado es controlado rigurosamente, y no debe superar la concentración máxima permitida por la reglamentación actual para la comercialización de la fruta fresca ($0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ para Mercosur y $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ para Unión Europea). Además del arsénico total se determinaron nutrientes y otros elementos potencialmente tóxicos (aluminio total, antimonio total, bario total, boro total, cadmio total, calcio, cinc total, cobre total, cromo total, estaño total, fósforo total, hierro total, magnesio, manganeso total, mercurio total, molibdeno total, níquel total, nitrógeno total, plomo total, potasio, selenio total, sodio y vanadio total), mediante espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo en un equipo ICP-MS Agilent 7700x con muestras tratadas previamente mediante digestión por microondas en un digestor MARS 6.

4.2.4. Análisis estadístico

Los valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo se compararon mediante análisis de varianza empleando el test de ANOVA con repeticiones y el test de Fisher, mientras que para los parámetros vegetales se empleó el test de ANOVA simple y el test de Fisher, usando para ambos casos el paquete estadístico InfoStat versión 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Parámetros físicos y químicos del suelo

En la Figura 4.4 se muestra el perfil de materia orgánica durante todo el ensayo, destacándose un aumento significativo en todos los tratamientos luego del segundo año de aplicación, aunque no se mantiene dicho incremento entre el segundo y tercer año. Es evidente un aumento significativo año a año para aquellos tratamientos con aplicación de compost en las calles respecto a la situación inicial ($p < 0,05$). Sin embargo, solo se puede apreciar una tendencia de aumento de este parámetro para el resto de los tratamientos en cada uno de los años de aplicación (las diferencias no fueron significativas).

Este mejoramiento en la calidad del suelo, evidenciado por el aumento de la materia orgánica luego de varios meses de su incorporación al mismo, es coincidente con investigaciones de otros autores (De Bertoldi *et al.*, 1987; Gallardo-Lara & Nogales, 1987; Hernando *et al.*, 1989; Nogales *et al.*, 1986 y 1996; Mazzarino *et al.*, 1998; García-Gil, 2001; Trejo, 2007; Kowaljaw & Mazzarino, 2012).

La materia orgánica en el suelo mejora el comportamiento de los indicadores de calidad física de suelos, de hecho, valores altos de la misma se asocian muchas veces a bajos valores de densidad aparente y altos de infiltración (Cuevas Becerra, 2006; Rubio Gutiérrez, 2010). Además, disminuye la compactación y en consecuencia mejora la permeabilidad del agua en el suelo (Barber & Navarro, 1994; Labrador, 2008).

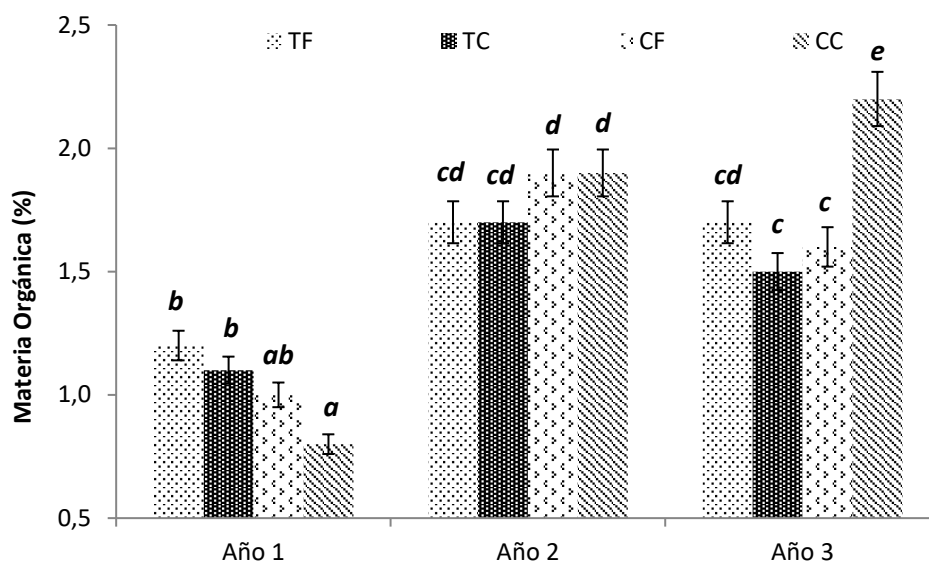


Figura 4.4: Perfil de materia orgánica para todos los tratamientos durante los tres años de aplicación. TF, TC, CF y CC corresponde a “Testigo Fila”, “Testigo Calle”, “Compost Fila” y “Compost Calle”. Los valores son promedios de tres mediciones \pm desvío estándar.

La densidad aparente es un valor de referencia para conocer la densidad de un suelo, incluyendo el volumen que es ocupado por los poros, por lo que describe la compactación del mismo (Fonteno, 1999; Keller & Håkansson, 2010). Este parámetro se modifica con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica (Taboada & Alvarez, 2008). Como puede apreciarse en la Tabla 4.1, el tratamiento con aplicación de compost mostró una tendencia a menor densidad aparente como se ha observado en otros trabajos (Eyras & Rostagno, 1995; Kowaljow & Mazzarino, 2012), sin embargo, las diferencias no fueron significativas. Con la incorporación del compost, se agrega materia orgánica al suelo, favoreciendo la formación de macroagregados y aumentando la porosidad, mejorando así la resistencia del suelo a la elongación de las raíces (Sánchez, 1994; Eyras & Rostagno, 2012).

Por su parte, para la penetrometría hay que destacar que para valores que superen los 2 MPa de presión puede generarse un impedimento del crecimiento

radical (Blancher *et al.*, 1978; Threadgill, 1982; Abercrombie, 1990). Para montes frutales en el Alto Valle de Río Negro, se determinaron valores de resistencia a la penetración superiores a 2,2 MPa (Aruani & Behmer, 2004), por lo que esta situación es concordante con el valor presentado en la Tabla 4.1, correspondiente al ensayo sin agregado de compost. Si bien la materia orgánica tiende a aumentar la macroporosidad del suelo y, en consecuencia, disminuye la resistencia a la penetración (Elsayed *et al.*, 2007; Hernández de la Cruz *et al.*, 2017; Jara Olea, 2019), en el presente trabajo los tratamientos con compost mostraron solo una tendencia (las diferencias no fueron significativas).

Tabla 4.1: Evolución de los parámetros del suelo con y sin tratamiento. Los valores son promedios de cuatro muestras \pm desvío estándar.

Tratamiento	Densidad aparente (g/cm ³)	Penetrometría (MPa)
<i>Sin compost</i>	1,40 \pm 0,06	2,07 \pm 0,66
<i>Con compost</i>	1,31 \pm 0,03	1,86 \pm 0,26

La infiltración básica es un valor que indica la entrada vertical del agua al suelo, siendo un parámetro importante e integrador del funcionamiento del mismo. Las velocidades de infiltración para montes frutales que se riegan por inundación varían en el rango de los 50 a 200 mm.h⁻¹, pudiéndose encontrar valores por encima de los 325 mm.h⁻¹ con manejo orgánico de la plantación (Mendía & Irisarri, 1995). De la Figura 4.5, donde se aprecian las curvas de infiltración para los diferentes tratamientos, se puede resaltar que los parámetros se encuentran dentro de los valores referenciados en la bibliografía. Ambas curvas presentan las mismas tendencias sin encontrarse diferencias significativas entre los

ensayos. Como ya se explicó anteriormente, varios autores remarcan que para evidenciar cambios en las propiedades del suelo es necesario un tiempo más largo o aplicaciones más elevadas y frecuentes de compost (Monreal *et al.*, 1998; Stamatiadis *et al.*, 1999; Herrick, 2000).

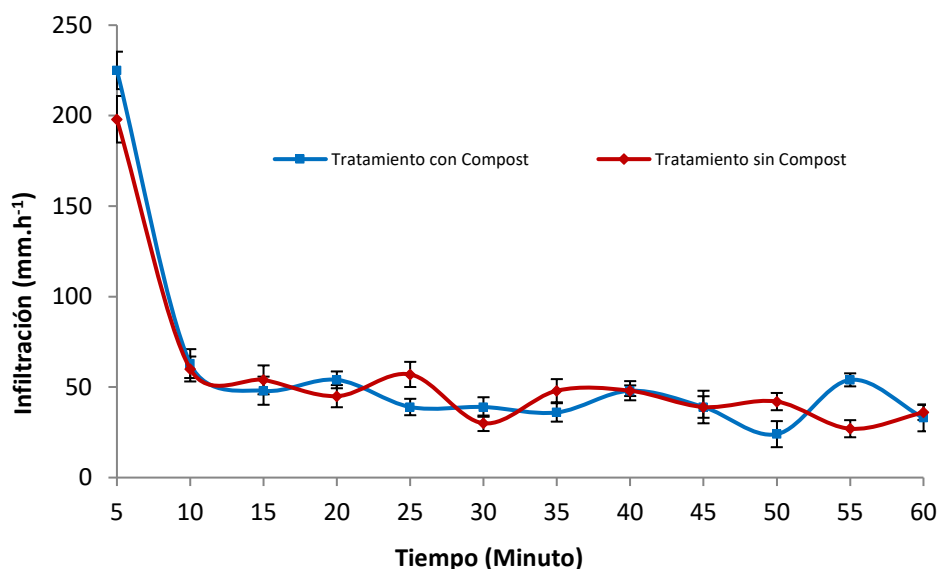


Figura 4.5: Perfil de infiltración del suelo con y sin tratamiento. Los valores son promedios de cuatro muestras \pm desvío estándar.

En la Tabla 4.2, se presenta el resto de los parámetros fisicoquímicos analizados en el suelo luego de 3 temporadas de aplicación, no observándose variaciones significativas entre los diferentes tratamientos para las determinaciones de pH, cenizas, nitratos, nitritos y nitrógeno total. Sin embargo, la humedad muestra un aumento significativo para aquellos tratamientos donde se agregó la enmienda orgánica, pudiendo estar asociado directamente al aumento de la capacidad de retención de agua de los suelos por la incorporación de materia orgánica (Hudson, 1994; Moreno Álvarez, 2002; Agnew & Leonard, 2003; Benitez & Castellanos, 2003; Valenzuela *et al.*, 2003; Eyra & Rostagno, 2012).

El carbono orgánico presentó el mismo comportamiento que la materia orgánica, con un leve aumento para aquellos tratamientos donde la incorporación del compost se realizó sobre las calles, coincidente con otros autores (Albanesi *et al.*, 2012; Kowaljow & Mazzarino, 2012).

Es importante destacar, que para aquellos parámetros donde no se evidenciaron cambios en las propiedades del suelo, hay que remarcar que varios autores sostienen que para detectar los cambios son necesarios periodos de tiempo más largos (Monreal *et al.*, 1998; Herrick, 2000) o aplicaciones más elevadas y frecuentes de compost (Stamatiadis *et al.*, 1999).

Tabla 4.2: Parámetros fisicoquímicos del suelo para los tratamientos realizados sobre las filas y calles durante los tres años de ensayo. ND: No detectado. Los valores son promedios de tres muestras ± desvío estándar.

Parámetro	Testigo año 1	Testigo año 2	Testigo año 3	Aplicación año 1	Aplicación año 2	Aplicación año 3	Unidad
Tratamiento en filas							
<i>pH</i>	8,16 ± 0,40 ^a	8,00 ± 0,40 ^a	7,99 ± 0,39 ^a	8,21 ± 0,41 ^a	8,05 ± 0,40 ^a	8,05 ± 0,40 ^a	-
<i>Humedad</i>	2,05 ± 0,10 ^a	2,00 ± 0,10 ^a	1,99 ± 0,09 ^a	2,15 ± 0,10 ^a	3,30 ± 0,16 ^b	2,55 ± 0,12 ^c	g/100g
<i>Cenizas</i>	93,98 ± 6,57 ^a	93,65 ± 6,55 ^a	93,85 ± 6,56 ^a	93,16 ± 6,52 ^a	93,65 ± 6,55 ^a	93,37 ± 6,53 ^a	g/100g
<i>Conductividad</i>	0,47 ± 0,02 ^c	0,34 ± 0,02 ^{ab}	0,30 ± 0,01 ^a	0,48 ± 0,02 ^c	0,34 ± 0,02 ^{ab}	0,36 ± 0,02 ^b	dS/m
<i>Carbono orgánico</i>	0,7 ± 0,07 ^{ab}	1,0 ± 0,10 ^c	1,0 ± 0,10 ^c	0,6 ± 0,06 ^a	1,1 ± 0,11 ^c	0,9 ± 0,09 ^{bc}	%
<i>Nitratos y Nitritos</i>	69 ± 10,3	ND	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Nitrógeno total</i>	1.830±219,6 ^b	1.320±158,4 ^a	1.132±135,8 ^a	1.371±164,5 ^a	1.154±138,4 ^a	1.207±144,8 ^a	mg/kg

Parámetro	Testigo año 1	Testigo año 2	Testigo año 3	Aplicación año 1	Aplicación año 2	Aplicación año 3	Unidad
Tratamiento en calles							
<i>pH</i>	8,09 ± 0,40 ^a	7,81 ± 0,39 ^a	8,17 ± 0,40 ^a	8,52 ± 0,42 ^a	8,00 ± 0,40 ^a	7,94 ± 0,39 ^a	-
<i>Humedad</i>	2,08 ± 0,10 ^{ab}	2,00 ± 0,10 ^a	2,08 ± 0,10 ^{ab}	2,20 ± 0,11 ^{ab}	2,35 ± 0,11 ^b	2,22 ± 0,11 ^{ab}	g/100g
<i>Cenizas</i>	94,38 ± 6,60 ^a	93,20 ± 6,52 ^a	93,96 ± 6,57 ^a	92,25 ± 6,45 ^a	93,76 ± 6,56 ^a	93,45 ± 6,54 ^a	g/100g
<i>Conductividad</i>	0,54 ± 0,03 ^b	1,14 ± 0,06 ^d	0,38 ± 0,02 ^a	0,56 ± 0,03 ^b	0,68 ± 0,04 ^c	0,36 ± 0,02 ^a	dS/m
<i>Carbono orgánico</i>	0,6 ± 0,06 ^a	1,0 ± 0,10 ^b	0,9 ± 0,09 ^b	0,5 ± 0,05 ^a	1,1 ± 0,11 ^{bc}	1,3 ± 0,13 ^c	%
<i>Nitratos y Nitritos</i>	176 ± 26,4	ND	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Nitrógeno total</i>	1.777±213,2 ^b	1.191±142,9 ^a	1.097±131,6 ^a	1.477±177,2 ^{ab}	1.069±128,2 ^a	1.226±147,1 ^a	mg/kg

En la Tabla 4.3, se pueden observar los EPT analizados para cada uno de los tratamientos. Según la Resolución de SENASA (2011), donde se establecen valores límites aceptados de concentración de metales pesados en suelos, se puede apreciar que el cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, níquel y plomo están dentro de los rangos establecidos por la norma de referencia.

Tabla 4.3: EPT del suelo para los tratamientos realizados sobre las filas y calles durante los tres años de ensayo. Comparación con valores límites de referencia en suelos (SENASA, 2011). ND: No detectado. Los valores son promedios de tres muestras ± desvío estándar.

Elemento (mg/kg)	Testigo año 1	Testigo año 2	Testigo año 3	Aplicación año 1	Aplicación año 2	Aplicación año 3	Resol. SENASA
Tratamiento en filas							
<i>Cadmio total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1
<i>Cinc total</i>	51,8 ± 5,1	53,2 ± 5,3	54,5 ± 5,4	53,4 ± 5,3	58,9 ± 5,8	61,1 ± 6,1	150
<i>Cobre total</i>	23,5 ± 2,3	22,7 ± 2,2	21,8 ± 2,1	25,6 ± 2,5	26,3 ± 2,6	25,1 ± 2,5	50
<i>Cromo total</i>	16,0 ± 1,6	15,5 ± 1,5	14,9 ± 1,4	16,0 ± 1,6	16,9 ± 1,6	16,3 ± 1,6	100
<i>Mercurio total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1
<i>Níquel total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	30
<i>Plomo total</i>	8,5 ± 0,8	8,6 ± 0,8	8,7 ± 0,8	9,4 ± 0,9	10,0 ± 1,0	9,8 ± 0,9	50
Tratamiento en calles							
<i>Cadmio total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1
<i>Cinc total</i>	60,9 ± 6,0	54,5 ± 5,4	58,7 ± 5,8	58,1 ± 5,8	51,7 ± 5,1	51,2 ± 5,1	150
<i>Cobre total</i>	27,9 ± 2,7	23,1 ± 2,3	25,4 ± 2,5	25,1 ± 2,5	24,3 ± 2,4	24,1 ± 2,4	50
<i>Cromo total</i>	19,2 ± 1,9	15,4 ± 1,5	17,5 ± 1,7	18,1 ± 1,8	15,9 ± 1,5	15,9 ± 1,5	100
<i>Mercurio total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1

Elemento (mg/kg)	Testigo año 1	Testigo año 2	Testigo año 3	Aplicación año 1	Aplicación año 2	Aplicación año 3	Resol. SENASA
<i>Níquel total</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	30
<i>Plomo total</i>	10,3 ± 1,0	9,0 ± 0,9	9,8 ± 0,9	9,6 ± 0,9	9,2 ± 0,9	9,0 ± 0,9	50

4.3.2. Parámetros vegetales

Para las determinaciones del diámetro de tronco y la altura de planta, se realizaron mediciones a todas las plantas ensayadas, diferenciándose entre las plantas sin tratamiento (101 plantas), las plantas con agregado de compost sobre las filas (140 plantas) y las plantas con compost sobre las calles (64 plantas). Los tratamientos no arrojaron diferencias entre las dos variedades de peras analizadas, ni tampoco entre ambos casos control (testigos), por lo que el análisis se presenta en virtud de los tratamientos.

Como puede observarse en las Figuras 4.6 y 4.7, existen diferencias significativas en los parámetros medidos para aquellos tratamientos con aplicación de compost en las calles ($p < 0,01$), lo cual es coincidente con investigaciones de otros autores que registraron aumentos en el diámetro de tronco y la altura de planta con el agregado de compost en plantaciones de ciprés, especies forestales, viñedos y arbóreas nativas (Julca *et al.*, 2006; Basil *et al.*, 2009; Varela & Basil, 2011; Namiot *et al.*, 2012). Sin embargo, para la aplicación de la enmienda en las filas solo se aprecia una tendencia de aumento para ambos parámetros (las diferencias no fueron significativas).

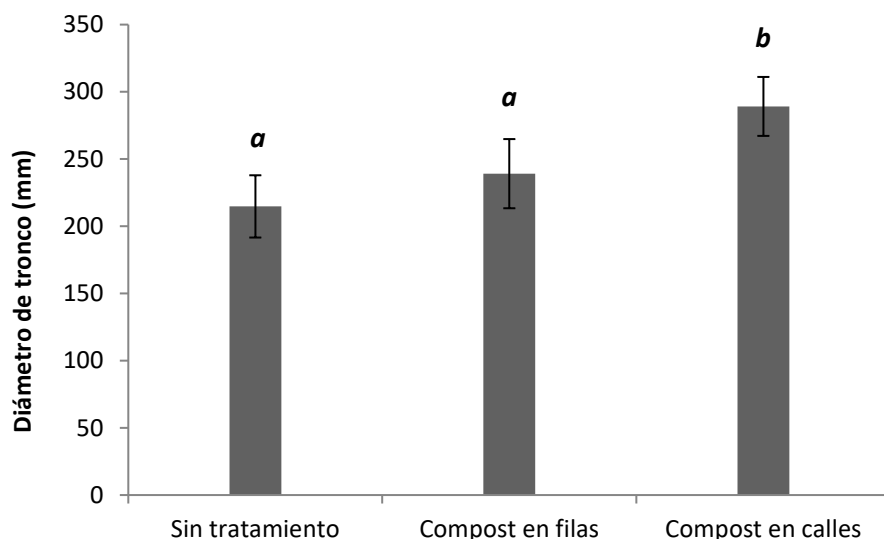


Figura 4.6: Diámetro de tronco final para todos los tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

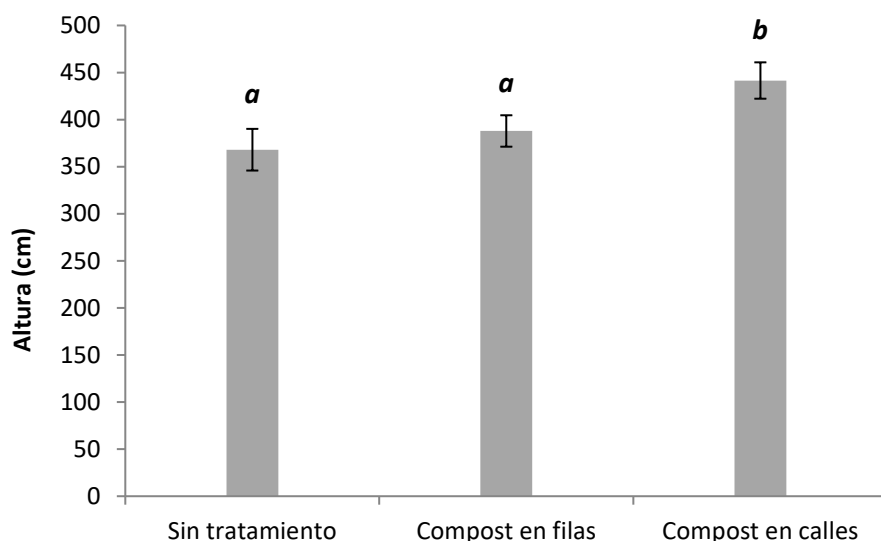


Figura 4.7: Altura de planta final para todos los tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

Cabe destacar que la incorporación sobre la calle fue la que presentó mejores resultados, pudiéndose explicar por una mayor captación de nutrientes por parte de las raíces del árbol. El sistema radicular del monte frutal es complejo, constituido principalmente por raíces principales y secundarias. Aquellas raíces más próximas a los troncos tienen como función la conducción y fijación de la

planta, mientras que las más alejadas (raicillas) son las que cumplen la función de nutrición, por lo que son las responsables de captar los nutrientes que la planta necesita (Westwood, 1978; Mirabal, 2009; Morelli, 2017).

Por otro lado, se realizó un muestreo en 200 hojas en cada uno de los tratamientos para realizar mediciones de área foliar e índice verde (Figuras 4.8 y 4.9), sucediendo lo mismo que en las determinaciones anteriores donde no se apreciaron diferencias entre las dos variedades de peras analizadas. De la Figura 4.8, se observan diferencias significativas a nivel de área foliar en el tratamiento que tuvo plantas con compost en las calles ($p < 0,05$), siendo resultados similares a los obtenidos por otros autores en plantaciones de pimientos, algas y acelga (Eyras & Rostagno, 2012; Rodríguez Guerra *et al.*, 2016; Fiasconaro *et al.*, 2017). Sin embargo, no se observaron diferencias entre tratamientos a nivel de índice verde (Figura 4.9).

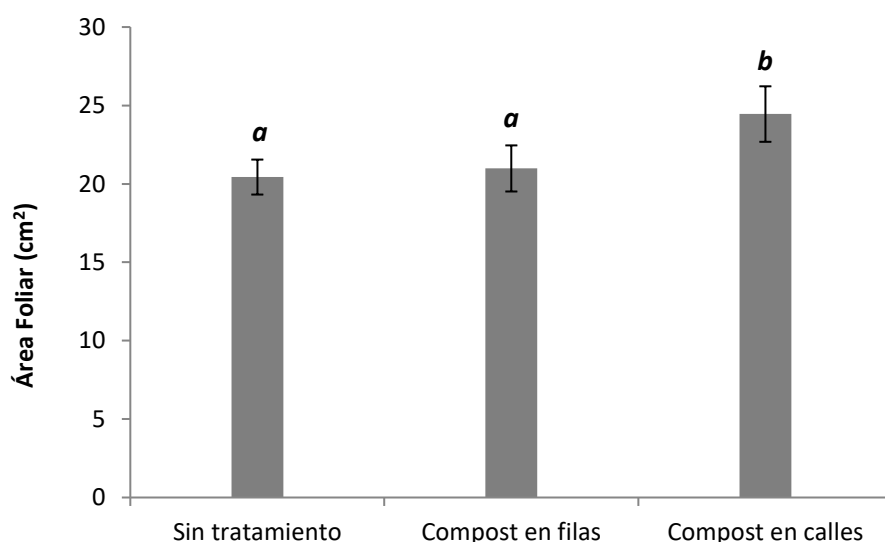


Figura 4.8: Área foliar para los distintos tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

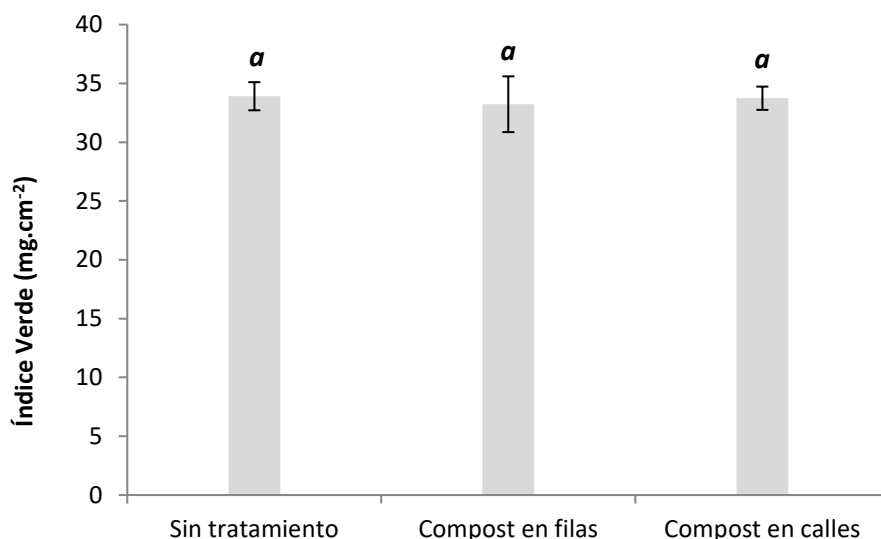


Figura 4.9: Índice verde para los distintos tratamientos. Los valores son promedios de las mediciones \pm desvío estándar.

4.3.3. Determinaciones en fruta cosechada

Se cosecharon al azar muestras de un kg de peras de cada variedad de los diferentes tratamientos. Se analizó como ítem más importante la posible acumulación de arsénico luego de tres temporadas de aplicaciones de una enmienda orgánica a base de residuos agroindustriales de pera.

Según el Reglamento Técnico del Mercosur sobre Límites Máximos de Contaminantes Inorgánicos en Alimentos, el parámetro máximo permitido de arsénico en frutas frescas es de $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ (ppm), en tanto que para la Legislación de la Unión Europea de $0,05 \text{ mg.kg}^{-1}$ (ppm).

Los resultados de los análisis presentados en la Tabla 4.4, muestran que al momento del muestreo no se detectaron residuos de arsénico en las peras *Abate Fetel* y *Beurré D'Anjou*, tanto en las tratadas como en las muestras control, indicando que la aplicación de compost no presentaría riesgo para la producción de peras.

Tabla 4.4: Análisis fisicoquímicos de las peras cosechadas sometidas a los distintos tratamientos.

 ND: No detectado. Los valores son promedios de las muestras \pm desvío estándar.

Característica	Testigo	Tratamiento	Testigo	Tratamiento	Unidad
	Abate Fetel	Abate Fetel	BeurréD´Anjou	BeurréD´Anjou	
Parámetros					
<i>pH</i>	4,39 \pm 0,21	4,34 \pm 0,21	3,91 \pm 0,19	4,06 \pm 0,20	-
<i>Humedad</i>	82,62 \pm 4,13	83,32 \pm 4,16	83,11 \pm 4,15	83,14 \pm 4,15	%
Elementos					
<i>Aluminio total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Antimonio total</i>	ND	ND	ND	ND	μ g/kg
<i>Arsénico total</i>	ND	ND	ND	ND	μ g/kg
<i>Bario total</i>	ND	0,95 \pm 0,09	0,91 \pm 0,09	0,82 \pm 0,08	mg/kg
<i>Boro total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Cadmio total</i>	ND	ND	ND	ND	μ g/kg
<i>Calcio</i>	96 \pm 9,6	113 \pm 11,3	141 \pm 14,1	152 \pm 15,2	mg/kg
<i>Cinc total</i>	0,89 \pm 0,08	1,19 \pm 0,11	1,00 \pm 0,10	0,85 \pm 0,08	mg/kg
<i>Cobre total</i>	0,89 \pm 0,08	1,08 \pm 0,10	1,21 \pm 0,12	0,93 \pm 0,09	mg/kg
<i>Cromo total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg

Característica	Testigo	Tratamiento	Testigo	Tratamiento	Unidad
	Abate Fetel	Abate Fetel	BeurréD´Anjou	BeurréD´Anjou	
<i>Estaño total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Fósforo total</i>	156 ± 15,6	204 ± 20,4	234 ± 23,4	199 ± 19,9	mg/kg
<i>Hierro total</i>	1,02 ± 0,10	1,43 ± 0,14	1,28 ± 0,12	1,05 ± 0,10	mg/kg
<i>Magnesio</i>	65 ± 6,5	81 ± 8,1	86 ± 8,6	73 ± 7,3	mg/kg
<i>Manganeso total</i>	ND	0,5 ± 0,05	0,7 ± 0,07	0,7 ± 0,07	mg/kg
<i>Mercurio total</i>	ND	ND	ND	ND	µg/kg
<i>Molibdeno total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Níquel total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Nitrógeno total</i>	925 ± 92,5	550 ± 55,0	706 ± 70,6	590 ± 59,0	mg/kg
<i>Plomo total</i>	ND	ND	ND	ND	µg/kg
<i>Potasio</i>	1.325 ± 132,5	1.538 ± 153,8	1.580 ± 158,0	1.477 ± 147,7	mg/kg
<i>Selenio total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg
<i>Sodio</i>	148 ± 14,8	ND	ND	54 ± 5,4	mg/kg
<i>Vanadio total</i>	ND	ND	ND	ND	mg/kg

4.4. CONCLUSIONES

Este capítulo aporta información valiosa sobre los efectos de la aplicación de compost de orujo de pera en fruticultura.

El mejoramiento significativo del contenido de materia orgánica del suelo, producto de la aplicación de compost obtenido a partir de subproductos de la industria juguera, favorece la producción frutícola, lo que se refleja en indicadores como la altura de planta, el diámetro de tronco y el área foliar.

Este mayor crecimiento de los árboles posiblemente se debe a mayor actividad microbiana y disponibilidad de nutrientes cuando aumenta la materia orgánica del suelo, pero también al mejoramiento de la estructura, lo que se refleja en una tendencia a mayor porosidad (menor densidad aparente y menor resistencia a la penetración). Así mismo, quedó demostrado que, para obtener mejoras significativas en los parámetros analizados alcanza con dosis de compost relativamente bajas.

La aplicación de compost en fruticultura puede realizarse de diversas maneras, ya sea mediante la utilización de un tractor sobre las calles o agregándolo puntualmente a cada planta de la fila, obteniéndose en ambos casos mejoras significativas de los indicadores de crecimiento de las plantas comparadas con los tratamientos sin aplicación. El agregado sobre las calles presentó los mejores resultados, condición muy beneficiosa ya que la aplicación con tractor es menos laboriosa que la aplicación por planta. Por lo tanto, la potencialidad del compostaje a partir de residuos agroindustriales es de notable importancia y relevancia para su aplicación en montes frutales de pepita en el Alto Valle de Río Negro. Por otro lado, quedó evidenciado que la utilización de compost no

presenta riesgo alguno de acumulación de elementos potencialmente tóxicos en el suelo ni en las frutas.

La utilización de ese tipo de enmiendas está tomando una gran difusión en agricultura, debido a la demanda creciente de frutas y hortalizas orgánicas. Argentina se está convirtiendo de a poco en uno de los países que mayor cantidad de alimentos orgánicos produce, resultando en un mercado atractivo para obtener una mayor rentabilidad al momento de la venta. Si se decide certificar producciones orgánicas, los establecimientos deben respetar ciertas normas que son exigidas en los protocolos de implementación, asegurando la obtención de productos diferenciados que posibilita la apertura a nuevos mercados. En este sentido, son limitados los productos químicos permitidos para utilizar en este tipo de plantaciones, por lo que la utilización de compost es una herramienta fundamental para que los productores vayan disminuyendo de a poco los fertilizantes químicos, y en un futuro logren reemplazarlos definitivamente. Puede ocurrir que estas enmiendas orgánicas no presenten una composición nutricional que satisfaga completamente los requerimientos de nutrientes que los suelos necesitan. Dentro de las alternativas posibles para contrarrestar esta deficiencia, la implementación de un sistema de compostaje combinando residuos agroindustriales de diferente origen podría constituir una estrategia aceptable para obtener compost más equilibrados nutricionalmente.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES GENERALES

En esta tesis se han realizado contribuciones para el tratamiento integral de los residuos sólidos y líquidos generados durante el procesamiento de manzanas y peras de una industria juguera del Alto Valle de Río Negro.

Para los efluentes líquidos se formuló y calibró un modelo matemático dinámico altamente no lineal basado en primeros principios de un sistema de tratamiento biológicos de aguas residuales. Este desarrollo computacional permite disponer de una herramienta confiable y eficiente para dar soporte en la toma de decisiones durante el proceso productivo y determinar estrategias óptimas de control en un marco de optimización dinámica. Por otro lado, para los residuos sólidos se logró determinar las condiciones necesarias para obtener una enmienda orgánica de valor agrícola mediante la utilización de los orujos, pero además se realizó un co-compostaje con aserrín y chips para reducir los tiempos de procesamiento. Con la aplicación de estos compost se consiguió aumentar la materia orgánica del suelo, además de cubrir las necesidades nutricionales de una plantación de peras, resultando así en un apropiado reemplazo de productos comerciales.

La información generada en esta tesis resulta factible de ser transferida a cualquier agroindustria que realice el procesamiento de manzanas y peras para la obtención de un alimento. Las técnicas implementadas para el tratamiento de todos los residuos son alternativas factibles para cualquier industria, pudiéndose adoptar y modificar de acuerdo a la escala productiva y a la realidad regional.

5.2. CONTRIBUCIONES

En el trabajo de la presente tesis se ha podido abordar el problema de los residuos industriales sólidos y líquidos de manera efectiva, encontrando y aportando soluciones interesantes para la empresa JUGOS S.A., trasladables a cualquier otra empresa de características similares. El foco de atención se centró en la necesidad de encontrar procedimientos que permitan el tratamiento y reutilización de los desechos agroindustriales a fin de disminuir la contaminación ambiental, y en lo posible encontrar una rentabilidad adicional o reducción de los costos operativos.

Como resumen del capítulo 2, se realizó la validación del diseño de las lagunas de tratamiento, y además se formuló un modelo matemático robusto basado en primeros principios para las lagunas de la empresa JUGOS S.A., que implica un potencial importante en lo referido al análisis y entendimiento del comportamiento del sistema de tratamiento.

Respecto a los residuos sólidos de la industria juguera, se puede encontrar en los capítulos 3 y 4 cómo el compostaje se convierte en una opción factible y económicamente atractiva para producir enmiendas orgánicas de interés. En el capítulo 3 se demostró que, controlando las variables críticas del proceso, es posible obtener un compost que cumple con gran parte de los parámetros exigidos por las normativas existentes, tanto nacionales como internacionales. Cabe destacar que algunos parámetros no se analizaron por la falta de recursos económicos. Por otro lado, es posible lograr reducir los tiempos de procesamiento de esta enmienda orgánica mediante la utilización de material estructurante para el cumplimiento de la etapa termofílica, etapa fundamental

para asegurar la reducción de patógenos y semillas de malezas. Luego, en el capítulo 4, se demostró que la aplicación de compost obtenido a partir de orujo de pera presenta excelentes resultados como mejorador de suelo en fruticultura. De esta manera, en ambos capítulos, se alcanzaron resultados muy prometedores que indican que los orujos compostados son una alternativa de uso para mejorar la calidad tanto de los suelos como de la producción frutícola.

Desde el punto de vista ambiental, esta tesis promueve el uso racional de los subproductos de la industria agroalimentaria analizada, y brinda alternativas que permiten reducir el impacto negativo sobre el ambiente.

Cabe destacar que, en nuestro país, lentamente en los últimos años se ha ido avanzando en aspectos relacionados con la legislación ambiental, a través de la aprobación de varias leyes nacionales (25.612/02, 25.675/02, 25.688/02 y 25.916/04). Sin embargo, no se ha desarrollado una política nacional integral que promueva el reciclaje y recuperación de la materia orgánica para su uso en agricultura (Laos *et al.*, 2012a).

5.3. TRABAJOS FUTUROS

Las metodologías y trabajos abordados en la presente tesis permiten avanzar sobre los problemas formulados abriendo diferentes frentes de investigación, que permitirán seguir fortaleciendo el vínculo entre la agroindustria y las instituciones científicas.

5.3.1. Efluentes líquidos

En el modelado del sistema de tratamiento de efluentes industriales, el modelo dinámico validado podría utilizarse para la resolución de diferentes problemas de

optimización. Algunos de los problemas podrían ser aquellos que minimicen el consumo energético de los motores manteniendo los parámetros de vuelco en los valores permitidos; así como también el agregado de nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica.

Otro de los aspectos importantes a considerar es la estacionalidad del efluente generado, que ocasiona la desestabilización del sistema de tratamiento. En alta temporada (enero a mayo) se generan volúmenes de efluentes muy grandes, mientras que en el resto del año los volúmenes son mínimos. Estas fluctuaciones en el ingreso de materia orgánica provocan la muerte de gran parte de los microorganismos aeróbicos responsables de la degradación de la misma. En este contexto, la puesta en régimen de todo el sistema de tratamiento en un nuevo inicio de alta temporada, ocasiona que se torne muy compleja la operatividad de las lagunas y en ciertas ocasiones no se logre alcanzar los parámetros permitidos de vuelco.

Otro de los puntos que se debería estudiar es la utilización del efluente tratado como riego de plantaciones, o que se combine con el proceso de tratamiento de residuos sólidos, ya sea para la producción de compost o la generación de biogás.

Como se mencionó en el primer capítulo, es necesario realizar trabajos de investigación y desarrollo sobre los rechazos líquidos del sistema de ultrafiltración, generados durante la etapa de clarificación de los jugos concentrados, debido a su elevada carga orgánica que se torna problemática.

5.3.2. Residuos sólidos

En primer lugar, es necesario completar la experimentación realizada, midiendo todos los parámetros que exige actualmente la normativa argentina respecto al proceso de compostaje y la calidad del compost (Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA, 2019), no medidos en su totalidad en el presente trabajo.

Además, queda pendiente analizar el efecto de la utilización del compost en función de la frecuencia de aplicación. Estos mejoradores de suelos tienen ventajas respecto de la utilización de fertilizantes químicos, ya que liberan lentamente los nutrientes, especialmente el nitrógeno, evitando la contaminación de napas a través del lavado por las lluvias y el riego de elementos muy solubles, como ocurre con la mayoría de los fertilizantes comerciales.

Por otro lado, solo se ha explorado la aplicación de compost de pera, siendo necesario replicar estos ensayos para compost de manzana, así como también utilizar mezclas variables de ambos y/o el agregado de residuos sólidos de otro tipo de agroindustrias, con el fin de proporcionar una formulación adecuada de nutrientes necesarios para las plantas, por ejemplo, mayor disponibilidad de fósforo con el agregado de residuos de origen animal.

Como tema a tener en cuenta, si se desea obtener un beneficio económico de estos nuevos productos, es muy importante considerar la ubicación del predio donde se realizará el compostaje. Actualmente la empresa JUGOS S.A. realiza el tratamiento de los residuos sólidos a 11 km de la planta de procesamiento de jugos concentrados, por lo que el 75% de los gastos fijos corresponden a los costos del transporte de los orujos.

También sería de gran interés formular y calibrar un modelo matemático para describir el comportamiento del sistema de tratamiento de residuos sólidos mediante un proceso de compostaje similar al realizado para los efluentes líquidos, que es actualmente objeto de estudio.

Bibliografía

A

- Abbas, H.; Nasr, R. & Seif, H. 2006. Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency. *Ecological Engineering* 28, pp. 25-34.
- Abercrombie, R.A. 1990. Root distribution of avocado trees on a sandy loam soil as affected by soil compaction. *Acta Horticulturae* 275, pp. 505-512.
- Acar, J.; Gokman, V. & Taydas, E.E. 1998. The effect of processing technology on the patulin content of juice during commercial apple juice concentrate production. *Zeitschrift fur Lebensmitteluntersuchung und Forschung A. Food Research and Technology* 207, pp. 328-331.
- Agnew, J.M. & Leonard, J.J. 2003. Physical properties of compost-Literature review. *Compost Science and Utilization* 11, pp. 238-264.
- Agüero, M.; Filippi, M.; Buglione, M.; Martínez, D. & Rodríguez, G. 2015. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* sobre orujo de pera: Evaluación de la composición química durante las fases de colonización del sustrato y fructificación. 38º Congreso Argentino de Horticultura ASAHO. Bahía Blanca, Argentina. *Horticultura Argentina* 34, pp. 85.
- Akbay, H.E.G.; Akarsu, C. & Kumbur, H. 2018. Treatment of fruit juice concentrate wastewater by electrocoagulation: Optimization of COD removal. *International Advanced Researches and Engineering Journal* 01, pp. 53-57.
- Alasino, N. 2009. Síntesis y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Albanesi, A.; Anriquez, A.; Garay, F.; Mondino, M.; Sanchez de Pinto, M.I. & Polo, A. 2012. Efectos del compost y lombricompost de residuos domiciliarios y de matadero en el suelo y la productividad y calidad del algodón. En: *Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. Eds.: Mazzarino, M.J. & Satti P. Editorial UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 209-220.
- Almasi, A. & Pescod, M.H. 1996. Pathogen removal mechanisms in anoxic wastewater stabilization ponds. *Water Science Technology* 33, pp. 133-140.

- Al-Momany, A. & Ananbeh, K. 2011. Conversion of agricultural wastes into value added product with high protein content by growing *Pleurotus ostreatus*. En: Survival and Sustainability, Environmental Earth Sciences. Eds.: Gökçekus H et al. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 1483-1490.
- Amir, S.; Hafidi, M.; Merlina, G. & Revel, J.C. 2005. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere* 59, pp. 801-810.
- Amor, C.; Lucas, M.S.; Pirra, A.J. & Peres, J.A. 2012. Treatment of concentrated fruit juice wastewater by the combination of biological and chemical processes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 47, pp. 1809-1817.
- Angel, A.N. & Vázquez, R. 2014. Manejo del monte frutal. Área Metropolitana de Buenos Aires, Moreno, E.E.A. San Pedro. Recuperado de: <https://inta.gob.ar/noticias/manejo-del-monte-frutal>.
- APHA. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 20th Edition. Washington, Estados Unidos.
- Aramberri, V. 2018. Análisis ambiental de los residuos de las industrias jugueras. El caso del alto Valle de Río Negro y Neuquén, Argentina. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Quilmes. Bernal, Argentina.
- Arrieché, I. & Mora, O. 2005. Efecto de la aplicación de residuos orgánicos sobre el cultivo de maíz en suelos degradados del estado de Yaraguy, Venezuela. *Bioagro* 17, pp. 155-159.
- Artan, N. & Orhon, D. 2005. Mechanism and design of sequencing batch reactors for nutrient removal. Scientific and Technical Report N° 19. IWA Publishing (UK). pp. 116.
- Aruani, C. & Behmer, S. 2004. Efecto de la granulometría y la compactación del suelo sobre la distribución de raíces en manzano. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 33, pp. 43-54.
- Avellá, B.; Landriscini, S.G. & Preiss, O. 2018. Complejo frutícola de Río Negro y Neuquén. Exportaciones, principales competidores y factores que condicionan la competitividad. *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios* N° 48. pp. 34.

Aziz, A.; Basheer, F.; Sengar, A.; Saif, I.; Khanlzhari, U. & Farooqi, H. 2019. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of The Total Environment* 686, pp. 681-708.

B

Baldi, E.; Toselli, M.; Marcolini, G.; Quartieri, M.; Cirillo, E.; Innocenti, A. & Marangoni, B. 2010. Compost can successfully replace mineral fertilizers in the nutrient management of commercial peach orchard. *Soil Use and Management* 26, pp. 346-353.

Barber, R.G. & Navarro, F. 1994. The rehabilitation of degraded soils in Eastern Bolivia by subsoiling and the incorporation of cover crops. *Land Degradation and Rehabilitation* 5, pp. 247-259.

Basil, G.; Mazzarino, M.J.; Roselli, L. & Letourneau, F. 2009. Efecto del compost de biosólidos en la producción de plantines de *Austrocedrus chilensis* (Ciprés de la cordillera). *Ciencias del Suelo* 27, pp. 49-55.

Bautista Zúñiga, F.; Durán de Bazúa, M. & Lozano, R. 2000. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 16, pp. 89-101.

Becerra Bernal, A.; Rodríguez Muela, C.; Jiménez Castro, J.; Ruiz Barrera, O.; Elías Iglesias, A. & Ramírez Godínez, A. 2008. Urea y maíz en la fermentación aeróbica de bagazo de manzana para la producción de proteína microbiana. *Tecnociencia Chihuahua* 2, pp. 8.

Belal, E.B. & El-Mahrouk, M.E. 2010. Solid-state fermentation of rice straw residues for its use as growing medium in ornamental nurseries. *Acta Astronautica* 67, pp. 1081-1089.

Benefield, L.D. & Randall, C.W. 1980. *Biological design for wastewater treatment*. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, pp. 526.

Benitez, C.E. 2001. Cosecha y poscosecha de peras y manzanas en los valles irrigados de la Patagonia. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Regional Agropecuaria Alto Valle de Río Negro 634, pp. 128.

- Benitez, J. & Castellanos, A. 2003. Mejorando la humedad del suelo con agricultura de conservación. Usando todas las gotas de agua. *Revista de Agroecología* 19, pp. 5-6.
- Beran, B. & Kargi, F. 2004. A dynamic mathematical model for wastewater stabilization ponds. *Ecological Modelling* 181, pp. 39-57.
- Bernal, M.P.; Paredes, C.; Sánchez-Monedero, M.A. & Cegarra, J. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63, pp. 91-99.
- Bevilacqua, M. & Storti, M.L. 2011. Complejo frutícola: manzana y pera. Serie producción regional por complejos productivos. Ministerio de Economía y Finanzas Públicas, pp. 27
- Blancher, R.W.; Edmonds, C.R. & Bradford, J.M. 1978. Root growth in cores formed from fragipan and B2 horizons of Hobson soil. *Soil Science Society of America Journal* 42, pp. 437-440.
- Bongiovanni Ferreyra, M.G.; Orden, L. & Pérez Pizarro, J. 2015. Enmiendas orgánicas en la producción hortícola bajo cubierta. INTA E.E.A. Hilario Ascasubi. Recuperado de: <https://inta.gob.ar/documentos/enmiendas-organicas-en-la-produccion-horticola-bajo-cubierta>.
- Budaba, C. 2004. Muestreo de suelos: Criterios básicos. *Patagonia Forestal* 1, pp. 9-12.
- Buggeln, R. & Rynk, R. 2002. Self-Heating in yard trimmings: conditions leading to spontaneous combustion. *Compost Science and Utilization* 10, pp. 162-182.
- Bustamante, M.A.; Paredes, C.; Moral, R.; Agulló, E.; Pérez-Murcia, M.D. & Abad, M. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources, Conservation and Recycling* 52, pp. 792-799.

C

- CAFI. 2014. Cámara Argentina de Fruticultores Integrados. Recuperado de: <http://www.cafi.org.ar/produccion-de-peras-y-manzanas-en-argentina/>.
- Camila A.; Perussello, C.A.; Zhang, Z.; Marzocchella, A. & Tiwari, B.K. 2017. Valorization of apple pomace by extraction of valuable compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 16, pp. 776-796.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Castán, E.; Satti, P.; Gonzalez-Polo, M.; Iglesias, M.C. & Mazzarino, M.J. 2016. Managing the value of composts as organic amendments and fertilizers in sandy soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 224, pp. 29-38.
- Cayolo, F.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V.; Maldonado, J.F.; Cáceres, R.; Peña, S. & Martínez, D.A. 2019. Influencia de la dieta suplementada con bagazo de manzana sobre la calidad de la carne de *Gallus gallus*. *Argentina de Producción Animal* 39, pp. 95.
- Chiara, E.C. & Berjón, M.A. 2008. Aplicación del compost en viveros y semilleros. *Compostaje*. Mundi Prensa Libros SA. pp. 397-424.
- Clark, G.A.; Stanley, C.D. & Maynard, D.N. 2000. Municipal solid waste compost (MSWC) as a soil amendment in irrigated vegetable production. *Transactions of the ASAE* 43, pp. 847-853.
- Coile, T.S. 1936. Soil samplers. *Soil Science* 42, pp. 139-141.
- Commanday, F. & Macy, J.M. 1985. Effect of substrate nitrogen on lignin degradation by *Pleurotus ostreatus*. *Archives of Microbiology* 142, pp. 61-65.
- Conagua. 2015. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas de estabilización. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 48, pp. 82.
- Contardi, L.T. & Errasti, A. 2012. Evolución de la temperatura en pilas de compostaje de residuos agroforestales. VII Congreso de Medio Ambiente. La Plata, Argentina. pp. 16.
- Cooper, P.F. 2001. Historical aspects of wastewater treatment. En: *Decentralized sanitation and reuse: concepts, systems and implementation*. Eds.: P. Lens, G. Zeeman and G. Lettinga. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. pp. 11-38.
- Cooperband, L.R. & Middleton, J.H. 1996. Changes in chemical, physical and biological properties of passively-aerated cocomposted poultry litter and municipal solid waste compost. *Compost Science and Utilization* 4, pp. 24-34.
- Cooperband, L.R.; Stone, A.G.; Fryda, M.E. & Ravet, J.L. 2003. Relating compost measures of commercial maturity to plant growth. *Compost Science and Utilization* 11, 113-124.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Copetta, A.; Bardi, L. & Bertolone, E. 2011. Fruit production and quality of tomato plants (*Solanum lycopersicum L.*) are affected by green compost and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Biosystems* 145, pp. 106-115.

Costa, F.; García, C.; Hernández, T. & Polo, A. 1991. Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)-CEBAS. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Murcia, España. pp. 181.

Cruz, M.G.; Bastos, R.; Pinto, M.; Ferreira, J.M.; Santos, J.F.; Wessel, D.F.; Coelho, E. & Coimbra, M.A. 2018. Waste mitigation: From an effluent of apple juice concentrate industry to a valuable ingredient for food and feed applications. *Journal of Cleaner Production* 193, pp. 652-660.

Cruz, M.Z.; Zumarán, J.R.; Villalobos, H. & Sánchez, F.A. 2015. Evaluación de dos métodos de aireación para la biodegradación de residuos de lignocelulósicos en los cultivos de uva y espárrago. *Pueblo Continente* 26, pp. 419-425.

Cuevas Becerra, J. 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 2, pp. 13-27.

Cunha, C.L.; Rosman, P.C.; Ferreira, A.P. & Nascimento Monteiro, T.C. 2006. Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research* 26, pp. 1940-1953.

D

De Bertoldi, M.; Ferranti, M.P.; L'Hermite, P. & Zucconi, F. 1987. Compost: production, quality and use. Elsevier Applied Science. Londres, Inglaterra. pp. 870.

De Bustos, M.E. 2013. Muestro de suelos. Estación Experimental Agropecuaria Catamarca. Recuperado de: <https://inta.gob.ar/documentos/muestreo-de-suelos-0>.

Del Valle, M.; Cámara, M. & Torija, M.E. 2006. Chemical characterization of tomato pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, pp. 1232-1236.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Demin, P.E. 2014. Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. 1° Edición, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca. Ediciones INTA. pp. 24

Diario Chile Alimentos. 2019. Argentina: grave crisis que atraviesa la industria del jugo en Río Negro. Recuperado de: <https://chilealimentos.com/argentina-grave-crisis-que-atraviesa-la-industria-del-jugo-en-rio-negro/>.

Diario InfoAgro. 2019. La industria del jugo en Argentina en caída libre. Recuperado de: <https://infoagro.com.ar/la-industria-del-jugo-en-argentina-en-caida-libre/>.

Diario Río Negro. 2001. Controlarán los desagües de juguereas y sidreras. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/controlaran-los-desagues-de-jugueras-y-sidreras-OAHRN0101041904701/>.

Diario Río Negro. 2017. La industria de concentrado enfrenta una crisis terminal. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/pulso/la-industria-de-concentrado-enfrenta-una-crisis-terminal-AY3001103>.

Diario Río Negro. 2018. Las peras y las manzanas pierden unas 100 hectáreas por año. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/region/las-peras-y-manzanas-pierden-unas-100-hectareas-por-ano-JA5714380>.

Diario Río Negro. 2019. Crisis frutícola: cerraron doce industrias juguereas en los últimos años. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/crisis-fruticola-cerraron-doce-industrias-jugueras-en-los-ultimos-anos-1103711/>.

Di Maggio, J.; Fernández, C.; Parodi, E.R.; Diaz, M.S. & Estrada, V. 2016. Modeling phytoplankton community in reservoirs. A comparison between taxonomic and functional groups-based models. *Journal of Environmental Management* 165, pp. 31-52.

Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; González, L.; Tablada, M. & Robledo, C.W. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de: <https://www.infostat.com.ar/>.

Dochain, D.; Gregoire, S.; Pauss, A. & Schaeffer, M. 2003. Dynamic modelling of a waste stabilization pond. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 26, pp. 19-26.

E

- Eckenfelder, W.W. 2001. Industrial water pollution control. McGraw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw Hill. Boston, Estados Unidos. pp. 600.
- Elsayed, M.T.; Babiker, H.M.; Abdelmalik, E.M.; Montage, N.O. & Mukhtar, D. 2007. Impact of filter mud applications on the germination of sugarcane and small-seeded plants and on soil and sugarcane nitrogen contents. *Bioresource Technology* 99, pp. 4164-4168.
- Escala, A. 2011. La gestión de recursos hídricos frente al cambio climático en la zona del Alto Valle de Río Negro. Tesis de maestría en Gestión Ambiental.
- Estrada, V.; Parodi, E.R. & Diaz, M.S. 2008. A simultaneous dynamic optimization approach for addressing the control problem of algae growth in water reservoirs through biogeochemical models. *Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations*. pp. 169-172.
- Estrada, V. & Diaz, M.S. 2010. Global sensitivity analysis and dynamic parameter estimation in eutrophication models. *Environmental Modelling and Software* 25, pp. 1539-1551.
- Estrada, V.; Parodi, E.R. & Diaz, M.S. 2009. Addressing the control problem of algae growth in water reservoirs with advanced dynamic optimization approaches. *Computers and Chemical Engineering* 33, pp. 2063-2074.
- Ewing, T.; Babauta, J.T.; Atci, E.; Tang, N.; Orellana, J.; Heo, D. & Beyenal, H. 2014. Self-powered wastewater treatment for the enhanced operation of a facultative lagoon. *Journal of Power Sources* 269, pp. 284-292.
- Eyras, M.C. & Rostagno, C.M. 1995. Bioconversión de algas marinas de arribazón. Experiencias en Puerto Madryn, Chubut, Argentina. *Naturalia Patagónica Serie Ciencias Biológicas* 3, pp. 25-39.
- Eyras, M.C. & Rostagno, C.M. 2012. Compostaje de algas marinas: experiencias y perspectivas. En: *Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. Eds.: Mazzarino, M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 141-159.

F

Fan, R.; Luo, J.; Yan, S.; Wang, T.; Liu, L.; Gao, Y. & Zhang, Z. 2015. Use of water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) compost as a peat substitute in soilless growth media. *Compost Science and Utilization* 23, pp. 237-247.

Fernández Mayer, C.A. 2014. Transformación de subproductos y residuos de agroindustria de cultivos templados, subtropicales y tropicales en carne y leche bovina. *Boletín Técnico* 20, pp. 192.

Ferraro, R. 2007. La intervención sobre el medio ambiente. Módulo 2 del VI Curso Internacional de Posgrado "Evaluación de Impacto Ambiental" (intensivo a distancia), Programa "Ambiente, Economía y Sociedad".

Fiasconaro, M.L.; Lovato, M.E.; Gervasio, S.; Antolín, M.C. & Martín, C. 2017. Efecto de residuos compostados de industria láctea utilizados como sustrato en plántulas de pimiento. *Asociación Argentina de Horticultura* 36, pp. 50-61.

Filippi, M.V.; Martínez, D.A.; Buglione, M.B.; Reynoso, L.C.; Rodríguez, G.E. & Agüero, M.S. 2015. Bioconversión de orujo de pera y manzana por *Pleurotus ostreatus*. 3º Simposio Argentino de Procesos Biotecnológicos SProBio 2014. Santa Fe, Argentina.

Fonteno, W. 1999. Sustratos: Tipos y propiedades físicas y químicas. En: Agua, sustratos y nutrición en los cultivos de flores bajo invernadero. Eds.: Reed D.W. Ball Publishing E. Unidos y Hortitecna Ltda. Colombia. pp. 93-124.

Froni, L. 1999. Procesos Microbianos Tomo II. Editorial de la fundación Universidad Nacional de Río Cuarto. pp. 286.

G

Gallardo-Lara, F. & Nogales, R. 1987. Effect of the application of town refuse compost on the soil-plant system: a review. *Biological Wastes* 19, pp. 35-62.

García, C.; Hernández, T. & Costa, F. 1991. Study on water extract of sewage sludge composts. *Soil Science and Plant Nutrition* 37, pp. 399-408.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- García-Gil, J.C. 2001. Efectos residuales y acumulativos producidos por la aplicación de compost de residuos urbanos y lodos de depuradoras sobre agrosistemas mediterráneos degradados. Tesis doctoral en Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
- García-Ruesta, C. 2008. Evaluación, optimización y rediseño de las lagunas de estabilización El Cucho, Sullana. Tesis de maestría. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Gavilanes-Terán, I.; Jara-Samaniego, J.; Idrovo-Novillo, J.; Bustamante, M.A.; Pérez-Murcia, M.D.; Pérez-Espinosa, A. & Paredes, C. 2017. Agroindustrial compost as a peat alternative in the horticultural industry of Ecuador. *Journal of Environmental Management* 186, pp. 79-87.
- Gehring, T.; Dias da Silva, J.; Kehl, O.; Castilhos Junior, A.B.; Costa, R.; Uhlenhut, F.; Alex, J.; Horn, H. & Wichern, M. 2010. Modeling waste stabilization ponds with an extended version of ASM3. *Water Science and Technology* 61, pp. 713-720.
- Gergoff Grozeff, G.E. 2006. Índices que determinan el estado de madurez de los frutos. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Cátedra de Fruticultura. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Recuperado de: <https://docplayer.es/95369049-Indices-de-cosecha-indices-que-determinan-el-estado-de-madurez-de-los-frutos.html>.
- Ghinea, C.; Apostol, L.C.; Prisacaru, A.E. & Leahu, A. 2019. Development of a model for food waste composting. *Environmental Science and Pollution Research* 26, pp. 4056-4069.
- Gómez-Brandón, M.; Lazcano, C. & Domínguez, J. 2008. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* 70, pp. 436-444.
- Gómez Rosales, S.; Ángeles, M.L.; Núñez Hernández, G. & Figueroa Viramontes, U. 2013. Guía de buenas prácticas de manejo de excretas: Metodologías para la elaboración de compostas y lombricompostas de excretas de ganado de leche. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias* 20, pp. 52.
- Gouxue, L.; Zhang, F.; Sun, Y.; Wong, J.W.C. & Fang, M. 2001. Chemical evaluation of sewage sludge composting as a mature indicator for composting process. *Water Air Soil Pollut* 132, pp. 333-345.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Grady, C.P.L.; Daigger, G.T.; Love, N.G. & Filipe, C.D.M. 2011. Biological wastewater treatment. Londres, Reino Unido. CRC Press, pp. 1022.

Gray, K.R.; Sherman, K. & Biddlestone, A.J. 1971. Review of composting II. The practical process. *Process Biochemistry* 6, pp. 22-28.

H

Hank, A. & Hrebeckova, T. 2023. Compostability and vermicompostability of greaseproof wrapping paper. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 32, pp. 101014.

Hamilton, D.P. & Schladow, S.G. 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part I-Model description. *Ecological Modelling* 96, pp. 91-110.

Haug, R.T. 1993. The practical handbook of compost engineering. CRC Press, pp. 752.

Hecky, R.E. & Kilham, P. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology & Oceanography* 33, pp. 796-822.

Hernández de la Cruz, O.B.; Sánchez Hernández, R.; Ordaz Chaparro, V.M.; López Noverola, U.; Estrada Botello, M.A. & Pérez Méndez, M.A. 2017. Uso de compostas para mejorar la fertilidad de un suelo Luvisol de ladera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8, 1273-1285.

Hernando, S.; Lobo, M.C. & Polo, A. 1989. Effect of the application of municipal refuse compost on the physical and chemical properties of a soil. *Science of the Total Environment* 81-82, pp. 589-596.

Herrera, F.; Castillo, J.E.; Chica, A.F. & Bellido, L.L. 2008. Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Bioresource Technology* 99, pp. 287-296.

Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology* 15, pp. 75-83.

Hesketh, N. & Brookes, P.C. 2000. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality* 29, pp. 105-110.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Hillebrand, H.; Dürselen, C.D.; Kirschtel, D.; Pollinger, U. & Zohary, T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* 35, pp. 403-424.

Ho, L.; Van Echelpoel, W.; Charalambous, P.; Gordillo, A.P.; Thas, O. & Goethals, P. 2018. Statistically-based comparison of the removal efficiencies and resilience capacities between conventional and natural wastewater treatment systems: A Peak Load Scenario. *Water* 10, pp. 328-343.

Hochmaier, V.E. 2010. Desarrollo y evaluación de métodos prácticos no destructivos para la estimación del área foliar (AF) por árbol y cálculo del índice de área foliar (IAF) en montes de cerezo (*Prunus avium* L.). Tesis de magister. Università degli Studi di Bologna, Universidad Nacional del Comahue, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. General Roca, Argentina.

Holzmann, R. 2010. Desarrollo y evaluación de un índice de calidad de suelo en montes de pera manejados bajo dos sistemas de producción, convencional y orgánico, en el Alto Valle de Rio Negro. Tesis de magister. Università degli Studi di Bologna, Universidad Nacional del Comahue, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. General Roca, Argentina.

Howard, R.L.; Abotsi, E.; Jansen van Rensburg, E.L. & Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: Issues of bioconversión and enzyme production (Review). *African Journal of Biotechnology* 2, pp. 602-619.

Hudson, B.D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation* 49, pp. 189-194.

I

Iannotti, D.A.; Grebus, M.E.; Coth, B.L.; Madden, L.V. & Hoitink, H.A.J. 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 23, 1177-1183.

Íñiguez, G.; Martínez, G.A.; Flores, P.A. & Virgen, G. 2011. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 9. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de agave para la obtención de un substrato para jitomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 27, pp. 47-59.

Íñiguez, G.; Parra, J. & Velasco, P.A. 2006. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 22, pp. 83-93.

iQonsulting. 2019. Fruticultura orgánica, una alternativa de impacto para el sector exportador nacional. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado de: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/estudio_organicos185_277.pdf.

IRAM. 2011. Norma IRAM 29556-1. Compostaje aeróbico. Parte 1: Conceptos básicos, factibilidad del tratamiento y buenas prácticas del proceso de compostaje de residuos verdes. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/read/40317233/esquema-2-de-norma-iram-29556-1>.

Iturmendi, F.; Estrada, V., Ochoa, P.; Hoch, P.M. & Diaz, M.S. 2012. Biological wastewater treatment: Dynamic global sensitivity analysis and parameter estimation in a system of waste stabilization ponds. *ESCAPE 22, 22th European Symposium on Computer Aided Engineering*. Londres, Reino Unido.

J

Jara Olea, W. 2019. Efecto de la aplicación de compost sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y el rendimiento de caña y azúcar en el ingenio Valdez, cantón Milagro, provincia del Guayas. Compañía Azucarera Valdéz, Ecuador. Recuperado de: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/efecto-aplicacion-compost-sobre-t43339.htm>.

Jayasinghe, G.Y.; Tokashiki, Y.; Arachchi, I.L. & Arakaki, M. 2010. Sewage sludge sugarcane trash based compost and synthetic aggregates as peat substitutes in containerized media for crop production. *Journal of Hazardous Materials* 174, pp. 700-706.

Jiang, J.; Huang, Y.; Liu, X. & Huang, H. 2014. The effects of apple pomace, bentonite and calcium superphosphate on swine manure aerobic composting. *Waste Management*, 34, pp. 1595-1602.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Julca, O.A.; Meneses, F.L.; Bello, S.R. & Blas A.S. 2006. La materia orgánica, usos y experiencias de su uso en la agricultura. *Revista Científica de Suelo y Nutrición Vegetal* 24, pp. 49-61.

K

Kabisch, H. 2011. Guía práctica para los preparados biodinámicos. Publicación preparada para la Asociación de Agricultura Biodinámica de España. Recuperado de: https://aabda.com.ar/wpcontent/uploads/Guia_practica_para_la_elaboracion_de_los_Preparados.pdf.

Kadlec, R.H. & Knight, R.L. 1996. *Treatment wetlands*. CRC Press, pp. 893.

Kadlec, R.H.; Knight, R.L.; Vymazal, J.; Brix, H.; Cooper, P. & Haberl, R. 2000. *Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation*. IWA Scientific and Technical Report N° 8. IWA Publishing, pp. 171.

Kayombo, S.; Mbwette, T.S.A.; Mayo, A.W.; Katima, J. & Jorgensen, S.E. 2000. Modeling diurnal variation of dissolved oxygen in waste stabilization ponds. *Ecological Modelling* 127, pp. 21-31.

Keller, T. & Håkansson, I. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* 154, pp. 398-406.

Kennedy, M.; List, D.; Lu, Y.; Foo, L.Y.; Newman, R.H.; Sims, I.M.; Bain, P.J.S.; Hamilton, B. & Fenton, G. 1999. Apple pomace and products derived from apple pomace: Uses, composition and analysis. *Modern Methods of Plant Analysis* 20, pp. 75-119.

Knobelsdorf, J. 2005. Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP. Tesis doctoral. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Kopčić, N.; Vuković Domanovac, M.; Kučić, D. & Briški, F. 2014. Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste. *Waste Management* 34, pp. 323-328.

Kowaljow, E. & Mazzarino, M.J. 2012. Restauración de ecosistemas naturales. Estudio de caso en la estepa patagónica con compost de biosólidos y residuos orgánicos urbanos. En:

Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 243-256.

Kowaljow, E. & Mazzarino, M.J. 2007. Soil restoration in semiarid Patagonia: chemical and biological response to different compost quality. *Soil Biology and Biochemistry* 39, pp. 1580-1588.

Kulcu, R. & Yaldiz, O. 2004. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresource Technology* 93, pp. 49-57.

L

Labrador, J. 2008. Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. Sociedad Española de Agricultura Ecológica. Recuperado de: <https://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2019/01/manual-suelos-jlabrador.pdf>.

Laos, F. 2013. Tratamiento de residuos orgánicos: su mejor destino. III Jornadas Nacionales de GIRSU. Rawson, Argentina. Recuperado de: <http://www.inti.gov.ar/jornadasgirsu2013/pdf/presentacionesDisertantes/2921.pdf>.

Laos, F.; Mazzarino, M.J. & Satti, P. 2012a. Aspectos legales del uso de residuos orgánicos. En: *Compostaje en Argentina: experiencias de producción, calidad y uso*. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 55-66.

Laos, F.; Mazzarino, M.J.; Roselli, L. & Satti, P. 2012b. Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. En: *Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 257-269.

Laos, F.; Mazzarino, M.J.; Walter, I.; Roselli, L.; Satti, P. & Moyano S. 2002. Composting of fish offal and biosolids in northwestern Patagonia. *Bioresource Technology* 81, pp. 179-186.

Lavado, R. 2012. Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso. En: *Compostaje en Argentina: experiencias de producción, calidad y uso*. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 3-12.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Lazcano, C.; Arnold, J.; Tato, A.; Zaller, J.G. & Domínguez, J. 2009. Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology. Spanish Journal of Agricultural Research 7, pp. 944-951.
- Leconte, M.C. 2010. Efecto del agregado de estiércol de gallina en el compostaje de aserrín y cascarilla de arroz. Tesis doctoral. CRUB-UNC. Bariloche, Argentina.
- Leconte, M.C.; Mazzarino, M.J.; Satti, P.; Iglesias, M.C. & Laos, F. 2009. Co-composting rice hulls and/or sawdust with poultry manure in NE Argentina. Waste Management 29, pp. 2446-2453.
- Lee, T.T.; Wang, F.Y. & Newell, R.B. 1999. Dynamic modelling and simulation of activated sludge process using orthogonal collocation approach. Water Research 33, pp. 73-86.
- Levanon, D. & Pluda, D. 2002. Chemical, physical and biological criteria for maturity in composts for organic farming. Compost Science and Utilization 4, pp. 339-346.
- Li, J.; Mavrodi, D.V. & Dong, Y. 2020. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. Archives of Agronomy and Soil Science 67, pp. 1313-1326.
- Libro Blanco de la Fruticultura. 2018. Gobierno de Río Negro, Decreto N° 2032.
- Libro Tercero del Código de Aguas. 1995. Gobierno de Río Negro, Ley N° 2.952.
- Liran, A.; Juanico, M. & Shelef, G. 1994. Coliform removal in a stabilization reservoir for wastewater irrigation in Israel. Water Research 28, pp. 1305-1314.
- López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile. Boletín INIA 340, pp. 157.
- Luna Fontalvo, J.A.; Córdoba López, L.S.; Gil Pertuz, K.I. & Romero Borja, I.M. 2013. Efecto de residuos agroforestales parcialmente biodegradados por *Pleurotus ostreatus* (Pleurotaceae) sobre el desarrollo de plántulas de tomate. Acta Biológica Colombiana 18, pp. 365-374.

M

- Maldonado, J.F.; Agüero, M.S., Iturmendi, F.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V. & Martínez, D.A. 2018. Efecto de enmienda con compost de orujo de pera sobre la producción de forraje de *Setaria italica* (L.) P. Beauv. SEMIÁRIDA, Revista de la Facultad de Agronomía, UNLPam 28, pp. 45-50.
- Mancillas Flores, P.F.; Rodríguez Muela, C.; Díaz Plascencia, D.; Arzola Alvarez, C.A.; Grado Ahuir, J.A.; Corral Flores, G. & Castillo Castillo, Y. 2013. Digestibilidad in vitro de dietas para becerros en crecimiento adicionadas con inóculo de levaduras y bagazo de manzana fermentado. Revista Bio Ciencias 2, pp. 189-199.
- Mancini, J.L. & Barnhart, E.L. 1976. Industrial waste treatment in aerated lagoon. In Ponds as a Wastewater Treatment Alternative, Water Resources Symposium No. 9, University of Texas. Texas, Estados Unidos.
- Manga, J.G.; Molinares Nelson, R.; Orlando Soto, E.; Arrieta, J.; Escaf Germa, J. & Hernández Gustavo, A., 2004. Influence of inlet-outlet structures on the flow pattern of a waste stabilization pond. En: Proceedings 6th International Conference of Waste Stabilization Ponds. Avignon, Francia.
- Mao, H.; Zhang, T.; Li, R.; Zhai, B.; Wang, Z.; Quan, W. & Zhang, Z. 2017. Apple pomace improves the quality of pig manure aerobic compost by reducing emissions of NH₃ and N₂O. Scientific Reports 7, pp. 870.
- Martínez-Cordeiro, H.; Álvarez-Casas, M.; Lores, M. & Domínguez, J. 2013. Vermicompostaje del bagazo de uva: fuente de enmienda orgánica de alta calidad agrícola y de polifenoles bioactivos. Recursos Rurais 9, pp. 55-63.
- Martínez, D.A.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V; Reynoso, L.C.; Rodríguez, G.E. & Agüero, M.S. 2013. Evaluación del crecimiento micelial de *Pleurotus ostreatus* sobre dos tipos de orujo de pera. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 48, pp. 216-217.
- Martínez, D.A.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V; Reynoso, L.C.; Rodríguez, G.E. & Agüero, M.S. 2015. Evaluación del crecimiento micelial de *Pleurotus ostreatus* y *Agrocybe aegerita* sobre orujos de pera. Anales de Biología 37, pp. 1-10.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Martínez, D.A.; Maldonado, J.F.; Filippi, M.V.; Buglione, M.V.; Iturmendi, F.; Rodríguez, G.E. & Agüero, M.S. 2017. Efecto de enmienda por compost de orujo de manzana sobre el desarrollo de plantines de lechuga. IV Simposio Argentino de Procesos Biotecnológicos. 1a Ed. Bernal, Universidad Nacional de Quilmes. Buenos Aires, Argentina. pp. 248-249.
- Martínez Gutiérrez, G.A.; Íñiguez Covarrubias, G.; Ortiz-Hernández, Y.D.; López-Cruz, J.Y. & Bautista Cruz, M.A. 2013. Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 29, pp. 209-216.
- Marueco, A.H. 2011. Estudio de las condiciones de autoignición en pilas de materiales sólidos de riego. Proyecto fin de carrera. Departamento de matemática aplicada y métodos informáticos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Mashauri, D.A. & Kayombo, S. 2002. Application of the two coupled models for water quality management: facultative pond cum constructed wetland models. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 27, pp. 773-781.
- Matheus, J. 2004. Evaluación agronómica del uso de compost de residuos de la industria azucarera (biofertilizante) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Bioagro 16, pp. 219-224.
- Maynard, A.A. 1995. Cumulative effect of annual additions of MSW compost on the yield of field-grown tomatoes. Compost Science & Utilization 3, pp. 47-54.
- Mayo, A.W. 1989. Effect of pond depth on bacterial mortality rate. Journal of Environmental Engineering ASCE 115, pp. 964-977.
- Mazzarino, M.J.; Laos, F.; Satti, P. & Moyano, S. 1998. Agronomic and environmental aspects of utilization of organic residues in soil of the Andean-Patagonian Region. Soil Science and Plant Nutrition 44, pp. 105-113.
- Mazzarino, M.J.; Satti, P. & Kowaljow, E. 2008. Enmiendas orgánicas y fósforo disponible: entre la deficiencia y el riesgo de contaminación. XXIII Reunión Argentina de Ecología. San Luis, Argentina.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Mazzarino, M.J.; Satti, P. & Roselli, L. 2012. Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost. En: Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 13-28.
- Mendía, J.M. & Irisarri, J. 1995. Las condiciones físicas del suelo asociadas al drenaje en el monte frutal. Curso internacional de suelo, riego y nutrición. General Roca, Argentina. Estación Experimental. pp. 4-40.
- Metcalf & Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. Boston, Estados Unidos. pp. 1485.
- Middlebrooks, E.J.; Middlebrooks, C.H.; Reynolds, J.H.; Watters, G.Z.; Reed, S.C. & George, D.B. 1982. Wastewater stabilization lagoon design, performance and upgrading. McMillan Publishing. New York, Estados Unidos. pp. 356.
- Middlebrooks, E.J.; Reed, S.C.; Pano, A. & Adams, V.D. 1999. Nitrogen removal in wastewater stabilization lagoons. 6th National Drinking Water and Wastewater Treatment. Technology Transfer Workshop. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/238695616_Nitrogen_Removal_in_Wastewater_Stabilization_Lagoons.
- Mirabal, A. 2009. Fertilización de origen biológico. Centro de información y documentación agropecuaria. CIDA, pp. 43.
- Monreal, C.M.; Dinel, H.; Schnitzer, M.; Gamble, D.S. & Biederbeck, V.O. 1998. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture. En: Soil Processes and the Carbon Cycle. Eds.: Lal R., Kimble J.M., Follett R.A. y Stewart B.A. CRC Press, pp. 435-457.
- Moran, R.E. & Schupp, J.R. 2002. Apple-pomace compost and pre-plant monoammonium phosphate for improving the growth of newly planted apple trees. Fruit Notes 67, pp. 4.
- Morelli, G. 2017. Estructura del árbol frutal. Curso de Fruticultura 2017. Recuperado de: <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/321/course/section/261/Presentaci%C3%B3n%20fruti%20%20clase%201%202017%20%5BModo%20de%20compatibilidad%5D.pdf>.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Moreno Álvarez, J.M. 2002. La materia orgánica y la capacidad de retención de humedad en sustratos. Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical. Agricultura Orgánica 1, pp. 23-25.
- Moreno-Grau, S.; García-Sánchez, A; Moreno-Clavel, J.; Serrano-Aniorte, J. & Moreno-Grau, M.D. 1996. A mathematical model for waste water stabilization ponds with macrophytes and microphytes. Ecological Modelling 91, pp. 77-103.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D. & Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. American Society of Agricultural and Biological Engineers 50, pp. 885-900.
- Muñoz Villalobos, J.A.; Velásquez Valle, M.A.; Osuna Ceja, E.S. & Rodríguez, H.M. 2013. El uso de abonos orgánicos en la producción de hortalizas bajo condiciones de invernadero. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. Recuperado de: <https://www.chapingo.mx/revistas/>.

N

- Namiot, G.; Basil, G.; De Errasti, M.D.; Contardi, L. & Rovere, A.E. 2012. Producción de plantines de arbóreas nativas. Experiencias con ciprés de la cordillera. En: Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 195-207.
- Navarro, A.F.; Cegarra, J.; Roig, A. & Bernal, P. 1990. Análisis de residuos urbanos agrícolas, ganaderos y forestales: relación materia orgánica-carbono orgánico. III Congreso Internacional de Química de la ANQUE. Residuos sólidos y líquidos: su mejor destino, Fondo Editorial ANQUE. Madrid, España. pp. 447-456.
- Nawirska, A. & Kwaśniewska, M. 2005. Dietary fibre fractions from fruit and vegetable processing waste. Food Chemistry 91, pp. 221-225.
- Nayak, A.K.; Varma, V.S. & Kalamdhad, A.S. 2013. Effects of various C/N ratios during vermicomposting of sewage sludge using *Eisenia fetida*. Journal of Environmental Science Technology 6, pp. 63-78.
- Nelson, M.I.; Balakrishnan, E. & Chen, X.D. 2003. A Semenov model of self-heating in compost piles. Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B 81, pp. 375-383.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Nogales, R.; Elvira, C.; Benítez, E. & Gómez, M. 1996. Uso agrícola de compost y vermicompost de basuras urbanas (III): Capacidad de cesión de nutrientes al suelo y la planta. *Residuos* 29, pp. 54-60.

Nogales, R.; Ortega, E. & Gallardo-Lara, F. 1986. Effect of town refuse compost and nitrogen supplemented with different mineral fertilizers on the porosity of a spanish topsoil. *International Agrophysics* 2, pp. 335-339.

Novozymes. 2011. Use of enzymes in fruit juice production: Latest Developments. Recuperado de: <https://www.novozymes.com/es/news/news-archive/2008/12/45179>.

O

Orden, L. 2016. Desarrollan sensor que optimiza la producción de compost. INTA informa. Recuperado de: <https://intainforma.inta.gob.ar/desarrollan-sensor-para-optimizar-la-produccion-de-compost/>.

Orden, L. 2018. Evaluación del proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos. Respuesta agronómica de su utilización en un cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.). Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

Ordóñez, R.; González P.; Giráldez, J.V. & García-Ortiz, A. 1999. Efecto de la enmienda con alperujo sobre los principales nutrientes de un suelo agrícola. En: Estudios de la zona no saturada. Eds.: Muñoz-Carpena R.; Ritter, A.; Tascón, C. pp. 123-126.

Ozbas, E.E.; Tufekci, N.; Yilmaz, G. & Ovez, S. 2006. Aerobic and anaerobic treatment of fruit juice industry effluents. *Journal of Scientific and Industrial Research* 65, pp. 830-837.

P

Pan, J.; Cai, H.; Zhang, Z.; Liu, H.; Li, R.; Mao, H.; Kumar Awasthi, M.; Wang, Q. & Zhai, L. 2018. Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction. *Bioresource Technology* 270, pp. 467-475.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Pane, C.; Celano, G.; Piccolo, A.; Villecco, D.; Spaccini, R.; Palese, A.M. & Zaccardelli, M. 2015. Effects of on-farm composted tomato residues on soil biological activity and yields in a tomato cropping system. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 2, pp. 1-13.

Pascual, J.A.; Ayuso, M.; García, C. & Hernández, T. 1997. Characterization of urban wastes according to fertility and phytotoxicity parameters. *Waste Management and Research* 15, pp. 103-112.

Pérez, J.; Muñoz-Dorado, J.; De la Rubia, T. & Martínez, J. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology* 5, pp. 53-63.

Perspectivas de la Población Mundial 2019. 2019. Aspectos Destacados, División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. Recuperado de: https://www.clarin.com/mundo/onu-calcula-2050-poblacion-mundial-rozara-10-000-millones-personas_0__dNe9Y95l.html.

Portal Videla, L.S. 2013. Simulación de procesos de autocalentamiento y autoignición en materiales porosos apilados: virutas de madera y biorremediación de suelos contaminados. Tesis de grado. Universidad Arturo Prat. Iquique, Chile.

Porter, J.; Arzberger, P.; Braun, H.; Bryant, P.; Gage, S.; Hansen, T.; Hanson, P.; Lin, C.; Lin, F.; Kratz, T.; Michener, W.; Shapiro, S. & Williams, T. 2005. Wireless sensor networks for ecology. *Bio Science* 55, pp. 561-572.

Power, M. 1993. The predictive validation of ecological and environmental models. *Ecological Modelling* 68, pp. 33-50.

Process Systems Enterprise. 2009. gPROMS, www.psenderprise.com/gproms, 1997-2009.

PSEnterprise. 2009. gPROMS User guide.

Q

Quiroz Guerrero, I. & Pérez Vázquez, A. 2013. Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5, pp. 1069-1075.

R

Ravera, C.; Bettera, C.; Fernández, M.A.; Estive, E. & Piñeda, H. 2008. Aprovechamiento de los residuos agrícolas. Procesamiento de la caja del maní, su conversión biológica y productos. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón, España. Recuperado de: <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A22.pdf>.

Resolución Conjunta SECCYMA-SENASA. 2019. Marco normativo para la producción, registro y aplicación de compost. Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental de la Nación Argentina. Recuperado de: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/315000-319999/318692/norma.htm>.

Röben, E. 2002. Manual de compostaje para municipios. Recuperado de: <http://www.resol.com.br/Cartilha7/ManualCompostajeparaMunicipios.pdf>.

Robles Mitma, M.B. 2015. Evaluación de parámetros de temperatura, pH y humedad para el proceso de compostaje en la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado. Práctica Pre Profesional. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. Recuperado de: https://web2.unas.edu.pe/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/EVALUACION%20DE%20PAR%20METROS%20DE%20TEMPERATURA%20PH%20Y%20HUMEDAD%20PARA%20EL%20PROCESO%20DE%20COMPOSTAJE%20EN%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS%20ORGANICOS%20DE%20LA%20MUNICIPALIDAD%20PROVINCIAL%20DE%20LEONCIO%20PRADO.pdf.

Rocha Parra, A.F.; Belorio, M.; Ribotta, P.D.; Ferrero, C. & Gómez, M. 2018. Effect of the particle size of pear pomace on the quality of enriched layer and sponge cakes. *International Journal of Food Science and Technology* 54, pp. 1265-1275.

Rocha Parra, A.F.; Sahagún, M.; Ribotta, P.D.; Ferrero, C. & Gómez, M. 2019. Particle size and hydration properties of dried apple pomace: effect on dough viscoelasticity and quality of sugar-snap cookies. *Food and Bioprocess Technology* 12, pp. 1083-1092.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Rode, M.; Suhr, U. & Wriedt, G. 2007. Multi-objective calibration of a river water quality model- Information content of calibration data. *Ecological Modelling* 204, pp. 129-142.
- Rodríguez, A. 2019. El cambio climático y su incidencia en la producción. Recuperado de: <https://www.rionegro.com.ar/el-cambio-climatico-y-su-incidencia-en-la-produccion-917282/>.
- Rodríguez, G.E.; Martínez, D.A.; Buglione, M.B.; Filippi, M.V. & Agüero, M.S. 2018. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kummer sobre orujo de pera: Evaluación de la productividad y composición química del sustrato biodegradado. *Anales de Biología* 40, pp. 21-30.
- Rodríguez, G.E. 2014. Valorización de residuos agroindustriales por microfermentación en estado sólido desde la perspectiva de la producción comercial de hongos: un caso una reflexión. *Actualidades Biológicas* 36, pp. 144-145.
- Rodríguez, I.; Pérez Iglesias, H. & Olea, W.J. 2017. Efecto del compost en el rendimiento agrícola de caña de azúcar en el Ingenio Valdez. Universidad Técnica de Machala. Machala, Ecuador. *Revista CUMBRES* 3, pp. 119-126.
- Rodríguez Guerra, Y.; Alemán Pérez, R.D.; Domínguez Brito, J.; Soria Re, S.; Hernández Ramos, H.; Salazar Gaibor, C. & Jara Arguello, M.R. 2016. Efecto de dos abonos orgánicos (compost y biol) sobre el desarrollo morfológico de *Beta vulgaris* L. var. cicla bajo condiciones de invernadero. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 5, pp. 104-117.
- Rodríguez Mendoza, M.N; Alcántar González, G.; Aguilar Santelises, A.; Etchevers Barra, G.D. & Santizó Rincón, J.A. 1998. Estimation of nitrogen and chlorophyll status of tomato with a portable chlorophyll meter. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. *Terra* 16, pp. 135-141.
- Rodríguez Muela, C.; Becerra Bernal, A.; Rodríguez Ramírez, H.E.; Díaz Plascencia, D.D.; Hernández Gómez, C.; Gutiérrez Piña, F.; Gallegos Acevedo, M.A.; Romero Villalobos, S. & Acosta, F.A. 2010. Valor nutricional de la manzarina obtenida de subproductos de manzana para la alimentación animal. *Tecnociencia Chihuahua* 3, pp. 164-169.
- Román, P.; Martínez, M. & Pantoja, A. 2013. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina, Santiago, Chile, FAO. Recuperado de: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Rosen, C.J. & Bierman, P.M. 2005. Using manure and compost as nutrient sources for fruit and vegetable crops. Publication of the Department of Soil, Water, and Climate University of Minnesota. Recuperado de: <https://plumeriatoday.com/category/plumeria-care/nutrients/>.

Rostagno, M. 2015. Máquina volteadora para la elaboración de fertilizante orgánico a través de guano de gallina. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Escuela de Ingeniería Industria. Córdoba, Argentina.

Rubio Gutiérrez, A.M. 2010. La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Tesis de grado de Ingeniero Técnico Agrícola, especialidad en explotaciones agropecuarias. Escuela universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

Rynk, R. 1992. On-Farm Composting Handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension Service. Ithaca, Estados Unidos. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, pp. 186.

S

Sadzawka, A.R.; Carrasco, M.A.; Grez, R. & Mora, M.L. 2005. Métodos de análisis de compost. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 30. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8431>.

Sah, L.; Rousseau, D.P.; Hooijmans, C.M. & Lens, P.N. 2011. 3D model for a secondary facultative pond. *Ecological Modelling* 222, pp. 1592-1603.

Samborska, K.; Barañska, A.; Kamińska, P.; Kamińska-Dwórznička, A. & Jedlińska, A. 2019. Reduction of waste production during juice processing with a simultaneous creation of the new type of added-value products. *Environmental Protection and Natural Resources* 30: 1-6.

Sánchez, C. 2009. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances* 27, pp. 185-194.

Sánchez, E. & Villarreal, P. 2012. Cadena Frutales de Pepita. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Programa Nacional Frutales, Argentina. Recuperado de: <https://inta.gov.ar/documentos/cadena-frutales-de-pepita>.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Sánchez, P.A. 1994. Tropical soil fertility research: Towards the second paradigm. 15th, Acapulco, México: World Congress of Soil Science. pp. 65-68.

Sánchez Hernández, R.; Ordaz Chaparro, V.; Benedicto Valdés, G.; Hidalgo Moreno, C. & Palma-López, D. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricompost de cachaza y estiércol. *Interciencia* 30, pp. 775-779.

Sánchez-Monedero, M.A.; Roig, A.; Paredes, C. & Bernal, M.P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresourse Technology* 78, pp. 301-308.

Satti, P.; Mazzarino, M.J.; Laos, F.; Roselli, L. & Crego, M.P. 2012. Compostaje de materiales de diferente origen: experiencias del Grupo de Suelos del CRUB. En: *Compostaje en Argentina: Experiencias de Producción, Calidad y Uso*. Eds.: Mazzarino M.J. & Satti P. UNRN y Orientación Gráfica Editora. pp. 77-98.

Schindler, D.W.; Hecky, R.E.; Findlay, D.L.; Stainton, M.P.; Parker, B.R.; Paterson, M.J.; Beaty, K.G.; Lyng, M. & Kasian, S.E.M. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *PNAS* 105, pp. 11254-11258.

Secretaría de Política Económica. 2017. Cadena de valor manzana y pera N° 23. Recuperado de:
https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/2017/SSPMicroCadenasdevalorManzana_y_pera.pdf.

SENASA. 2011. Resolución 264. Manual para el registro de fertilizantes, enmiendas, sustratos, acondicionadores, protectores y materias primas en la República Argentina. Anexo I. Recuperado de:
http://www.senasa.gob.ar/sites/default/files/ARBOL_SENASA/INFORMACION/PROD%20VE%20FITO%20Y%20FERTILI/PROD%20FITO%20Y%20FERTILIZANTES/FERT%20ENMIENDAS%20Y%20OTROS/INSCRIBIR%20PRODUCTOS/Manual_Fertilizantes.pdf.

SENASA. 2017. Anuario Estadístico 2017.Centro Regional Patagonia Norte. Recuperado de:
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anuario_estadistico2017c.pdf.

Bibliografía.....Iturmendi F.

- Sepúlveda, P. 2018. Elaboración de abonos orgánicos. Centro Regional Patagonia Norte. Recuperado de: <https://inta.gob.ar/eventos/elaboracion-de-abonos-organicos-1>.
- Shalini, R. & Gupta, D.K. 2010. Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology* 47, pp. 365-371.
- Sharma, B.; Sarkar, A.; Singh, P. & Singh, R.P. 2017. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Management* 64, pp. 117-132.
- Sharma, D.; Yadava, K.D. & Kumarb, S. 2018. Role of sawdust and cow dung on compost maturity during rotary drum composting of flower waste. *Bioresource Technology* 264, pp. 285-289.
- Sheridan, C.; Petersen, J. & Rohwer, J. 2012. On modifying the Arrhenius equation to compensate for temperature changes for reactions within biological systems. *Water SA* 38, pp. 149-151.
- Shilton, A.N. & Mara, D.D. 2005. CFD (computational fluid dynamics) modelling of baffles for optimizing tropical waste stabilization pond system. *Water Science and Technology* 51, pp. 103-106.
- Sims, J.T. & Sharpley, A.N. 2005. Phosphorus, agriculture and the environment. American Society of Agronomy. Monogr. ASA. Madison, Estados Unidos. pp. 1121.
- Smith, R. 1980. Ecology and field biology. HarperCollins Publishers. New York, Estados Unidos. pp. 835.
- Smyth, K.; Vendramelli, R.; Dankewich, D. & Yuan, Q. 2018. Seasonal variations in cold climate nutrient removal: A comparison of facultative and aerated lagoons. *Journal of Environmental Management* 14, pp. 224-231.
- Sosa, D.A. & Alvarenga, F. 2012. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. Centro Regional Misiones. Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-tnicas_de_toma_y_remisin_de_muestras_de_suelos.pdf.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Sparks, D.L.; Page, A.L.; Helmke, P.A.; Loeppert, R.H.; Soltanpour, P.N.; Tabatabai, M.A.; Johnnton, C.T. & Sumner, M.E. 1996. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series N° 5. ASA. Madison, Estados Unidos. John Wiley & Sons, pp. 1424.

Stamatiadis, S.; Doran, J.W. & Kettler T. 1999. Field and laboratory evaluation of soil quality changes resulting from injection of liquid sewage sludge. *Applied Soil Ecology* 12, pp. 263-272.

Steele, J.H. 1962. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology & Oceanography* 7, pp. 137-150.

Steets, B.M. & Holden, P.A. 2003. A mechanistic model of runoff-associated fecal coliform fate and transport through a coastal lagoon. *Water Research* 37, pp. 589-608.

Sundberg, C.; Smårs, S. & Jonsson, H. 2004. Low pH as an inhibiting factor in the transition of mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology* 95, pp. 145-150.

Sydenham, E.W.; Vismer, H.F.; Marasas, W.F.O.; Brown, N.; Schlechter, M.; Vanderwesthuizen, L. & Rheeder, J.P. 1995. Reduction of patulin in apple juice samples - influence of initial processing. *Food Control* 6, pp. 195-200.

Sztern, D. & Pravia, M. 1999. Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos. Organización Panamericana de la Salud. Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/compost.pdf>.

T

Taboada, M.A. & Alvarez, C.R. 2008. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. pp. 272.

Tarifa, M.C.; Brugnoli, L.; Estrada, V.; Iturmendi, F. & Díaz, M.S. 2011. Modelado cinético y caracterización de la microbiota en lagunas de tratamiento biológico. Tesis de grado. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

Thamatrakoln, K. & Hildebrand, M. 2008. Silicon uptake in diatoms revisited: a model for saturable and nonsaturable uptake kinetics and the role of silicon transporters. *Plant Physiology* 146, pp. 1397-1407.

Bibliografía.....Iturmendi F.

Threadgill, E.D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 25, pp. 859-867.

Tilley, E.; Ulrich, L.; Lüthi, C.; Reymond, P.; Schertenleib, R. & Zurbrügg, C. 2018. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática. EAWAG. Recuperado de: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202018.%20Compendio%20de%20sistemas%20y%20tecnolog%C3%ADas%20de%20saneamiento.pdf.

Titko, S.; Jessop, L.W.; Seymour, R.D.; Baker, J.D.; Blaylock, C.K. & Roussel, L.J. 1996. Mixing ratios in biosolids composting. Biocycle 37, pp. 66-68.

Tognetti, C. 2007. Compostaje de residuos orgánicos urbanos: Optimización del proceso para una mayor calidad del producto final. Tesis doctoral. CRUB-UNC. Bariloche, Argentina.

Trejo, J. 2007. Nutrientes en suelos y en hortalizas cultivadas con distintos tratamientos al suelo. Tesis de grado. ICQ-FAyA-UNSE. Santiago del Estero, Argentina.

U

Ullé, J.S. 2009. Determinación de temperaturas máximas, en pilas de compost de aireación estática a partir de estiércoles en mezclas con residuos vegetales. Informe Técnico 2009 del Centro Regional Buenos Aires Norte del INTA, pp. 64-66.

Ullé, J.S. & Diaz, B.M. 2018. El suelo como reactor de los procesos de regulación funcional de los agroecosistemas. Edición Especial para SOCLA en VII Congreso Latinoamericano de Agroecología. Edición INTA. San Pedro, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/intasp_ulle_diaz_ed_el_suelo_como_reactor_socla_2018_v5.pdf.

Uribe, J.F.; Estrada, M.; Córdoba Santiago, I.A.; Hernández, L.E. & Bedoya, D.M. 2001. Evaluación de los microorganismos eficaces (E.M) en producción de abono orgánico a partir del estiércol de aves de jaula. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 14, pp. 164-162.

USEPA. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. Federal Register 58, pp. 9248-9415. Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015->

Bibliografía.....Iturmendi F.

10/documents/58_fr_9248__9404_standards_for_the_disposal_of_sewage_sludge_final_reduced.pdf.

UTHSCSA. 2002. Recuperado de: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>.

V

Valenzuela, O.; Nicolau, F.; Rode, M.; Schlund, H. & Gallardo, C. 2003. Respuesta de *Tagetes patula* a sustratos formulados con compost y perlita. Revista Científica Agropecuaria 7, pp. 57-61.

Varela, S.A. & Basil, G. 2011. Uso de compost en la producción de plantines de especies forestales. Área Forestal - INTA EEA Bariloche. Silvicultura en Vivero. Cuadernillo N° 4. Recuperado de: https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/11395/INTA_CRPatagonia_Norte_EEABariloche_Varela_SA_Uso_De_Compost_En_La_Produccion_De_Plantines_De_Especies_Forestales.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Varma, V.S.; Das, S.; Sastri, C.V. & Kalamdhad, A.S. 2017. Microbial degradation of lignocellulosic fractions during drum composting of mixed organic waste. Sustainable Environment Research 27, pp. 265-272.

Vázquez, J. & Loli, O. 2018. Compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *Gypsophila paniculata*. Scientia Agropecuaria 9, pp. 43-52.

Vijay, S. & Yuan, Q. 2017. Simplified empirical model for phosphorous removal in a facultative wastewater lagoon. Journal of Environmental Management 201, pp. 1-5.

Villarreal, P. & Santagni, A. 2004. Pautas tecnológicas: frutales de pepita. Manejo y análisis económico financiero. Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle Centro Regional Patagonia Norte. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-pautas_pepita.pdf.

Vollenweider, R.A. 1975. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie 37, pp. 53-84.

W

Wang, Ch.; Lin, Y.; Huang, W. & Chiu, L. 2005. Raw materials used for composting. En: Compost production: a manual for asian farmers. Eds.: Chen Z. & Bejosano G. Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region. Taipei, Taiwan. pp. 20-30.

Westwood, M.N. 1993. Temperate-zone pomology: physiology and culture. Timber Press. Portland, Estados Unidos. pp. 523.

Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, pp. 184-194.

Wolfert, S.; Cor Verdouw, L.G. & Bogaardt, M.J. 2017. Big data in smart farming - a review. *Agricultural Systems* 153, pp. 69-80.

Wolkowski, R.P. 1990. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: a review. *Journal of Production Agriculture* 3, pp. 460-469.

X

Xiao, R.; Awasthi, M.K.; Li, R.; Park, J.; Pensky, S.M.; Wang, Q. & Zhang, Z. 2017. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: a review. *Bioresource Technology* 246, pp. 203-213.

Z

Zayed, G. & Abdel-Motaal, H. 2005. Bio-production of compost with low pH and high soluble phosphorus from sugar cane bagasse enriched with rock phosphate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 21, pp. 747-752.

Zhang, J.; Jørgensen, S.E. & Mahler, H. 2004. Examination of structurally dynamic eutrophication model. *Ecological Modelling* 173, pp. 313-333.

Zhang, F.; Wang, T.; Wang, X. & Lü, X. 2021. Apple pomace as a potential valuable resource for full-components utilization: A review. *Journal of Cleaner Production* 329, pp. 129676.

Zucconi, F.; Pera, A.; Forte, M. & Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle* 22, pp. 54-57.