



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Valorización de los lodos de depuración producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales - Lima, Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Teofilo Eustedio MENESES SOLIS

ASESOR

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Meneses, T. (2025). *Valorización de los lodos de depuración producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales - Lima, Perú*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Teofilo Eustedio Meneses Solis
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	15862223
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3209-1464
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	17402784
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5821-5886
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Eduardo Ronald Espinoza Farfan
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40231227
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.2.5. Contaminación del Ambiente
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Calle: Germán Amezaga N°375 Lima 1-Perú. Ciudad Universitaria. Latitud: -12.05860 Longitud: -77.08158
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2018 - 2020
URL de disciplinas OCDE	Ciencias del medio ambiente: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08 Ingeniería química: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería ambiental y geológica: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los veintisiete días del mes de marzo del año dos mil veinticinco, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000072-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 22 de marzo del 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«VALORIZACIÓN DE LOS LODOS DE DEPURACIÓN PRODUCIDOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES - LIMA, PERÚ»

Presentado por el Mg. **TEOFILO EUSTEDIO MENESES SOLIS**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

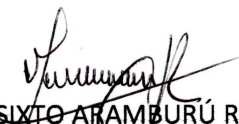
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 06564/ FIGMMG, de fecha 25 de julio del 2018, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

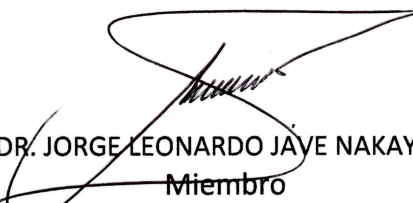
Bueno (16)

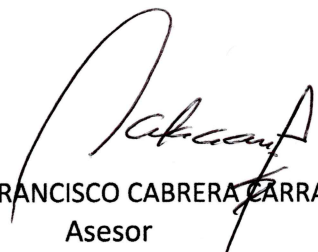
Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR** en **CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **TEOFILO EUSTEDIO MENESES SOLIS**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Presidente


DR. EDUARDO RONALD ESPINOZA FARFAN
secretario


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Miembro


DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Asesor



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N° 053/UPG-FIGMMG-2020 de la tesis, cuyo título es «**VALORIZACIÓN DE LOS LODOS DE DEPURACIÓN PRODUCIDOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES - LIMA, PERÚ**», presentado por el Magister TEOFILO EUSTEDIO MENESES SOLIS para optar el Grado Académico de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **06 %** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Lima, 22 de Julio de 2024



Firmado digitalmente por CABRERA
CARRANZA Carlos Francisco FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.10.2024 12:36:29 -05:00

Firma del Asesor:

.....

Nombres y apellidos del asesor:

Carlos Francisco Cabrera Carranza

DNI:

17402784.....

Después de inmensos esfuerzos y valiosos sacrificios me han permitido culminar la realización de este trabajo con la finalidad de dar un pequeño aporte a la ciencia.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Unidad de posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por darme la oportunidad de realizar el Doctorado. De igual forma al personal docente y administrativo, quienes facilitaron el desarrollo de las actividades académicas en la unidad de posgrado. Asimismo agradecimientos especiales para la Universidad de Liège, ULg, Bélgica. Lugar donde he realizado estudios de posgrado, Maestría y Doctorado, es un país que admiro y valoro mucho, lo considero como mi segunda patria por haberme dado la oportunidad de seguir estudios de posgrado. Igualmente a las personas por su gran apoyo y valiosas orientaciones durante mis estudios de posgrado realizados en Bélgica (Universidad de Liège) y Francia (Universidad de Montpellier).

En especial quiero agradecer a mis abuelos, a mis padres que siempre me apoyaron en mis actividades académicas, los admiro por su humildad, sencillez en todo, quienes han sido herederos de los grandes conocimientos de nuestros antepasados los Incas. La civilización Inca, lograron alcanzar un alto grado de desarrollo en los diferentes sectores de la actividad económica. Por mi parte trato de aportar a la ciencia, con este trabajo de investigación realizado, un poco del vasto conocimiento y altos desarrollos en diversas ciencias de la cultura Inca. Luego en la presente tesis se relacionan las leyes de velocidad, considerando las obras hidráulicas Incaicas de asombrosa perfección construidos en el Cuzco y los diferentes lugares que han sido visitados en el Perú y en otros países, con la valorización agrícola del lodo de depuración de aguas residuales incluidos en el contexto del sistema de la contaminación ambiental y del equilibrio con la naturaleza.

También expresar mi agradecimiento a mis hermanos German, Elsa, Alicia, que me apoyaron en mis proyectos, en particular a mi hermano Antonio (trabajó en la empresa papelera Paramonga. Hombre de valor, sencillo, bondadoso, inteligente, muy realista con cualidades éticas y morales). De su experiencia de trabajo transmitía sus aportes y valiosos conocimientos del proceso de

fabricación de papel. Asimismo, un especial, infinito e inconmensurable agradecimiento a mi hermana Olinda por su gran apoyo y comprensión en todo, a quienes siempre estaré muy agradecidos por apoyarme en mis actividades académicas y personales, siempre han sido un gran soporte en mi vida, los admiro y respeto por siempre.

Igualmente mi agradecimiento a mis colegas: Carlos Cabrera, Raúl Pizarro, Timoteo Zavala, Leoncio Reyna, Ricardo Lama, Cesario Condorhuaman, Javier Armijo, Cesar Quispe, Alberto Garrido, Waldir Estela, Manuel Bejar, Oscar Nuñez, quienes siempre me alentaron en mis objetivos.

Asimismo un enorme agradecimiento a mi colega y amigo Gastón Ugarte, por su sincera admiración y respeto, de igual forma mis agradecimientos de admiración y respeto al Dr. Eric Rendon (realizó estudios de posgrado en Bélgica).

De igual modo agradecer a mis colegas del doctorado: Yuly Vila a quien agradezco y valoro sus palabras tan bonitas hacia mi persona, a Magali Bazán, Edwin Loaiza, Liliana Tapia, Sixto González, Milton Monge, Julián Chura, Flor Ángel Castellón, Fátima Medina, Evelyn Garro, Estela Ponce, Carlos Paulino, Edmundo Estrada por su comprensión y soporte moral de cada uno de ellos.

Agradecimientos a las personas y familiares, por su apoyo desinteresado, que hicieron posible realizar las actividades experimentales en diferentes lugares del Perú y en otros países para verificar las leyes de la velocidad en las punas de Huántar, Chavín, en las ciudades de Huari, Arequipa, Cuzco, Satipo (comunidad de Camajeni), Liège-Belgica, Montpellier-Francia, la Isla de Curaçao y la isla de Bonaire. Igualmente para mis primos de Huantar, me acompañaron a las lagunas en las punas de Huantar. De igual modo mi agradecimiento a Yesica Nina Cusiyupanqui, del proyecto Ecohuella, directora de la escuela campesina agroecológico de la comunidad campesina de Socllo, Calca, región Cuzco, por sus valiosos e importantes aportes en la agricultura ecológica.

Asi También mi sincero y especial agradecimiento se dirige a los directores de la Universidad de Montpellier, Francia, Dr. Jean-Paul Fernández (director del polo universitario europeo), Pr. Bernard Duran (Universidad Montpellier 1) Dr. Michel Dumas (Universidad Montpellier 2) Por darme la oportunidad de realizar en la

Universidad de Montpellier, Francia, la investigación científica en ecosistemas costeros y marinos, relacionados a mis estudios de doctorado realizado en Bélgica.

De igual forma con admiración y respeto agradezco a mi cuñado Marino Rodríguez, Ingeniero Químico, por sus valiosas orientaciones académicas e importantes aportes de las actividades laborales en la industria azucarera.

Especiales y sinceros agradecimientos con respeto y admiración para Eva Paredes y Jessica Abad, así también a sus padres y hermanos que siempre mostraron hacia mi persona admiración y respeto. Agradecimientos a Sergio Alcantara por compartir mis actividades deportivas, Fútbol y Maratón de fondo. De igual forma, para mis colegas Walter Centeno, Herwarth Morales, Beatriz Arakaki, Cesar Montero, Miguel Arones, Jaime Ramos, Pedro Luis Mantilla, Marco Carbajal. A Lesly Rojas, me ha acompañado a algunos lugares mostrados en este trabajo.

Finalmente un gran reconocimiento por las obras que realizaron las poblaciones ancestrales peruanas, realizadas como consecuencia del alto grado de desarrollo de la civilización Inca, representa un paradigma de desarrollo, y así transmitir mensajes con la finalidad de alcanzar el equilibrio con la naturaleza y minimizar la contaminación ambiental, estos mensajes son enigmas y se presentan como complejos desafíos de las ciencias, en el marco de la epistemología, e ingeniería en el mundo actual y futuro, desafíos a resolver y se pueda minimizar la contaminación ambiental. Algunos desafíos a resolver se presentan en el candelabro de Paracas, en las líneas de la civilización Nazca, en la civilización Chavin (su arte lítico, metalurgia, textilería, cerámica, acueductos, red de caminos, tuneles subterráneos, etc).

“Nada se crea, nada se destruye, todo se transforma”.

Antoine Lavoisier (1743 - 1794)

“Si sobre un sistema en equilibrio se ejerce una fuerza (cambio de temperatura, concentración, presión, etc.) se produce un desplazamiento del equilibrio hacia el sentido que tiende a cancelar la fuerza ejercida”.

Henry Le Chatelier (1850 - 1936)

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación problemática	2
1.2. Formulación del problema científico general	36
1.2.1. Problemas específicos	38
1.3. Justificación de la investigación	38
1.4. Objetivos	40
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	42
2.1. Marco epistemológico de la investigación	42
2.2. Antecedentes del problema	44
2.3. Bases Teóricas	45
2.3.1. Purificación de aguas residuales	45
2.3.2. Tratamiento de aguas residuales	46
2.3.2.1. Definición de aguas residuales	46
2.3.3. Clasificación de las aguas residuales	47
2.3.3.1. Domésticas	47
2.3.3.2. Industriales	47

2.3.3.3. Municipales	47
2.3.4. Descripción del esquema del proceso para la transformación de aguas residuales	49
3. Subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales	57
3.1. Estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales ...	57
3.2. Deshidratación de lodos de depuración	58
3.3. Tratamiento químico del lodo de depuración	58
3.4. Sectores de eliminación y valorización del lodo de depuración	59
3.4.1. Valorización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales	59
3.4.1.1. Valor del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales	61
3.4.1.2. Los suelos para el esparcido del lodo de depuración	62
3.4.2. La valorización energética del lodo de depuración	62
3.4.2.1. La incineración del lodo de depuración	62
3.4.2.2. Pirolisis de lodos de depuración	63
3.4.2.3. Gasificación del lodo de depuración	63
3.5. Ventajas del secado del lodo para su valorización	64
3.5.1. Secado y esparcido agrícola, valorización agrícola del lodo	64
3.5.2. Secado y valorización de energía del lodo	65
4. Conceptos relativos al secado del lodo de depuración	66
4.1. Definición	66
4.2. Nociones relativos al aire húmedo	68
4.3. Formas de agua dentro de un sólido húmedo	69
4.3.1. Isotermas de sorción de humedad	70
4.3.1.1. Expresiones matemáticas para isotermas	73

4.3.1.2. Calor isostérico de desorción	75
4.3.2. Tipos de agua en lodos de depuración	75
5. Cinética de secado convectivo del lodo de depuración	77
5.1. Formas de las curvas de Krischer	80
5.1.1. Fase o periodo de ajuste de temperatura	81
5.1.2. Fase o período de flujo másico constante	81
5.1.3. La fase o periodo de flujo másico decreciente del lodo	82
5.1.3.1. Primera fase del flujo másico	82
5.1.3.2. Segunda fase del flujo másico decreciente	83
5.2. Tipos de curvas de flujo según Sherwood	84
5.3. Evolución de la temperatura en la superficie del lodo	85
6. Aproximación de la expresión matemática simplificada	87
6.1. Periodo a flujo de secado constante del lodo de depuración	87
6.2. Período de secado decreciente del lodo de depuración	89
6.2.1. Formas de transporte de agua	89
6.2.2. Expresiones matemáticas de secado del lodo de depuración	91
7. Reducción de volumen del lodo.....	92
CAPITULO III: METODOLOGIA	97
3.1. Concentración de sustancia residual seca (SS o MS)	97
3.2. Concentración de sustancia residual volátil (SRV, MV, o SV)	98
3.3. Estabilización del subproducto de la depuración de aguas residuales	99
3.4. Caracterización del lodo de depuración	100
3.5. Tipo y diseño de investigación	100
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	104
4.1. Análisis y discusión de resultados	104

4.1.1. Curvas de contracción de secado del lodo de depuración	109
4.2. Verificación de hipótesis	112
4.2.1. Lodos de depuración A y B	115
4.2.1.1. Regresión multilíneal para el lodo B	120
4.2.1.2. Regresión multilíneal para el lodo A	121
4.2.2. Etapa de flujo másico continuo	129
4.2.3. Etapa de flujo másico de secado variable	130
4.3. Resultados	145
4.3.1. Pruebas realizadas con respecto al lodo residual	145
4.3.2. Relaciones de concentración de sustancia residual seca, SS.	148
4.3.3. Relaciones de concentración de sustancia residual volátil (SRV o SV)	149
4.3.4. Comportamiento durante el proceso efectuado para la estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales	151
4.3.4.1. Lodo A, ratios de concentración de estabilización	151
4.3.4.2. Lodo B, ratios de concentración de estabilización	151
4.3.4.3. Lodo A, contenido de materia orgánica y carbono orgánico total	152
4.3.4.4. Lodo B, contenido de materia orgánica y carbono orgánico total	152
4.3.5. Siembra experimental utilizando el lodo de depuración estabilizado	165
CONCLUSIONES	193
RECOMENDACIONES	196
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	198
ANEXOS	211
Anexo I: Propiedades del aire húmedo	211
Anexo II: Determinación de las condiciones de operación	212

Anexo III: Ecuaciones para el cálculo de las magnitudes que intervienen en los números adimensionales	213
Anexo IV: Figuras adicionales	215
Anexo IV: Figura IV. 1A. Vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica	215
Anexo IV: Figura IV. 2A. Representación esquemática del proceso de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica.....	216
Anexo IV: Figura IV. 3A. Plano general y vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica	217
Anexo IV: Figura IV. 4A. Esquema del proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR.....	218

LISTA DE CUADROS

Tabla I.1. Producción aproximada del subproducto de la depuración de aguas residuales.....	21
Tabla I.2. Tratamiento de aguas residuales (porcentaje)	22
Tabla I.3. Vertimientos de aguas residuales urbanos sin procesos de depuración (m^3)	22
Tabla II.1. Contenido de elementos fertilizantes en lodos de depuración, % MS	61
Tabla II.2. Expresiones matemáticas de isothermas más utilizados	74
Tabla II.3. Clasificaciones de agua libre y agua ligada	77
Tabla IV.1. Contenido de materia seca y materias volátiles obtenidos antes y después de la estabilización de los lodos A y B	105
Tabla IV.2. Plan experimental realizado en muestras del lodo B	106
Tabla IV.3. Plan experimental realizado con muestras de lodo A	109
Tabla IV.4. Valores del límite de confianza, L_{CN} , a 95% y ECR obtenidos al determinar el límite por debajo del cual cesa la contracción y la contracción final-Lodo B	114
Tabla IV.5. Parámetros del análisis de regresión multilineal realizado sobre $(W/W_i)_{FS}$ y $(V/V_i)_{FS}$. Lodo B	115
Tabla IV.6. Valores obtenidos y límites de confianza a 95% de $(W/W_i)_{FS}$ y de $(V/V_i)_{FS}$ determinado sobre todas las pruebas. Lodo B	115
Tabla IV.7. Valores del límite de confianza, L_{CN} , a 95% y ECR obtenidos al determinar el límite por debajo del cual cesa la contracción y de $(V/V_i)_{FS}$.Lodo A	116
Tabla IV.8. Parámetros del análisis de regresión multilineal realizado en $(W/W_i)_{FS}$ y sobre $(V/V_i)_{FS}$.Lodo A	117

Tabla IV.9. Parámetros del análisis de regresión multilíneal realizado sobre el flujo constante de secado convectivo del lodo de depuración en el plano horizontal del Fc (periodo de velocidad constante). Lodo B	121
Tabla IV.10. Parámetros del análisis de regresión multilíneal realizado sobre el flujo máximo de secado del lodo de depuración en el plano horizontal del Fc (periodo de velocidad constante). Lodo A	122
Tabla IV.11. Ensayos efectuados durante el proceso de operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento	147
Tabla IV.12. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración para la sustancia residual seca, efectuados en el grupo de ensayo I	148
Tabla IV.13. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración para la sustancia residual seca, efectuados en el grupo de ensayo II	149
Tabla IV.14. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración de la sustancia residual volátil, efectuados en el grupo de ensayo I	149
Tabla IV.15. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración de sustancia residual volátil, efectuados en el grupo de ensayo II	150
Tabla IV.16. Lodo sin estabilizar-Secado. Contenido de materia seca	151
Tabla IV.17. Lodo sin estabilizar-Calcinación. Contenido de materia no volátil	151
Tabla IV.18. Ratios de concentración de estabilización	151
Tabla IV.19. Lodo estabilizado-Secado. Contenido de materia seca	151
Tabla IV.20. Lodo estabilizado-Calcinación. Contenido de materia no volátil	152
Tabla IV.21. Ratios de concentración de estabilización	152
Tabla IV.22. Lodo sin estabilizar. Contenido de materia orgánica (MO) y carbono orgánico total (COT)	152

Tabla IV.23. Lodo estabilizado. Contenido de materia orgánica (MO) y carbono orgánico total (COT)	152
Tabla IV.24. Datos referenciales del guano de isla compuesto	160
Tabla IV.25. Nutrientes y la composición del guano de las islas	161
Tabla IV.26. I. Metodología de ensayo	162
Tabla IV.27. II. Resultados	163
Tabla IV.28. Parámetros de toxicidad química para lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, ...	164

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1. Laguna de Purhuay, Huari, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	6
Figura I.2. Distrito de Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	7
Figura I.3. Laguna de Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	8
Figura I.4. Laguna de Tishguyoj Chavín, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.....	9
Figura I.5. Laguna de Salkantay. Cusco. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	9
Figura I.6. Acueductos de Tambomachay, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en dos canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	10
Figura I.7. Acueductos de Tambomachay, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en dos canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	10
Figura I.8. Acueductos de Tipón, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en cuatro canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor	11

- Figura I.9.** Cumbre del Volcán MISTI, Cráter del Volcán, Arequipa. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 11
- Figura I.10.** Embarcadero de Remolinos, comunidad de Puerto Ocopa, distrito de rio Tambo, Provincia de Satipo, rumbo a la comunidad de Camajeni (pueblo Asháninka). Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 12
- Figura I.11.** Comunidad de Camajeni, pueblo Asháninka, Satipo. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 12
- Figura I.12.** Comunidad de Camajeni, pueblo Asháninka, Satipo. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 13
- Figura I.13.** Volumen de aguas residuales tratadas, tecnologías empleadas, y numero de PTAR en Lima metropolitana 16
- Figura I.14.** Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y porcentaje de tratamiento 17
- Figura I.15.** Ubicación de las estaciones de depuración de aguas residuales. 18
- Figura I.16.** Producción y depuración de aguas residuales por las Entidades Prestadoras de Servicios de saneamiento en el Perú..... 19
- Figura I.17.** Volumen de aguas residuales generado por persona durante un día 20
- Figura I.18.** Vista de la Universidad de Liège, ULg, Facultad de Ciencias Aplicadas, Bélgica. En la ULg se realizan investigaciones científicas relacionados a las ciencias ambientales, con el propósito de minimizar el desequilibrio del ecosistema, desequilibrio ecológico prolongado 25
- Figura I.19.** Ingresando a la Universidad de Liège, ULg, Bélgica, Facultad de Ciencias Aplicadas, Laboratorio de Ingeniería Química, para realizar estudios de Maestría y Doctorado. En la ULg se desarrollan estudios relacionados a las

ciencias ambientales, con el propósito de minimizar el desequilibrio del ecosistema 26

Figura I.20. Presente, durante la Ceremonia de clausura de la investigación científica de ecosistemas acuáticos marinos realizado en la Universidad de Montpellier, Francia. Trabajo de Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica 27

Figura I.21. Presente, durante la Ceremonia de clausura de la investigación científica de ecosistemas acuáticos marinos realizado en la Universidad de Montpellier, Francia. Trabajo de Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica 27

Figura I.22. Estación de acuicultura en Sète. Montpellier. Estación mediterránea del medio ambiente costero de Sète en Montpellier-Francia, que pueden ser compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos (acuicultura). Trabajo de investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica 28

Figura I.23. En la estación de acuicultura en Sète. Montpellier. Estación mediterránea del medio ambiente costero de Sète, Francia, compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos (acuicultura). Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica 28

Figura II.1. Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales 48

Figura II.2. Empresas de saneamiento que gestionan el proceso de potabilización del agua para el consumo de la población 49

Figura II.3. Esquema del proceso para la transformación de aguas residuales 50

Figura II.4. Esquema del proceso de la depuración biológica aerobia de aguas residuales 51

Figura II.5. Esquema de la unidad de proceso para la depuración biológica de aguas residuales 51

Figura II.6. Esquema del proceso de la depuración biológica de aguas residuales 54

Figura II.7. Esquema para la depuración biológica de aguas residuales	55
Figura II.8. Representación esquemática de 5 tipos de isotermas de adsorción	71
Figura II.9. Esquema de la isoterma de forma sigmoideal, tipo II	71
Figura II.10. Pérdida de masa (kg) con respecto al tiempo de secado (s).	78
Figura II.11. Curva de pérdida de masa, humedad del lodo, secado del lodo de depuración	78
Figura II.12. Velocidad de secado del lodo en función del tiempo	79
Figura II.13. Curva de Krischer muestra la evolución del flujo másico del agua durante el secado del lodo en relación al agua libre del lodo	80
Figura II.14. Esquema de la curva de Krischer teórica	81
Figura II.15. Esquemas de tipos de curvas de flujo másico con respecto al agua libre del lodo	85
Figura II.16. Esquema mostrando el incremento de la temperatura en el área de transferencia con respecto al tiempo para un caso de secado (1) con o (2) sin fase isoentálpica	86
Figura II.17. Esquema de la capa límite en la superficie del lodo húmedo	87
Figura II.18. Esquemas de la película de agua sobre una superficie sólida a) líquido humectante b) líquido no humectante, esquema del ángulo de contacto	94
Figura III.1. Representación esquemática del secado de muestra húmeda, materia húmeda MH, y calcinación de la materia seca MS del lodo de depuración	98
Figura III.2. Esquema del diseño control antes y después (preprueba-posprueba)	101
Figura IV.1. Curva de pérdida de masa con respecto al tiempo de secado del lodo residual, mostrándose las roturas, círculos, durante el secado, Lodo B...	108
Figura IV.2. Curva de contracción obtenida en las pruebas de secado. Lodo B	111

Figura IV.3. Esquema para la representación de las dos líneas rectas ajustadas en las curvas de contracción y la ubicación de los dos parámetros de ajuste	112
Figura IV.4. Efecto de la temperatura del fluido compresible utilizado durante el proceso de secado convectivo del lodo residual, en el proceso de contracción, pruebas 3, 12 y 21. Lodo A	118
Figura IV.5. PTAR, en Lurigancho-Chosica, lugar donde se desarrollan las operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales produciendo el subproducto residual durante el proceso efectuado. En este lugar han sido colectados las muestras del subproducto producido para su evaluación	146
Figura IV.6. Relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayo que corresponde al lodo A	153
Figura IV.7. Relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayo que corresponde al lodo B	153
Figura IV.8. Comparación de relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayos correspondientes para muestras de lodos residuales denominados A y B	154
Figura IV.9. Variación de la velocidad de secado del lodo de depuración con respecto a la relación de concentración de humedad del Lodo A	154
Figura IV.10. Velocidad de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo B	155
Figura IV.11. Flujo de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo B	156
Figura IV.12. Flujo de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo A	157
Figura IV.13. Siembra de semillas de Lino (<i>Linum usitatissimum</i>) y Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	166

Figura IV.14: Siembra de semillas de Lino (<i>Linum usitatissimum</i>) y Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	166
Figura IV.15: Siembra de semillas de Lino (<i>Linum usitatissimum</i>) y Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	167
Figura IV.16: Siembra de semillas de Lino (<i>Linum usitatissimum</i>) y Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	167
Figura IV.17. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	168
Figura IV.18. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	168
Figura IV.19: Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	169
Figura IV.20. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	169
Figura IV.21. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	170
Figura IV.22: Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	170
Figura IV.23 Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	171
Figura IV.24. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	171

Figura IV.25. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	172
Figura IV.26. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	172
Figura IV.27. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	173
Figura IV.28. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	173
Figura IV.29. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	174
Figura IV.30. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	174
Figura IV.31. Siembra de semillas de Maíz Morado (<i>Zea mays</i>), Maíz Amarillo (<i>Zea mays</i>), Soya (<i>Glycine max</i>), Numia (<i>Phaseolus vulgaris</i>), y Frijol Canario (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	175
Figura IV.32. Proyecto Agroecológico “Ecohuella” (2022), distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea	176
Figura IV.33. Proyecto Agroecológico “Ecohuella” (2022), en el distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea	177
Figura IV.34. Proyecto Agroecológico “Ecohuella” (2022), en el distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea	177

- Figura IV.35.** Riego por aspersión para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), Mashcas bajo, Chavin, 2022. El agua utilizada es de fuente subterránea 178
- Figura IV.36.** Riego por aspersión para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), Mashcas bajo, Chavin, 2022. El agua utilizada es de fuente subterránea 178
- Figura IV.37.** Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavin, Ancash, 2022. Para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) 179
- Figura IV.38.** Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavin, Ancash, 2022. Para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) 179
- Figura IV.39.** Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavin, Ancash, 2022. Agua utilizada para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) 180
- Figura IV.40.** Chasquitambo, distrito de Colquioc, provincia Bolognesi. Ancash. En un sistema en equilibrio con la naturaleza se desarrolla favorablemente el Huarango (*Acacia macracantha*) sobre un cerro rocoso, modelado por la fuerza de los vientos predominantes 183
- Figura IV.41.** Complejo arqueológico Pikillacta, región Cusco. En un sistema en equilibrio con la naturaleza se desarrolla favorablemente la orquídea (*Hesperoxiphion herrerae*) 183
- Figura IV.42.** Laguna Hatun potrero, en Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 184
- Figura IV.43.** Laguna Hatun potrero, en Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor 184
- Figura IV.44.** Vista de la refinería Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza 186

Figura IV.45. Vista de la refinería Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	186
Figura IV.46. Vista de la refinería Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	187
Figura IV.47. Vista de la refinería Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	187
Figura IV.48. Vista de la refinería Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	188
Figura IV.49. Vista de la UNIVERSIDAD DE CURAÇAO, 111 Jan Noorduynweg, WILLEMSTAD, CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	188
Figura IV.50. Vista de la UNIVERSIDAD DE CURAÇAO, 111 Jan Noorduynweg, WILLEMSTAD, CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza	189
Figura IV. 1A (anexo IV). Vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica	215
Figura IV. 2A (anexo IV). Representación esquemática del proceso de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica	216
Figura IV. 3A (anexo IV). Plano general y vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica	217
Figura IV. 4A (anexo IV). Esquema del proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR	218

RELACIÓN DE SÍMBOLOS

Símbolos

A	superficie exterior del material	m^2
A_0	superficie exterior inicial del material	m^2
a_e	actividad del agua	[-]
$c_{p,a}$	calor específico del aire húmedo (Anexo III)	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
C	concentración	$kg.m^{-3}$
C	concentración	$kmol.m^{-3}$
C_{BET}	constante BET	[-]
$C_{évap}$	capacidad de evaporación	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
C_G	constante de Guggenheim	[-]
D	coeficiente de difusión	$m^2.s^{-1}$
D	caudal de aire (Anexo II)	$lN.min^{-1}$
D_{AB}	difusividad del vapor de agua en el aire (Anexo III)	$m^2.s^{-1}$
E.H.	equivalente habitante	[-]
ECR	error cuadrático medio	
ΔE	variación de energía	J
F	flujo del material de secado	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
F_f	factor de forma	[-]
F_c	flujo de secado constante	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
h	coeficiente de transferencia de calor	$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$
HR	humedad relativa del aire	%
ΔH_{vap}	calor latente de vaporización	$J.kg^{-1}$
J	flujo de materia	$kmol.m^{-2}.s^{-1}$
k	coeficiente de transferencia de masa	$m.s^{-1}$
k_{eff}	coeficiente de transferencia de masa efectiva	$m.s^{-1}$
K	constante del modelo GAB	[-]
K	permeabilidad	m^2
L_{CN}	límite de confianza	
L	dimensión característica	m

MES	materias en suspensión	mg/l
M	masa	kg
M _e	masa de agua	kg
M _f	masa final del material	kg
M ₀	masa inicial del material	kg
M _s	masa de solido seco	kg
MS	contenido de materia seca	kg o %
MS _i	contenido de materia seca inicial	kg o %
MSV	contenido de materias secas volátiles	%/kg MS
N	velocidad de secado	kg.s ⁻¹
Nu	numero de Nusselt	[-]
P	presión	Pa
P _{atm}	presión atmosférica	Pa
P _c	presión capilar	Pa
P _e	presión de vapor de agua	Pa
P _e ^{sat}	presión de vapor de agua saturada	Pa
P _l	presión del líquido	Pa
P _i	presión de vapor de agua en la interfase aire-materia	Pa
Pr	número de Prandtl	[-]
ΔP	perdida de carga o diferencia de presión	kPa
ΔP ₀	perdida de carga de referencia	kPa
PCI	poder calorífico inferior	J.kg ⁻¹
Q	flujo de calor	J.m ⁻² .s ⁻¹
Q _s	calor isostérico de desorción	J.mol ⁻¹
R	constante del gas perfecto	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Re	número de Reynolds	[-]
RES	suma de los cuadrados de los residuos	
Sc	número de Schmidt	[-]
Sh	numero de Sherwood	[-]
t	tiempo	s
T	temperatura	°C
T _a	temperatura del aire	°C

T_h	temperatura húmeda	$^{\circ}\text{C}$
T_i	temperatura en la interfase aire-materia	$^{\circ}\text{C}$
T_s	temperatura de la superficie	$^{\circ}\text{C}$
v	velocidad superficial del aire	m. s^{-1}
V_{hum}	volumen húmedo	$\text{m}^3(\text{kg aire seco})^{-1}$
$V_{\text{hum}}^{\text{N}}$	volumen húmedo en condiciones normales (Anexo II)	$\text{m}^3(\text{kg aire seco})^{-1}$
V_m	volumen molar	m^3/mol
W	humedad en base seca	$\text{kg agua. (kg solido seco)}^{-1}$
W_{crit}	humedad al final de la zona de secado a flujo constante	$\text{kg agua. (kg solido seco)}^{-1}$
W_{eq}	humedad en el equilibrio	$\text{kg agua. (kg solido seco)}^{-1}$
W_i	humedad en base seca inicial	$\text{kg agua. (kg solido seco)}^{-1}$
W_s	humedad en la superficie de la muestra	kg.kg^{-1}
Y	humedad absoluta del aire	$\text{kg agua. (kg aire seco)}^{-1}$
Y_a	humedad absoluta del aire de secado	$\text{kg agua. (kg aire seco)}^{-1}$
Y_{eff}	humedad absoluta del aire efectiva en la interfase aire-materia	$\text{kg agua. (kg aire seco)}^{-1}$
Y_i	humedad absoluta del aire en la interfase aire- materia	$\text{kg agua. (kg aire seco)}^{-1}$
Y_{sat}	humedad absoluta en la saturación	$\text{kg agua. (kg aire seco)}^{-1}$

Símbolos

α	nivel de significancia	[-]
γ_{gs}	energía de interfase gas-sólido	J.m ⁻²
γ_{lg}	energía de interfase líquido-gas	J.m ⁻²
γ_{sl}	energía de interfase sólido-líquido	J.m ⁻²
λ	conductividad térmica (Anexo III)	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
μ	viscosidad dinámica	Pa.s
ν	viscosidad cinemática	m ² .s ⁻¹
ρ	densidad	kg.m ⁻³
ρ_a	densidad del aire húmedo	kg.m ⁻³
ρ_s	densidad del sólido	kg.m ⁻³
σ	tensión superficial	N.m ⁻¹

RESUMEN

La presente tesis doctoral se inscribe en el contexto para el proceso del secado convectivo y la valorización de lodos de depuración generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Antonio de Carapongo, ubicada en el distrito de Lurigancho-Chosica, provincia y departamento de Lima, Perú. La gestión sobre la cantidad de lodos generados en las estaciones de depuración de aguas residuales será un problema importante a resolver para darles una destinación final de valorización agrícola y así minimizar la contaminación ambiental que podría afectar al medio ambiente.

Por lo tanto, es importante darle al lodo una estabilización para su valorización agrícola. Asimismo, minimizar la contaminación ambiental causada por los vertidos de aguas residuales sin tratamiento y por lodos de depuración sin una destinación de valorización agrícola.

Ha sido presentada una descripción general del tratamiento de aguas residuales, procesos realizados de acuerdo a las especificaciones de las normas ambientales. Luego las muestras de lodos utilizadas fueron caracterizadas para darle una valorización agrícola.

Se estudia en el secado convectivo de lodos residuales (lodos producidos en la estación de depuración de aguas residuales San Antonio de Carapongo, Lurigancho-Chosica) la influencia de las condiciones externas (la temperatura, la velocidad superficial y la humedad del aire) en la cinética de secado del lodo residual durante el tratamiento de estabilización del lodo residual. Además, se han relacionado las leyes de la velocidad en el equilibrio con lodos residuales y la naturaleza.

Palabras clave: Aguas residuales, Lodo de depuración, Secado convectivo, Tratamiento de lodos, Estabilización, Valorización de lodos. Leyes de la velocidad.

ABSTRACT

This doctoral thesis is part of the context for the convective drying process and the valorization of sewage sludge generated at the wastewater treatment plant (WWTP) San Antonio de Carapongo, located in the district of Lurigancho-Chosica, province and department of Lima, Peru. The management of the quantity of sludge generated in sewage treatment plants will be an important problem to be solved in order to give it a final destination for agricultural valorization and thus minimize environmental pollution that could affect the environment.

Therefore, it is important to give it the sludge a stabilization for its agricultural valorization. Also, minimize environmental pollution caused by discharges of untreated wastewater and by sewage sludge without agricultural valorization destination.

It has been presented a general description of the treatment of wastewater processes realized according specification environmental regulations. Then, the sludge samples used were characterized to give an agricultural valorization.

The influence of external conditions (temperature, surface velocity and air humidity) on sewage sludge drying kinetics during sewage sludge stabilization treatment is studied in convective sewage sludge drying (sludge produced at the wastewater treatment plant San Antonio de Carapongo, Lurigancho-Chosica). Also, the laws of velocity in equilibrium with sewage sludge and nature have been related.

Keywords: Wastewater, Sewage sludge, convective drying, sludge treatment, stabilization, sludge valorization, Laws of velocity.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

La depuración de aguas residuales, en una unidad de proceso comprende un tratamiento biológico que origina una biomasa o lodo de depuración. La depuración biológica consiste en la eliminación por una flora microbiana de las materias asimilables contenidos en el agua residual, principalmente de materias orgánicas biodegradables, de compuestos nitrogenados y de fosfatos. Una parte de la energía que resulta de la degradación de la materia asegura el crecimiento de los microorganismos. Luego, las nuevas células generadas durante el proceso forman el subproducto del proceso, denominado lodo.

El incremento de subproductos, denominados lodos, generados durante el tratamiento de aguas residuales es un problema a resolver. La generación del subproducto del proceso se incrementará en el futuro y su gestión para darles una destinación final de valorización será muy importante, de esta manera minimizar sus efectos medioambientales, tanto en suelos, ríos, mares y aire.

En el presente trabajo una destinación posible de valorización, para minimizar la contaminación ambiental, ha sido darle al lodo residual B una destinación de valorización agrícola. En efecto, los lodos B serán tratados para darles una valorización en el acondicionamiento del suelo y ser utilizados como sustrato en cultivos agrícolas o empleados en la recuperación de terrenos industriales en beneficio de la agricultura. Para tal efecto, a los lodos se les dará una estabilización a través del proceso de la operación unitaria del secado convectivo y mediante agregación de sustancia alcalina, de tal manera que el trabajo de investigación realizado beneficiará a la agricultura y al medio ambiente.

Por consiguiente, debido a la existencia de un rigor en la reglamentación medio ambiental, así también al:

- o Aumento del número de estaciones de depuración
- o Aumento cada vez mayor de lodos generados durante la depuración de aguas residuales domésticos, luego su destinación final de valorización se hace cada vez más problemático. Por lo tanto, es importante darle una destinación final de

valorización agrícola al lodo generado en beneficio de cultivos agrícolas y de la minimización de la contaminación ambiental.

1.1. Situación problemática

Este trabajo se realiza en el marco de una investigación con la finalidad de darles una destinación final de valorización a los lodos generados, que han sido denominados A y B, producidos en una estación de depuración de aguas residuales domésticos.

Luego este trabajo se realiza para darles una destinación final de valorización al subproducto del proceso de depuración de aguas residuales denominados lodos A y B, que representan a las muestras de lodos de depuración A y B recogidas para desarrollar este trabajo.

El trabajo realizado resulta como consecuencia del incremento de lodos de depuración generados en la estación de depuración citada y en otras estaciones de depuración similares que necesitan ser tratadas y gestionadas para darles una destinación final de valorización agrícola a los lodos residuales A y B. Para tal fin es necesario realizar los procesos de secado convectivo y estabilización de los lodos de depuración A y B, asimismo se consideran los problemas de gestión debido a la cantidad creciente de lodos residuales producidos y la aplicación de normas ambientales reglamentarias que han sido consideradas.

El presente trabajo realizado contribuye a mejorar los conocimientos en la operación unitaria de secado convectivo de los lodos de depuración A y B, subproductos generados durante el proceso del tratamiento de aguas residuales. Así también de su estabilización y darles una destinación final de valorización agrícola al lodo de depuración B en beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación ambiental.

En el contexto peruano del tratamiento de aguas residuales, las operaciones unitarias del secado convectivo de los lodos residuales A y B está destinada a desarrollarse en un futuro próximo. En efecto, la destinación final de lodos generados de la depuración de aguas residuales domésticos será crucial, según los expertos esperan que la producción anual supere las 60000 t/año de lodos en Lima metropolitana, generación estimada de lodos deshidratadas en

estaciones de depuración de aguas residuales. Los procesos de la operación unitaria de secado convectivo realizados en los lodos residuales A y B es una etapa esencial después de la deshidratación, tanto antes de la valorización agrícola como de la incineración, que seguirán siendo las dos principales destinaciones finales de valorización de los lodos residuales A y B.

A pesar del evidente interés del secado de lodos de depuración, este proceso es todavía mal manejado y el empirismo domina.

La finalidad de este trabajo consistió en estabilizar las muestras del lodo B generados en la depuración de aguas residuales con el propósito de darles una destinación final de valorización agrícola al lodo de depuración B y ser utilizado para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo como fertilizante y/o sustrato, y sus valores fertilizantes puedan ser utilizados en beneficio de la agricultura, en la fertilidad del suelo, y del medio ambiente.

La protección del medio ambiente es muy importante para que se pueda lograr la minimización de la contaminación ambiental.

Consciente que la depuración de aguas residuales urbanas se inscribe dentro de esta gestión y así también de los impactos negativos medioambientales, SEDAPAL ha considerado un sistema de gestión medioambiental para la operación de la mayoría de unidades de proceso del tratamiento de aguas residuales. Este sistema está considerado dentro del marco de una gestión rigurosa de impactos medioambientales que tienden hacia una mejora continua de los desafíos medioambientales. Sin embargo, SEDAPAL deberá estar comprometido en la búsqueda permanente de lugares o destinaciones finales de valorización y de la eliminación de lodos de depuración respetando el medio ambiente.

Es en este contexto en el presente trabajo realizado al subproducto del proceso de depuración de aguas residuales domésticos, muestras de lodos generados en el proceso de depuración de aguas residuales que han sido denominados lodos A y B, se le dará una destinación final de valorización agrícola para el acondicionamiento del suelo, con la finalidad que este trabajo pueda beneficiar a la agricultura y al medio ambiente en la minimización de la contaminación ambiental.

Debido al incremento de lodos de depuración generados por las PTAR domésticas, se han desarrollado nuevas metodologías para disminuir la cantidad de lodos generados o valorizarlos.

Entre estas metodologías, el esparcido agrícola tiene importancia porque el lodo podría reemplazar o complementar los fertilizantes químicos. Pero, es necesario darles un tratamiento previo (estabilización, higienización del lodo, y agregarle un material estructurante que le aporte porosidad) al lodo de depuración B antes de aplicarlo para eliminar los contaminantes orgánicos, metales pesados, y microorganismos patógenos.

El lodo B estabilizado conteniendo los valores fertilizantes del lodo residual es una buena alternativa para su gestión teniendo en cuenta las especificaciones de las normas ambientales reglamentarias.

La identificación de una solución adecuada para la destinación final del lodo de depuración generado en el tratamiento de aguas residuales domésticas es un tema estratégico.

La cantidad de lodos producidos aumento en los últimos años, y puede ser considerado como un sustrato muy interesante para los procesos de valorización agrícola del lodo residual B.

Asimismo Meneses y Cabrera (2022), hace referencia sobre las leyes de la velocidad, modelos matemáticos que han sido expresados y considerados con el propósito de explicar el equilibrio que existe en un sistema extragranular e intragranular del lodo y/o con sus alrededores (Ibarz & Barbosa-Cánovas 2005), (Kreith et al. 2012), (Treybal 1981), (Smith 1973), (Ocon & Tojo 1982), (Incropera & De Witt 1999), (Brennan et al. 1998), (McCabe & Smith 1972), (Holman 1998), (Perry 1973,1974,1980,1982,1992), (Seader et.al. 2010), (Himmelblau 1977), (Aguado et al. 1999), (Hougen et al. 1964), (Kern 1986), (Geankopolis 1982), (Brown et al. 2004), (Aguirre 1970), (Sharma et al. 2007), (Petrucci et al. 2002), (Semishin 1967), (Dominguez 1966), (Balshizer et al. 1985), (Benitez 2009), (Foust et al. 1970), (Ruiz 1995), (Coulson et al. 1999), (Levenspiel 1993). Se observó que el mecanismo de transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor. Equilibrio con su alrededor que pueden ser observados para los

diferentes tipos de mecanismos de transporte de materia, energía y cantidad de movimiento. Así también en este trabajo realizado se observan en diferentes lugares del Perú y otros lugares del extranjero, que los diferentes mecanismos de transporte molecular se transmiten en estado de equilibrio con su alrededor. De igual modo, en este trabajo se relacionan las leyes de la velocidad con los mecanismos de transporte molecular para un sistema extragranular e intragranular del lodo y/o los alrededores y el estado de equilibrio en ese sistema con el medio exterior. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados en este trabajo de investigación han permitido confirmar que los lodos de depuración estabilizados de aguas residuales domésticas no generan ningún impacto medioambiental.

Se muestran en las Figuras I.1 a I.12, la laguna de Purhuay, laguna de Tishguyoj, laguna de Salkantay, acueductos de Tambomachay y Tipón, la cumbre del volcán MISTI, la comunidad de Puerto Ocopa, Satipo, la Comunidad de Camajeni y otros lugares del Perú. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.

Asimismo, en las siguientes Figuras I.1 a I.12 de igual forma en las Figuras I.18 a I.21, así también en el capítulo IV (Figuras IV.40 a IV.50) pueden verse diferentes lugares del Perú y de otros países, lugares donde se pueden verificar los mecanismos de transporte molecular y el estado de equilibrio con sus alrededores. Las leyes de la velocidad se presentan en un sistema intragranular y extragranular de los lodos de depuración A y B, muestras de lodos residuales denominados A y B.

Por lo tanto, los procesos de transporte de energía, materia y cantidad de movimiento se presentan para un sistema formado por lodos residuales A y B, y de igual modo se presentan en la naturaleza, procesos de transporte del flujo de cierta cantidad física transportada definidos por las leyes de la velocidad que se dan durante la operación unitaria del secado convectivo, y el equilibrio que existe con la naturaleza. Luego las leyes de la velocidad ocurren en ambos sistemas (sistema formado por los lodos residuales A y B y/o la naturaleza).

En consecuencia, los procesos de transporte que se presentan durante el transporte molecular en un sistema formado por los lodos A y B, y los procesos de transporte que se presentan en la naturaleza, en ambos sistemas los

procesos de transporte se relacionan con el flujo de cierta cantidad física transportada y se encuentran en estado de equilibrio con su alrededor.

Los resultados obtenidos en este trabajo realizado, durante la estabilización del subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales (muestras denominadas lodos A y B), muestran que las principales variables externas durante el proceso de la operación unitaria para el secado convectivo de los lodos de depuración A y B tienen efecto en la estabilización del lodo de depuración A y B. Resultados que se consideran para obtener una mejor estabilización del lodo de depuración B y darles una destinación final de valorización agrícola al lodo residual B.

Así también, se pueda alcanzar la minimización de efectos negativos en el medio exterior, causados por vertidos de aguas residuales sin tratamiento asimismo por lodos de depuración de aguas residuales no estabilizados, sin una destinación final de valorización agrícola, de esa manera minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente y se pueda lograr el equilibrio con la naturaleza.



Figura I.1. *Laguna de Purhuay, Huari, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.*

Luego en el presente trabajo realizado se considera relacionar las leyes de velocidad, para un sistema determinado relacionando las leyes de la velocidad con los lodos residuales A y B, con las obras hidráulicas incaicas de asombrosa perfección construidos en el Cuzco y los diferentes lugares que han sido visitados en el Perú y otros países, con la valorización agrícola de los subproductos del proceso de la depuración de aguas residuales, lodos A y B, que han sido incluidos en el contexto del sistema de la contaminación ambiental y del equilibrio con la naturaleza.

Los efectos que se dan en un sistema considerado se observan en los diferentes lugares que han sido visitados, mostrándose algunas de ellas en las figuras consideradas en este trabajo.



Figura I.2. Distrito de Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.3. *Laguna de Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.*

Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento causan efectos negativos en el ecosistema y los efectos negativos se podrían minimizar mejorando los procesos industriales, para obtener el agua depurada y el lodo de depuración como subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales urbanos, lodos que necesitan un proceso de tratamiento para su transformación en un producto de calidad y gestionados para darles una destinación de valorización agrícola para el esparcido agrícola, en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.



Figura I.4. Laguna de Tishguyoj Chavín, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.5. Laguna de Salkantay, Cusco. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.6. Acueductos de Tambomachay, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en dos canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.7. Acueductos de Tambomachay, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en dos canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.8. Acueductos de Tipón, Cusco. Obra hidráulica sorprendente y de gran perfección, construido para la circulación del flujo de fluido en cuatro canales de salida. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.9. Cumbre del Volcán MISTI, Cráter del Volcán, Arequipa. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.10. Embarcadero de Remolinos de la comunidad de Puerto Ocopa, distrito de río Tambo, Provincia de Satipo, rumbo a la comunidad de Camajeni (pueblo Asháninka). Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.11. Comunidad de Camajeni, pueblo Asháninka, Satipo. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura I.12. Comunidad de Camajeni, pueblo Asháninka, Satipo. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.

Las leyes de la velocidad, modelos matemáticos expresados para el flujo de cierta cantidad física transportada, se presentan en un sistema intragranular y extragranular de los lodos de depuración A y B también se presentan en la naturaleza y el equilibrio que existe durante el proceso de la operación unitaria del secado convectivo entre los lodos residuales A y B con la naturaleza. Luego las leyes de la velocidad ocurren en ambos sistemas (sistema formado por los lodos residuales A y B y/o la naturaleza).

Los tipos de mecanismos para la transmisión de calor y la absorción de energía radiante por una superficie sólida, similar del lodo de depuración, se pueden asociar para describir y verificar las leyes de velocidad anteriores con el fin que se puedan explicar la contaminación ambiental y el efecto invernadero, causados por la deforestación, y los procesos industriales (por ejemplo, lodos residuales sin una destinación final de valorización agrícola).

Aunque el volumen de oxígeno disponible equivale a 1/5 del aire, se extinguiría sino retorna al aire a través del proceso de la fotosíntesis (conversión de la materia inorgánica en materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz. Mediante la fotosíntesis la energía luminosa es absorbida y almacenada, y luego utilizado en la síntesis de compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos).

Luego, en los procesos industriales para la depuración de aguas residuales se están generando residuos sólidos sin tratamiento y un potencial impacto negativo para el ecosistema. Como consecuencia según los resultados obtenidos en este trabajo, sobre la cantidad de lodos generados en las PTAR que necesitan ser tratados para darles una destinación de valorización agrícola en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental.

Según (Climate System Analysis Group 2017), manifiestan que en 2017 recortaron el uso del agua para consumo doméstico a 87 litros por persona y día. Se recortó un 60% los suministros para la agricultura y 45% a los comercios, se prohibió regar las aceras y jardines, llenar piscinas privadas. Todo para evitar llegar al “Día Cero”.

León (2018), indicó que en Lima el 2004 ocurre un problema parecido, debido a que no llovía en los andes peruanos. Por lo tanto, SEDAPAL toma la decisión de reducir el uso del agua potable en diferentes distritos de Lima. Pero el 2005 se normalizaron los periodos de lluvias y no ocurrió el “Día Cero”.

Además, las aguas residuales tratadas van facilitar utilizar un mayor volumen de agua potable, utilizado de forma incorrecta para regar espacios verdes urbanos, para beneficio de la población. El agua residual depurada se podría utilizar para el riego de nuevos espacios verdes en Lima (se tiene aproximadamente 2 m² de espacios verdes por habitante, la OMS sugiere 9 m² por habitante). El agua residual depurada también puede ser utilizada como agua de proceso en la industria (León 2018).

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI 2014), (SUNASS 2015), (SEDAPAL 2014) en el Perú el número de estaciones de depuración de afluentes es 163, y en Lima metropolitana operan 43, siendo 21

de ellas administradas por SEDAPAL, 8 por municipalidades, y el resto por otros (universidades, club, ministerio de defensa).

Se muestran las figuras del volumen de aguas residuales tratadas, las tecnologías utilizadas, el número de plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, en Lima metropolitana y la distribución de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Figuras I.13, I.14 y I.15).

En Santiago de Surco-Lima, para el riego de las áreas verdes de dicho distrito se utilizan las aguas depuradas. La fuente de las aguas residuales utilizadas para el proceso de la depuración, es doméstico e industrial. El agua contaminada proveniente del río Surco es recuperado con la finalidad de regar los espacios verdes urbanos. Ingresa al proceso 63 m³/h de agua residual (Municipalidad de Santiago de Surco 2016).

La cantidad de agua residual que genera al día una persona en el Perú, es: en la Selva: 136 L/hab/día; en los Andes: 144 L/hab/día; en la Costa: 145 L/hab/día (Figura I.17).

Puede verse en la Figura I.17 que en el año 2024 el Perú generara más del doble de aguas residuales que actualmente manejan las EPS. En el año 2012, se generaba 2 217 946 m³/día y en el 2024 sería 4 842 579 m³/día. (las EPS 2012 y SUNASS).

Es la evaluación de las estaciones de depuración de aguas residuales en el marco del funcionamiento de las empresas de saneamiento (SUNASS 2015).

Asimismo, en Lima metropolitana se produce alrededor de 1 202 286 m³/día de aguas residuales y de este volumen que ha sido producido solamente son conducidos para un proceso de depuración 254 966 m³ (Figura I.13).

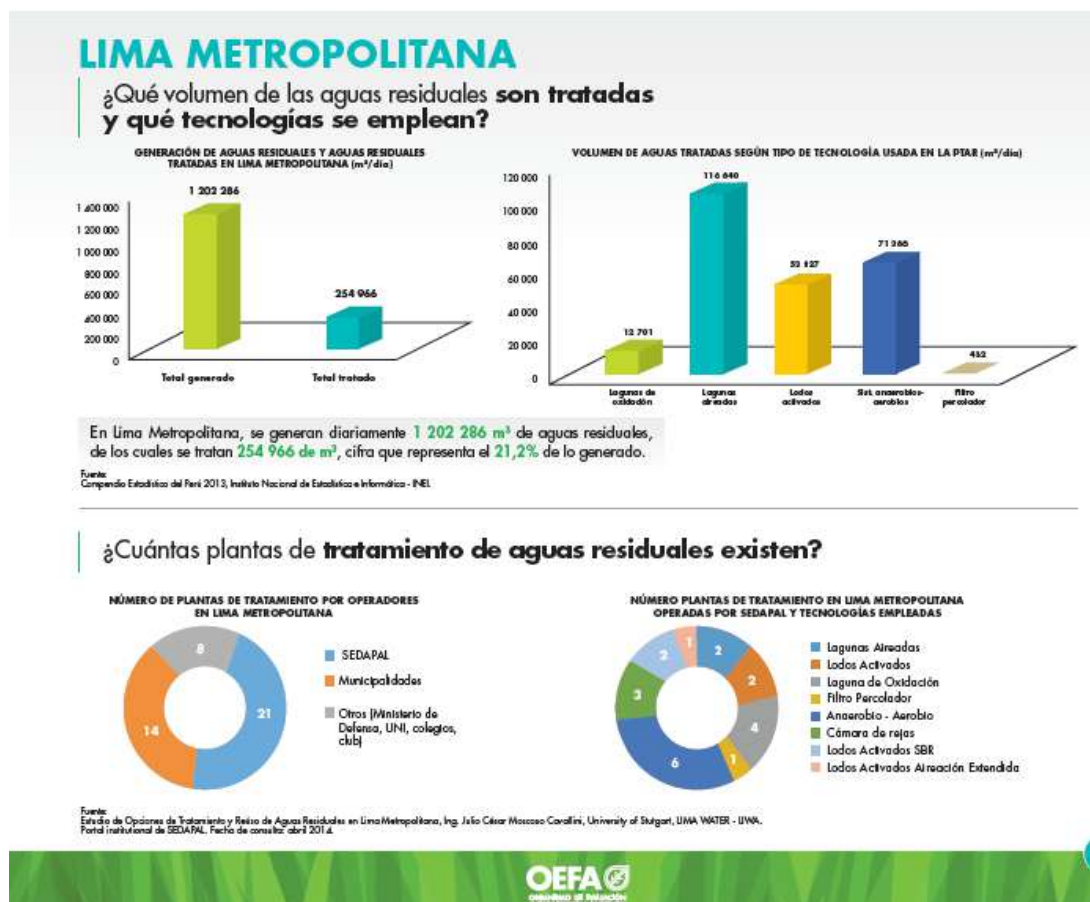


Figura I.13. Volumen de aguas residuales tratadas, tecnologías empleadas, y número de PTAR en Lima metropolitana.

Nota: Portal institucional de SEDAPAL. Fecha de consulta abril 2014.

Puede verse en la Figura I.13 que en Lima metropolitana existen 22 PTAR administrados por diferentes operadores (municipalidades, otros) y 21 PTAR operados por SEDAPAL, y las tecnologías empleadas son: Lagunas Aireadas, Lagunaje, Lodos Activados, y otras tecnologías utilizadas (SEDAPAL 2014). Tratamiento de aguas residuales. Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima (SEDAPAL 2015).

¿En qué plantas de tratamiento (PTAR) se tratan las aguas residuales y en qué porcentaje (%)?



Fuente: Portal institucional de SEDAPAL. Fecha de consulta: abril 2014.

Para tener en cuenta:



Figura I.14: Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y porcentaje de tratamiento.
Nota: Portal institucional de SEDAPAL. Fecha de consulta abril 2014.

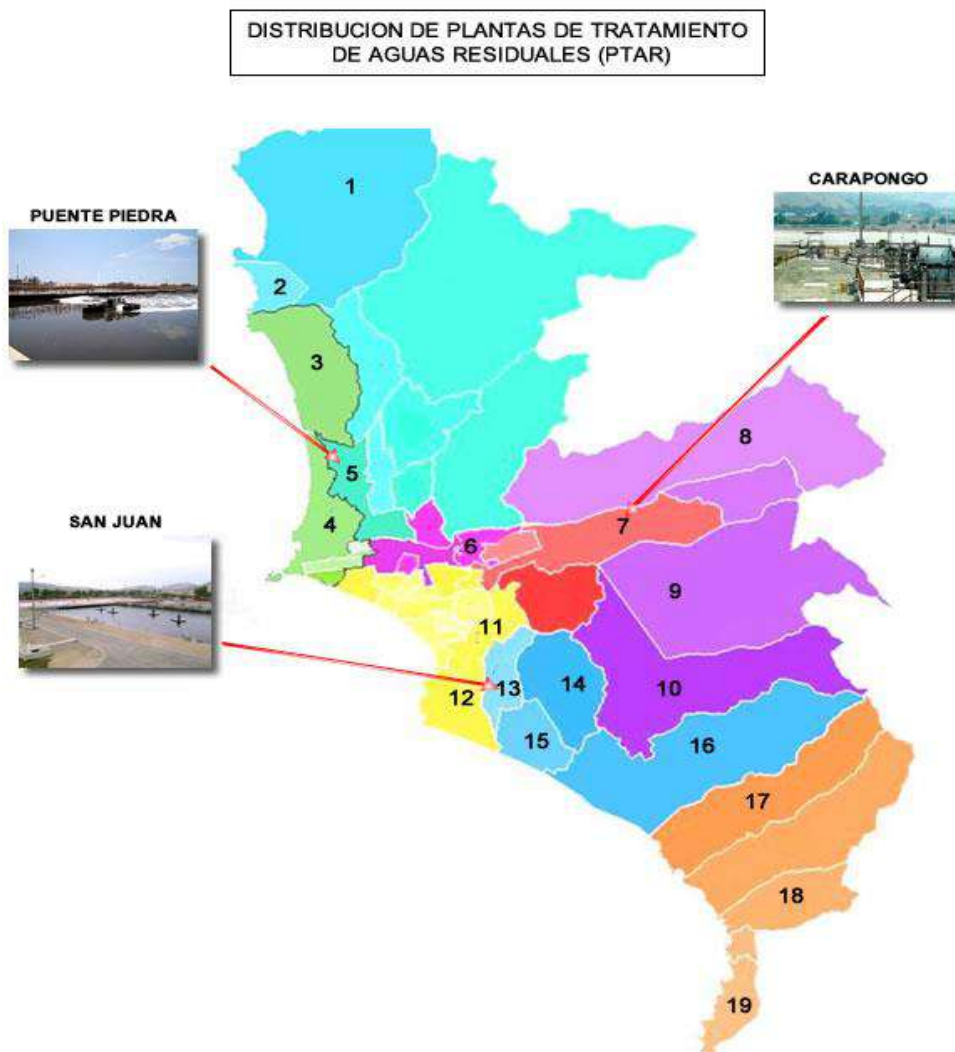


Figura I.15. Ubicación de las estaciones de depuración de aguas residuales.
 Nota: Innova ambiental. Solvi.

La Figura I.16 muestra que el Perú genera aproximadamente un volumen de 2 217 946 m³/día de aguas residuales, 32% de este volumen producido es conducido a un proceso de depuración (Las EPS y su desarrollo 2013-2012, SUNASS).

Puede verse en la Figura I.14 el caudal de tratamiento que ingresan al proceso en las PTAR de Lima metropolitana en las zonas norte, sur y centro es: 3960 L/s, 9643L/s, y 701 L/s respectivamente. Portal institucional de (SEDAPAL 2014).

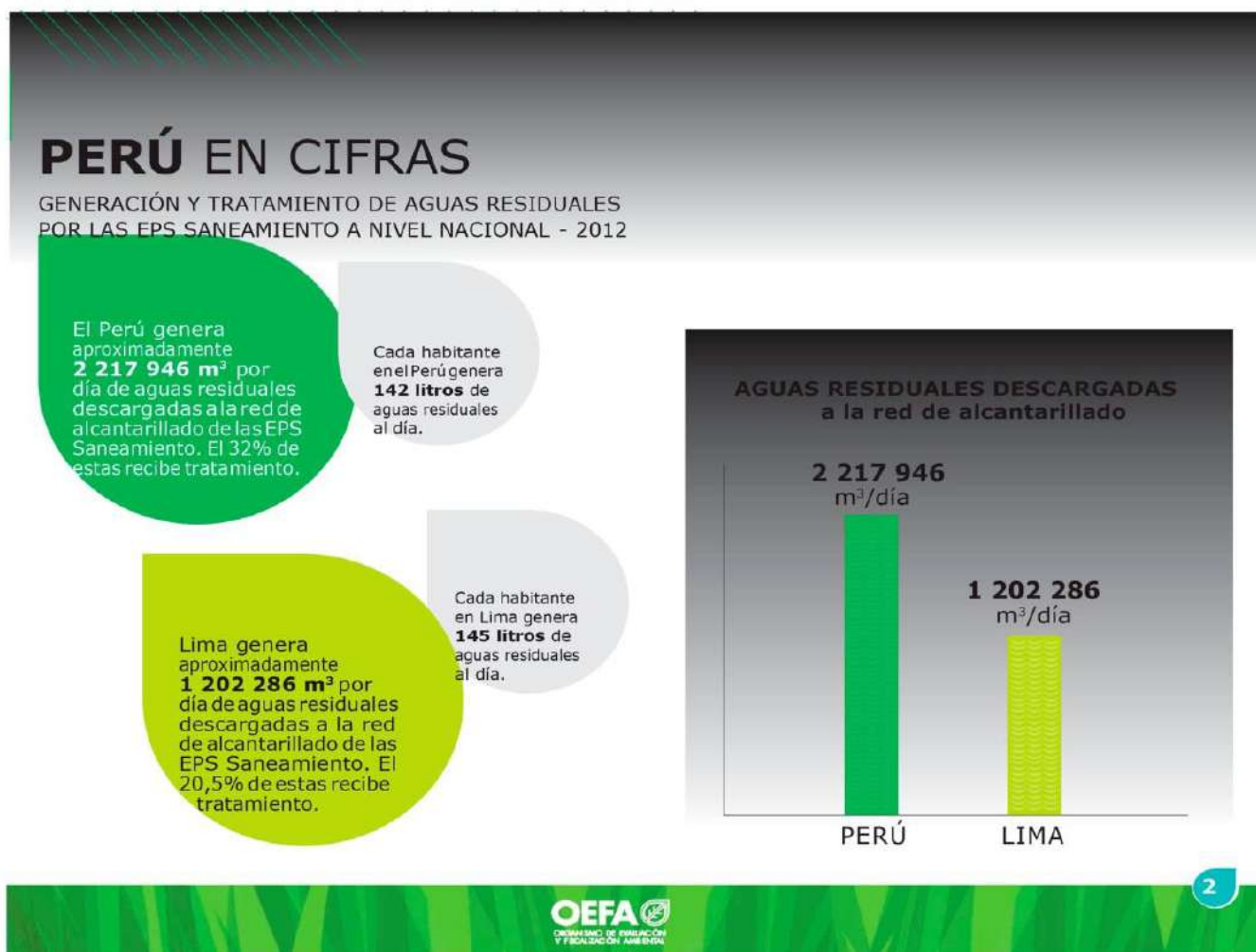
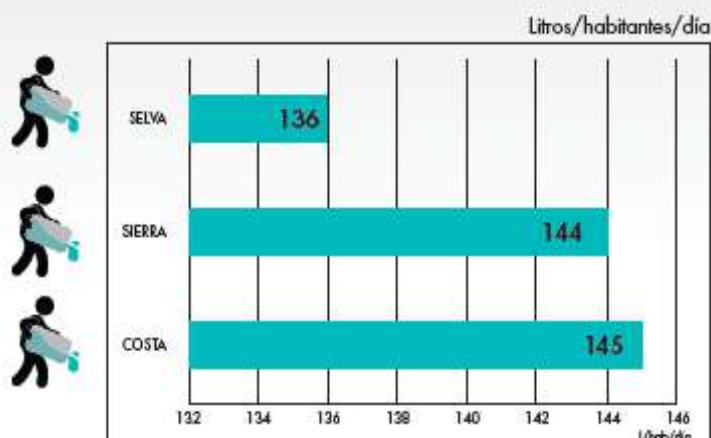


Figura I.16. Producción y depuración de aguas residuales por las Entidades Prestadoras de Servicios de saneamiento en el Perú.

Nota: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

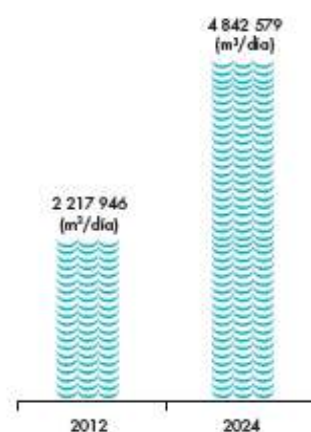
En la Figura I.17 se muestra el volumen de aguas residuales que es producido por persona durante el día y así también el pronóstico para la producción de aguas residuales que comprenden los años 2012 a 2024.

¿Qué cantidad de agua residual genera al día una persona en el Perú?



Evolución de la generación de aguas residuales en el Perú

En el año 2024, el Perú generará **más del doble de aguas residuales** que actualmente manejan las EPS.



Fuente:
Las EPS y su Desarrollo: 2013, Datos 2012, Gerencia de Supervisión y Fiscalización - SUNASS.
Las EPS y su Desarrollo: 2012, Gerencia de Supervisión y Fiscalización - SUNASS.
PERÚ: Estimaciones y Proyecciones de Población Departamental, por Años Calendario y Edades Simplex: 1995 - 2025, Boletín Especial N° 22, INE, Noviembre 2010.

OEFA
ORGANISMO DE EVALUACIÓN
Y FISCALIZACIÓN AMBIENTAL

17

Figura I.17. Volumen de aguas residuales generado por persona durante un día.
Nota: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

En la Tabla I.1 se muestra la generación estimada de lodos de depuración deshidratadas en PTAR de Lima metropolitana para la zona Norte es de 6048 t/año y 12408 t/año; para la zona Este es 5280 t/año y 11520 t/año; para la zona Sur es 1720 t/año y 2380 t/año, lodos producidos en cada zona durante el primer y segundo año respectivamente, tiempos tomados como referencia para ese periodo considerado (Miranda 2014).

La Tabla I.1, muestra el subproducto de la depuración de aguas residuales, denominado lodo, que han sido producidos durante el proceso de la depuración de aguas residuales, toneladas (t) de lodos producidas para un periodo anual. la Tabla I.2, indica los valores (porcentaje) para la depuración de aguas residuales en el Perú y la Tabla I.3, muestran los volúmenes (m³) descargados de aguas residuales domésticas sin tratamiento.

Tabla I.1. Producción aproximada del subproducto de la depuración de aguas residuales, lodos.

ZONA	PTAR	Distrito	Lodos producidos (t)		
			Durante un mes Primer año/ segundo año	Año1	Año2
NORTE	Ventanilla	Ventanilla – Callao	0/400	0	4800
	Puente Piedra	San Martín de Porres	500/600	6000	7200
	Ancón	Ancón	0/30	0	360
	Santa Rosa	Santa Rosa	4	47	47
ESTE	Carapongo	Ate Vitarte	0/40	0	480
	San Antonio de Carapongo	Lurigancho-Chosica	26/120	230	1190
	Cieneguilla	Cieneguilla	20	230	240
	Santa Clara	Santa Clara	210/620	2410	7220
	Manchay	Manchay	200	2400	2400
SUR	Huáscar	Villa El Salvador	0/40	0	470
	San Juan	San Juan de Miraflores	0/90	1010	1000
	Estación Sur	San Bartolo	60	720	720
	Estación Norte	San Bartolo	0/15	0	180

Nota: Miranda (2014) e Innova ambiental-Solvi.

Tabla I.2. Tratamiento de aguas residuales (porcentaje)

Departamento	2008	2009	2010	2011	2012
Ancash	42.84	46.47	42.82	42.24	41.99
Arequipa	18.08	15.79	15.04	14.75	14.97
Ayacucho	98.72	97.41	99.72	99.17	99.98
Cajamarca	69.82	61.31	53.80	57.40	50.47
Cusco	60.23	66.74	65.65	64.76	59.33
Ica	99.00	98.72	99.84	98.34	99.55
Junín	6.00	5.55	6.97	5.51	5.59
La Libertad	71.23	72.89	67.06	59.39	58.18
Lambayeque	92.09	95.01	88.06	89.91	90.58
Lima	18.89	20.32	20.02	19.92	20.57
Moquegua	60.63	64.63	74.36	68.41	36.04
Piura	50.78	50.86	48.97	44.33	48.47
Puno	67.26	52.21	29.22	59.66	53.14
San Martín	8.22	7.49	6.59	4.94	0.00
Tacna	90.93	86.59	87.83	89.28	77.47
Tumbes	22.79	24.81	29.47	24.74	26.09

Nota. Elaborado por el Ministerio del Ambiente-MINAM.

Tabla I.3. Vertimientos de aguas residuales urbanos sin procesos de depuración (m³)

Departamento	2008	2009	2010	2011	2012
Amazonas	1,086,776.00	3,133,908.00	3,060,170.00	3,264,663.96	3,319,913.00
Ancash	13,935,001.00	12,988,219.00	14,334,130.00	14,303,544.96	13,404,554.00
Apurímac	2,267,898.00	3,065,387.00	3,256,540.00	3,405,923.50	3,058,348.00
Arequipa	26,263,660.00	28,913,797.00	29,766,153.00	28,015,902.93	30,365,383.00
Ayacucho	125,402.00	249,159.00	27,543.00	81,478.00	2,202.00
Cajamarca	4,572,168.00	5,888,388.00	5,779,549.00	5,291,616.65	6,189,286.00
Cusco	6,562,857.00	5,447,191.00	5,284,071.00	5,491,405.91	6,916,190.00
Huancavelica	2,081,437.00	2,172,479.00	2,261,283.00	2,189,188.38	2,211,079.00
Huánuco	9,349,039.00	9,286,294.00	9,336,778.00	9,458,355.58	9,790,763.00
Ica	422,370.00	434,499.00	54,809.00	614,493.49	144,138.00
Junín	26,672,823.00	29,019,696.00	29,598,387.00	29,220,371.83	28,762,560.00
La Libertad	7,722,466.00	7,249,712.00	9,180,965.00	11,634,421.84	13,161,957.00
Lambayeque	3,142,578.00	2,231,619.00	4,365,497.00	3,798,217.23	3,509,706.00
Lima	342,823,317.00	341,551,224.00	348,615,411.00	357,517,606.35	362,104,398.00
Loreto	12,153,042.00	12,694,084.00	12,687,476.00	12,039,916.40	11,081,404.00
Madre De Dios	867,301.00	980,232.00	1,037,993.00	1,261,640.99	1,399,264.00
Moquegua	2,775,661.00	2,606,462.00	1,919,786.00	2,255,875.27	4,479,677.00
Pasco		1,700,059.00	1,309,469.00	2,059,188.95	19,462.00
Piura	16,650,413.00	16,937,277.00	17,868,872.00	20,149,821.62	20,265,166.00
Puno	3,546,204.00	5,465,243.00	8,396,417.00	4,951,082.55	5,824,031.00
San Martín	7,583,913.00	8,533,661.00	9,055,409.00	9,022,302.95	8,933,044.00
Tacna	1,066,687.00	1,574,132.00	1,442,147.00	1,249,741.49	3,027,389.00
Tumbes	4,912,390.00	4,742,947.00	3,599,234.00	4,776,796.14	4,359,840.00
Ucayali	6,016,506.00	6,459,371.00	6,168,466.00	6,588,341.52	7,008,231.00

Nota. Elaborado por el Instituto Nacional de Estadística e informática-INEI.

Puede verse en la Tabla I.1, un incremento de lodos producidos de un año con respecto al siguiente periodo de tiempo, lodos que necesitan ser tratados y gestionados para darles una destinación de valorización agrícola, asimismo se indican en la Tabla I.3 que Lima genera la mayor cantidad de vertimientos de aguas residuales urbanos sin tratamiento de depuración, es decir, sin procesos de transformación del agua residual.

Por lo tanto, para minimizar la contaminación ambiental es importante darle una valorización agrícola al subproducto producido, denominado lodo, después de un proceso de la depuración de aguas residuales domésticos.

Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento causan impactos negativos en el ecosistema. Luego la construcción planificada de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú es importante para tener como productos de la depuración de aguas residuales, agua depurada y como subproducto los denominados lodos de depuración, que podría ser valorizado en la agricultura para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo (valorización agrícola), que es el objetivo del presente trabajo de investigación.

A fin de siempre poder disfrutar de este tesoro que es el agua dulce, las plantas de tratamiento de aguas residuales se han vuelto indispensables. El resultado del tratamiento del agua residual mediante un proceso biológico aerobio es la producción de biomasa llamado todavía lodos, producidos en el tratamiento de aguas residuales, que han sido generados por las PTAR domésticas.

Gestionar estos lodos va devenir en un problema crucial en el futuro. En efecto, actualmente solo una parte de aguas residuales son tratadas, una manera de conservarlo sería depurarlo para obtener el agua clarificada y el lodo de depuración, y darle al lodo una destinación final de valorización y una estabilización con la finalidad de darle una valorización agrícola, de esa manera se pueda minimizar la contaminación ambiental.

En el marco de la política pública de preservación de la calidad de aguas naturales, subterráneas y de ríos, se edificaron plantas de operaciones unitarias para los procesos de la depuración de aguas residuales. Pero estas generan un

subproducto inevitable: los lodos de depuración. Si no le dan un tratamiento adecuado sería un potencial contaminante del medio ambiente.

Asimismo, los impactos negativos en el ecosistema causados por los vertidos de aguas residuales sin tratamiento, se podrían minimizar mejorando los procesos industriales y mediante la depuración de aguas residuales.

La gestión de estos lodos se vuelve tanto más problemática que la puesta en descarga de productos orgánicos sometidos a serias restricciones.

La incineración y el esparcido agrícola constituyen los dos principales sectores de valorización del subproducto, lodo, del proceso de la depuración de aguas residuales. Gestiones importantes a realizar con la finalidad de conservar los ecosistemas lagunares, costeros, y los impactos sobre la biodiversidad.

Desde la prehistoria, los hombres han explotado los recursos naturales de los ecosistemas lagunares y han contribuido a la modificación del medio ambiente con impactos positivos y negativos sobre la biodiversidad.

Así, el hombre ha causado a menudo la destrucción del hábitat y el agotamiento de los recursos. Sin embargo, el impacto negativo del hombre en estos entornos ha aumentado considerablemente desde la revolución industrial, principalmente debido a la eutrofización y la contaminación de las aguas superficiales. Ahora, también se debe tener en cuenta el impacto del cambio climático.

La recuperación de la buena calidad de las aguas superficiales es una condición indispensable para restablecer la calidad ambiental de las lagunas.

Sin embargo, los objetivos de conservación de los ecosistemas pueden ser compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos (pesca artesanal, acuicultura, recreación, turismo). Además, las acciones humanas para conservar y diversificar los espacios naturales a menudo tienen un efecto positivo sobre la biodiversidad (De Wit 2008).

Conferencia científica realizada en la Universidad de Montpellier. Francia, dado por Rutger De Wit (2008) *“El buen y el mal uso de los espacios marítimos: El ejemplo del mar Mediterráneo”*. Las Universidades de Montpellier, Francia, el polo universitario europeo de Montpellier y del Languedoc-Roussillon. Estación mediterránea del medio ambiente costero (SMEL) de Sète, Francia.

En las Figuras I.18 y 1.19 pueden verse la Universidad de Liège, ULg, Bélgica, Facultad de Ciencias Aplicadas, Departamento de Química Aplicada, Laboratorio de Ingeniería Química. Lugar donde he realizado estudios de posgrado, Maestría y Doctorado. Bélgica es un país que admiro y valoro mucho, lo considero como mi segunda patria por haberme dado la oportunidad de seguir estudios de posgrado. En la ULg se desarrollan estudios relacionados a las ciencias ambientales, investigaciones científicas realizadas con el propósito de minimizar el desequilibrio del ecosistema, desequilibrio ecológico prolongado, igualmente en el Perú se realizan investigaciones científicas con el propósito de darle valorización agrícola al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales y favorecer la minimización de la contaminación ambiental.



Figura I.18. Vista de la Universidad de Liège, ULg, Facultad de Ciencias Aplicadas, Bélgica. En la ULg se realizan investigaciones científicas relacionados a las ciencias ambientales, con el propósito de minimizar el desequilibrio del ecosistema, desequilibrio ecológico prolongado.



Figura I.19. *Ingresando a la Universidad de Liège, ULg, Bélgica, Facultad de Ciencias Aplicadas, Laboratorio de Ingeniería Química, primer día de clases para realizar estudios de Maestría y Doctorado. En la ULg se desarrollan estudios relacionados a las ciencias ambientales, con el propósito de minimizar el desequilibrio del ecosistema.*

En las Figuras I.20 y I.21 presente durante la ceremonia de clausura en Montpellier, con los doctores responsables de la Universidad de Montpellier, Francia, para la investigación científica de ecosistemas acuáticos marinos relacionado al doctorado realizado en Bélgica.

También presente, puede verse en las Figuras I.22 y I.23 la conservación de los ecosistemas marinos, en la estación mediterránea del medio ambiente costero de Sète en Montpellier, Francia, que pueden ser compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos (acuicultura), y tienen un efecto positivo sobre la biodiversidad.

Trabajo de investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica.



Figura I.20. *Presente, durante la Ceremonia de clausura de la investigación científica de ecosistemas acuáticos marinos realizado en la Universidad de Montpellier, Francia. Trabajo de Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica,*



Figura I.21. *Presente, durante la Ceremonia de clausura de la investigación científica de ecosistemas acuáticos marinos realizado en la Universidad de Montpellier-Francia. Trabajo de Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica.*



Figura I.22. Estación de acuicultura en Sète, Montpellier. Estación mediterránea del medio ambiente costero de Sète, Francia, compatibles con la explotación racional de recursos biológicos (acuicultura). Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica.



Figura I.23. En la estación de acuicultura en Sète, Montpellier. Estación mediterránea del medio ambiente costero de Sète, Francia, compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos (acuicultura). Investigación científica relacionado al doctorado realizado en Bélgica.

Los impactos negativos y positivos de las actividades realizadas por el hombre sobre los ecosistemas pueden ser observadas y verificadas en Lima metropolitana, así también a nivel nacional, es en ese marco la importancia de darles una destinación final de valorización al subproducto del proceso de la transformación de aguas residuales, es decir, al denominado lodo que se generan después de un proceso de transformación de aguas residuales, y de tal manera minimizar una posible contaminación en los suelos, aguas y los impactos humanos en los ecosistemas lagunares y costeros.

Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento originan impactos negativos sobre el ecosistema, estos impactos negativos se podrían minimizar mejorando los procesos industriales y mediante la depuración de aguas residuales.

Desde los tiempos históricos, el hombre ha contribuido a la pérdida de humedales periféricos, por ejemplo, a través de la conversión en terrenos agrícolas, zonas urbanizadas y portuarias.

Estos humedales periféricos contribuyen muy positivamente al funcionamiento del ecosistema lagunar. Por ejemplo, constituyen zonas de nidificación para la avifauna que utiliza la laguna para alimentarse.

En segundo lugar, los humedales periféricos constituyen una interfase entre la tierra y el ecosistema lagunar y pueden desempeñar un rol importante en la reducción de los compuestos tóxicos y de las sales nutritivas en exceso. Asimismo, contribuyen a la biodiversidad como hábitat para diferentes especies de plantas y animales.

Por último, estos humedales pueden constituir una importante zona de amortiguación en caso de inundaciones y tormentas.

El impacto negativo sobre los ecosistemas de las lagunas ha aumentado de forma espectacular desde la revolución industrial y el aumento de la población humana.

El principal factor es la contaminación de las aguas superficiales con compuestos tóxicos y sales nutritivas. La apertura de las minas en la cuenca hidrográfica sin verdaderas medidas de descontaminación ha contribuido a una contaminación con metales pesados, que hasta la fecha persiste localmente en los sedimentos.

Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento aportan un gran número de contaminantes a la laguna y al mar.

Según (De Wit 2008) los hidrocarburos proceden de las zonas portuarias y por la utilización de barcos. Los productos fitosanitarios utilizados en la agricultura se vierten a las lagunas. Todos estos contaminantes se concentran en las cadenas tróficas y, por lo tanto, los depredadores superiores son los más afectados.

En los países desarrollados se han tomado muchas medidas para luchar contra estas contaminaciones, por ejemplo, prohibiendo el uso de los compuestos más tóxicos, mejorando los procesos industriales y los tratamientos de las aguas residuales.

Sin embargo, ciertos contaminantes, como los metales pesados, persisten en los sedimentos y su removilización mediante dragado o puesta en suspensión resulta peligrosa para el ecosistema. Importantes esfuerzos son todavía necesarios para mejorar sustancialmente la situación.

La reglamentación en los países en vías de desarrollo es a menudo menos restrictiva para los contaminadores y las contaminaciones muy severas aumentan sobre todo en el litoral de estos países con efectos nefastos para sus ecosistemas lagunares y costeros.

La afirmación mencionada es con respecto a los Impactos negativos en los ecosistemas lagunares y costeros, que tiene similitud con la contaminación de las lagunas costeras del litoral peruano, un medio ambiente sensible influenciado por la naturaleza y las actividades humanas.

Luego es importante la construcción planificada de nuevas plantas de operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales y el subproducto del proceso, lodo generado del tratamiento de aguas residuales, reciba un tratamiento para su estabilización y darle una destinación final de valorización agrícola.

El aumento de las sales nutritivas en los cursos de agua debido a la actividad humana induce fenómenos de eutrofización. Estimula el crecimiento del fitoplancton y de las plantas. Este aumento de la turbidez y el mayor crecimiento

de macroalgas es muy desfavorable a las fanerógamas marinas. Este cambio de comunidades es considerado como un cambio de régimen.

Las praderas de fanerógamas marinas retroceden con sus comunidades de animales y microorganismos asociados, lo que representa una importante pérdida de biodiversidad.

Debido al crecimiento de las algas, los contenidos de oxígeno en la columna de agua varían enormemente durante las 24 horas. En las lagunas mediterráneas las biomásas de algas pueden aumentar por encima de un kg m^{-2} .

Cuando tales densidades se alcanzan y cuando el agua está poco agitada y la temperatura elevada, las macroalgas entran repentinamente en una fase de descomposición. Este fenómeno se conoce con el termino científico de crisis distrófica y se caracteriza por un descenso repentino del contenido de oxígeno en el agua y la formación de sulfuro de hidrógeno por parte de las bacterias que respiran sulfatos. Para el mantenimiento de la biodiversidad es muy importante controlar los aportes de sales nutritivas hacia los ecosistemas lagunares.

En los países desarrollados, se han logrado importantes avances que han permitido reducir los vertidos de fosfatos y materia orgánica. Sin embargo, las medidas han sido menos eficaces para el nitrógeno y la situación sigue siendo preocupante (De Wit 2008).

La recuperación de la buena calidad de las aguas superficiales es un requisito esencial para la restauración de la calidad medioambiental de las lagunas. Sin embargo, los objetivos de conservación del ecosistema pueden ser compatibles con una explotación racional de los recursos biológicos. Por ejemplo, la ostricultura y las actividades de pesca artesanales pueden continuar de forma sostenible.

Además, las acciones humanas encaminadas a conservar y diversificar los hábitats suelen tener un efecto positivo en la biodiversidad y la restauración de humedales periféricos y praderas de fanerógamas deberán fomentarse. Ahora, el impacto del cambio climático debe ser tomado en cuenta también.

También es muy difícil de predecir cómo los cambios globales, como la emisión de la temperatura cada vez más elevada y la radiación ultravioleta, influyen en el funcionamiento de las redes tróficas (De Wit 2008).

La afirmación mencionada implica el problema del control de la conservación del agua para disponer agua de calidad, y de la contaminación del agua como consecuencia de la actividad humana, que es importante considerar para conservar la biodiversidad y minimizar la contaminación ambiental. Por lo tanto, es de gran importancia las edificaciones de nuevas estaciones de operaciones unitarias para procesos de depuración de aguas residuales, con la finalidad de obtener agua depurada como producto principal, así también como subproducto del proceso de la transformación de aguas residuales obtener el denominado lodo de depuración, siendo necesario que reciban un tratamiento de estabilización para darle una destinación de valorización agrícola, para beneficiar a la agricultura y a la minimización de la contaminación ambiental.

Asimismo, en el Perú también se han establecido, a través de especificaciones indicadas en las normas ambientales reglamentarias, límites permisibles para la presencia de metales pesados en subproductos del proceso de la depuración del afluente, lodos de depuración de aguas residuales (D.S. N° 003-2010-MINAM, D.S. 015-2017-VIVIENDA para lodos de PTAR).

Según (SUNASS 2017), consideran que la población debe tener presente el uso racional y responsable del agua, de tal manera se pueda justificar las nuevas inversiones para incrementar el volumen de agua a utilizar. Afirmación que ha sido mencionada sugiere la importancia del tratamiento del agua residual, es obtener el agua depurada (para actividades diferentes al consumo humano) y el lodo de depuración (para su valorización agrícola), de esa manera se pueda utilizar en mayor proporción el agua potable para el consumo de la población.

Durante el proceso de la depuración de aguas residuales, poco importa la modalidad del proceso para la depuración de aguas residuales, siempre los lodos se presentan bajo la forma líquida con una fuerte carga de materia orgánica altamente fermentable.

Cualquiera sea la forma de eliminación o de valorización de estos lodos, debido a las características problemáticas presentes, será necesario determinar un tratamiento preliminar de estos últimos.

La utilidad para su valorización agrícola, mediante el esparcido agrícola del lodo, es utilizar los suelos para digerirlo y facilitar la asimilación de sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura.

La oxidación térmica es también la destinación de tratamiento que satisface mejor a los criterios de reducción de volumen y de higienización, puesto que el subproducto del proceso de la transformación de aguas residuales, lodo, ha sido completamente mineralizado y por lo tanto los contenidos de gérmenes patógenos son destruidos. En fin, la valorización de subproductos de la incineración es ahora considerada bajo ciertas condiciones, en hormigones o en técnicas de carreteras (Sibony 1997).

Además, el estudio encuentra pruebas sólidas de que los nutrientes están involucrados en la adsorción de metales y radionúclidos en la biomasa de lodos. Esto significa que el acondicionamiento del suelo con lodo de aguas residuales sigue siendo una estrategia para la recuperación de nutrientes a partir de desechos municipales, aunque son necesarias evaluaciones de impacto a largo plazo de aplicaciones repetidas (Cerne et al. 2019).

Los lodos de aguas residuales recicladas se consideran una fuente potencial de contaminación del suelo por contaminantes orgánicos e inorgánicos y patógenos; elementos potencialmente tóxicos (como zinc, cobre, cadmio, plomo, plata, etc.); hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP); policlorobifenilos (PCB); biocidas y fitofármacos; productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal (PPCP) y residuos; hormonas sintéticas; microplásticos; productos finales del ciclo de vida de la nanotecnología; y microorganismos tales como *Escherichiacoli* o *Salmonella typhimurium* (Rorat et al. 2019).

La selección de la secuencia de procesamiento óptima requiere saber en relación a la composición del lodo, por lo que su determinación en condiciones estandarizadas es necesaria para obtener resultados confiables y comparables. Los procedimientos estandarizados para la caracterización de lodos también son necesarios para apoyar el desarrollo de regulaciones realistas y exigibles (Canziani & Spinosa 2019).

Al comienzo de un nuevo ciclo de registro de datos, es nuestro deber reafirmar nuestro compromiso con este paso ambiental en un instante sobre: La búsqueda permanente de lugares de eliminación de residuos que sean las más respetuosas con el medio ambiente y principalmente como prioridad la valorización agrícola de los lodos de depuración. (Tellings & Goffinet 2011).

Se va caracterizar el lodo de depuración para su valorización agrícola, los lodos son luego evacuados hacia la destinación de valorización. Cuando el lodo ha sido estabilizado se le puede dar una destinación final de valorización para el acondicionamiento del sustrato en beneficio de cultivos agrícolas (valorización agrícola), esparcido agrícola y pueda beneficiar a la agricultura de los valores fertilizantes contenidos en los lodos (a diferencia de los fertilizantes obtenidos de procesos industriales que podrían ser contaminantes).

En caso negativo, los lodos se incineran en hornos específicos, como las plantas de cemento (valorización de materia) o plantas de energía (valorización térmica).

La necesidad del tratamiento de aguas residuales, con la finalidad de minimizar la contaminación ambiental, se va producir como resultado del tratamiento de la generación del subproducto del proceso de transformación de aguas residuales, lodos, normados por el rigor de la reglamentación medio ambiental, según: (D.S. N° 003 -2010-MINAM; D.S. N° 015-2017-Vivienda para lodos de PTAR; Resolución ministerial N° 128-2017-Vivienda).

Las afirmaciones mencionadas aportan una información importante de los diferentes métodos, aplicaciones, procesos de transformación de aguas residuales, estabilización del lodo y darle una destinación para su valorización de lodos generados en las estaciones de operaciones unitarias para la transformación de aguas residuales a nivel nacional y otros países, y la similitud de algunos métodos de depuración que son empleados en algunas plantas de tratamiento de aguas residuales en Lima metropolitana.

Por lo tanto, la valorización agrícola del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, tiene una gran importancia para utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de cultivos agrícolas y minimizar la contaminación ambiental como consecuencia de su uso.

Considerando las fuentes de información revisadas, se puede confirmar que los lodos de depuración de aguas residuales domésticas presentan valores fertilizantes (el nitrógeno y fósforo tienen un contenido entre el 2 a 8% en porcentaje de materia seca). Contienen cal y van permitir dar al suelo relaciones de concentración de potencial de hidrógeno necesarios, aproximadamente neutro.

Así también el posible contenido del fosfato hidratado de amonio y magnesio, que es un compuesto químico fertilizante.

En comparación con el guano de Isla compuesto, fertilizante que contiene una concentración referencial de nutrientes: 8.86% para el nitrógeno total, 9% para el fósforo asimilable, 4.40% de potasio asimilable, 1.69% de magnesio, 14.16% para el calcio (Prodiagro S.A. Perú).

Habiéndose evaluado la concentración de los valores fertilizantes contenidos en el lodo, según resultados mostrados más adelante, y considerando los valores referenciales en el lodo de depuración, ha sido posible estimar que el lodo contiene concentraciones fertilizantes favorables y de cal, que darían al suelo valores fertilizantes, necesarios para una óptima valorización agrícola del lodo. Es una razón para que el esparcido agrícola del lodo sea posible, y pueda beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes.

La utilidad para su valorización agrícola del lodo de depuración, mediante el esparcido del lodo, tiene un doble objetivo: utilizar los suelos para digerirlo y pueda beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes.

Considerando las referencias precedentes, el aumento cada vez mayor de la producción de lodos de depuración que causarían problemas medioambientales, surge la idea de darle una solución a los lodos que no han recibido un tratamiento de estabilización. Luego, el objetivo de este trabajo realizado ha sido darle al lodo, subproducto producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, el tratamiento necesario para su estabilización de tal forma sea posible darle una destinación final de valorización agrícola.

Después del tratamiento de estabilización del subproducto, lodo, producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, el lodo se puede utilizar como sustrato en beneficio de cultivos agrícolas (valorización agrícola, es el

objetivo del presente trabajo). Caso contrario, los lodos deberían ser incinerados en hornos específicos de las industrias de cemento, valorización de la materia, o de las centrales eléctricas, valorización energética.

En consecuencia, en este contexto se inscribe el interés del estudio de la valorización agrícola del lodo que han sido producidos durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, serán mencionados más adelante en el presente trabajo de investigación realizado.

1.2. Formulación del problema científico general

¿Cómo valorizar los lodos residuales generados durante el proceso de la depuración de aguas residuales, en Lima, Perú?

El objetivo de este trabajo realizado ha sido darle una valorización agrícola al subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales que ha sido denominado lodo A y B, representan a las muestras de lodos residuales denominados A y B, y puedan ser utilizados en el acondicionamiento del suelo mediante el esparcido agrícola y beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes, así también a la minimización de la contaminación ambiental (causadas por el vertido de aguas residuales sin tratamiento y por lodos generados en el tratamiento de aguas residuales sin una destinación final de valorización agrícola) y se pueda alcanzar el equilibrio con la naturaleza relacionando los lodos de depuración A y B con las leyes de la velocidad para el flujo de cierta cantidad física transportada en un sistema determinado (sistema formado por los lodos de depuración A y B y/o la naturaleza).

Para llevar a cabo este trabajo realizado es necesario estabilizar al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, muestras de lodos residuales denominados A y B, lodos residuales luego de haber sido estabilizados pueden ser utilizados como sustrato, en beneficio de la agricultura y de la minimización del impacto ambiental (impacto negativo causado por lodos de depuración no estabilizados sin una destinación final de valorización agrícola). En la estabilización del lodo de depuración B se realizan las operaciones unitarias de secado convectivo de las muestras de lodos de depuración A y B, luego se

verifican la influencia de las principales variables externas durante el proceso realizado para la operación unitaria en el secado convectivo de los lodos de depuración A y B.

Los procesos de operación unitaria de secado convectivo del subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales, lodo A y B, están relacionados con las leyes de la velocidad, modelos matemáticos definidos por Fick, Fourier y Newton. Las leyes de la velocidad permiten verificar las variables externas que influyen durante el proceso del secado convectivo.

En consecuencia, es importante darle una estabilización y luego una valorización al subproducto del proceso de la transformación de aguas residuales, lodo, y no desperdiciar las propiedades beneficiosas de los lodos residuales que pueden ser un producto apropiado para el acondicionamiento del sustrato en beneficio de cultivos agrícolas. Asimismo, según resultados obtenidos en este trabajo realizado han permitido confirmar que el lodo residual B estabilizado contienen componentes valiosos, como nutrientes, materia orgánica y carbono orgánico en beneficio de la agricultura para el sistema suelo-planta y del medio ambiente.

Después de la estabilización y valorización agrícola del lodo residual B, utilizado en la siembra experimental de semillas, el lodo B estabilizado es esparcido al suelo para ser utilizado como sustrato en beneficio de cultivos agrícolas. El cultivo agrícola experimental utilizando diferentes tipos de semillas ha sido realizado en la urbanización las Flores de Lima, distrito de San Juan de Lurigancho (SJL), provincia y departamento de Lima, Perú. Luego, el lodo de depuración B que ha sido estabilizado se utiliza en el esparcido agrícola del suelo para la siembra de semillas, y se observaron una buena germinación y buen desarrollo de los diferentes tipos de semillas sembradas.

Por lo tanto, este trabajo se realizó en el marco de una investigación con el objetivo de darle una destinación de valorización al subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales, que han sido denominados lodo A y B y son muestras de lodos de depuración de aguas residuales.

El trabajo realizado resulta como consecuencia al incremento de lodos de depuración generados en la estación de depuración de aguas residuales que necesitan ser tratadas y gestionadas para darles una destinación de valorización agrícola al lodo residual B. Para tal fin es necesario realizar los procesos de operación unitaria de secado convectivo y estabilización de lodos de depuración

A y B, asimismo se consideran los problemas de gestión debido a la cantidad creciente de lodos de depuración producidos y la aplicación de normas ambientales reglamentarias, que se consideran para que se le pueda dar una destinación de valorización al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, que han sido denominados lodos A y B.

La finalidad de este estudio es de contribuir a mejorar los conocimientos en el marco del secado convectivo y la estabilización de lodos de depuración denominados A y B y darles una destinación final de valorización agrícola al lodo de depuración B estabilizado, con el objetivo de utilizarlo como sustrato para beneficio de cultivos agrícolas y de la minimización del impacto ambiental.

1.2.1. Problemas específicos

1. ¿Cómo estabilizar los lodos residuales A y B subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales?
2. ¿Cómo se puede utilizar el lodo residual A y B, subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales?
3. ¿De qué modo los lodos B estabilizados favorecen su uso en cultivos agrícolas (valorización del lodo), subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales?
4. ¿De qué manera las características problemáticas del lodo residual, subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, influyen para su uso en cultivos agrícolas (valorización del lodo) del lodo B como prioridad?

1.3. Justificación del trabajo realizado

a. Justificación teórica

Como resultado de un proceso de tratamiento de aguas residuales domésticos mediante un proceso biológico aerobio se produce la biomasa denominados todavía lodos de depuración. Habiéndose evaluado la concentración de valores fertilizantes en el lodo de depuración, se puede estimar

que el lodo contiene valores fertilizantes favorables y de cal, que dan al suelo los valores de pH requeridos cercanos a la neutralidad. Es una razón para que el esparcido agrícola del lodo de depuración sea posible y pueda beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes, y a la minimización de la contaminación ambiental.

Así también mediante la bio-remediación, procesos biológicos, que proporcionan los conocimientos necesarios con la finalidad de minimizar la contaminación ambiental, la conservación y recuperación del sistema ecológico.

Tiene un valor teórico, va aportar conocimientos para poder valorizar el lodo de depuración y estudiar el tema para investigaciones similares, los resultados se pueden utilizar para mejorar o desarrollar un tema similar y se podría sugerir recomendaciones para futuros estudios relacionados al tratamiento de aguas residuales y a la gestión de los lodos generados después del proceso de depuración de aguas residuales.

b. Justificación práctica

Participación de organismos del gobierno, la población y los medios de comunicación (prensa hablada, prensa escrita, redes sociales, etc.) con la finalidad de hacer realidad la sensibilización y responsabilidad del mantenimiento y conservación del medio ambiente. De igual modo las empresas que conducen los procesos de la depuración de aguas residuales deben respetar el cumplimiento de las normas reglamentarias ambientales, para una buena utilización del agua depurada obtenida del proceso de depuración de aguas residuales, y así también darle una destinación de valorización al subproducto del proceso de la depuración, que ha sido denominado lodo residual.

La importancia práctica de este trabajo realizado, porque el lodo producido servirá para mejorar los suelos agrícolas, llevándolos a la neutralidad, beneficiándose la agricultura de sus valores fertilizantes, y minimizar los impactos negativos que podría causar el lodo sin estabilizar en el ecosistema.

Tiene utilidad metodológica, la investigación puede ayudar a encontrar nuevos métodos para recolectar o analizar datos experimentales y teóricos.

Tiene una importancia social, ayudaría a sensibilizar a la población, realizando programas de educación ambiental, para que puedan comprender la problemática del medio ambiente, minimizar la contaminación del aire, agua y suelo. De esa manera se pueda mejorar la calidad de vida de la comunidad y poder alcanzar el desarrollo sostenible de la población utilizando los recursos naturales.

Es una razón para darle una destinación de valorización agrícola al lodo residual y minimizar problemas medioambientales. Luego se justifica la valorización agrícola del lodo de depuración, generados después de tratamientos biológicos aerobio, que han sido obtenidos durante el proceso de la depuración de aguas residuales.

Por lo tanto, las estaciones que han sido construidas para el proceso de la depuración de aguas residuales es vital y el tratamiento del lodo residual generado sería conveniente para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura.

1.4. Objetivos

a. Objetivo general

Valorar el subproducto generado durante el proceso de la depuración de aguas residuales.

b. Objetivos específicos

1. Determinar el tratamiento para darle estabilización al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, denominados lodos residuales A y B.

2. Determinar el valor de uso de los lodos de depuración A y B subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales.
3. Determinar en qué medida los lodos B estabilizados favorecen su uso en cultivos agrícolas (valorización del lodo), subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales.
4. Determinar de qué manera las características problemáticas del lodo residual, subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, influyen para su uso en cultivos agrícolas (valorización del lodo) del lodo B como prioridad.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco epistemológico de la investigación

Se podría alcanzar un conocimiento para alguna verdad, mediante un medio cognitivo: con el uso de los sentidos (empirismo). En este caso, el objetivo de esta verdad sería una realidad externa a uno mismo (realismo).

Bunge (1980), en el estudio de la epistemología, explica que la epistemología es parte de la filosofía que estudia la investigación científica y el conocimiento científico, la epistemología es actualmente una parte relevante de la filosofía.

Luego, se debe considerar que es imprescindible de una fundamentación epistemológica de la investigación tratada, con el objetivo de que la hipótesis propuesta pueda ser considerada científica y sea objetivamente contrastable con datos empíricos.

Considerando las hipótesis planteadas en el presente trabajo de investigación científica, para la valorización agrícola del lodo de depuración de aguas residuales, subproductos denominados lodos que han sido producidos durante el proceso de la depuración de aguas residuales, lodos producidos en plantas de operaciones unitarias para los procesos de transformación de aguas residuales.

Como consecuencia de la manipulación de las variables correspondientes al lodo de depuración observamos efectos de la estabilización en la materia tratada, dando origen a un producto estabilizado que beneficiara a la agricultura y al medio ambiente. De esa manera dar solución a problemas que podrían generar los subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales en su estado natural.

Problemas que se originan en el planteamiento del conocimiento empírico, pero utilizando el método científico se podría dar respuestas a las hipótesis planteadas, sea contrastable y la idea planteada pueda ser considerada científica. Así también, compatible con el grueso del conocimiento científico.

De acuerdo a Popper, el investigador se encuentra frente a una toma de decisión. Luego, de esa decisión se pueda afirmar que la idea debería ser contrastable y compatible con el conocimiento científico, de esa manera la idea sea aceptado como científica.

Según Bunge (1980), explica que un tema de investigación científica se puede considerar una tecnología siempre y cuando pueda desarrollarse junto a la ciencia contemporánea y así también puedan ser normados mediante la metodología científica.

Se considera una tecnología para que se pueda obtener una valorización del lodo de depuración, subproducto del tratamiento de aguas residuales (que ha sido denominado los productos) y una tecnología de la estabilización de los lodos (que ha sido denominado procesos).

La tecnología de los procesos es importante para que se pueda obtener una estabilización positiva del lodo de depuración, y no exclusivamente los materiales utilizados para realizar el proceso. Pero procurando la organización sistémica de ambos aspectos.

2.2. Antecedentes del problema

En el trabajo de Murcia (2013), evaluó lodos de depuración con el objetivo de que puedan ser adicionados al suelo para favorecer mediante su uso a la agricultura, con la finalidad de poder utilizar sus valores fertilizantes en la agricultura. Este antecedente presenta proximidad con el trabajo realizado, porque utilizando diferentes metodologías para desarrollar los temas propuestos van a conducir al acondicionamiento del suelo en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental.

Hernández (2004), explicó el uso de lodos residuales con la finalidad de verificar sus valores fertilizantes, relaciones de concentración de nutrientes para uso agrícola del lodo residual, y el contenido de metales pesados. El autor indicó los aportes importantes sobre el análisis del lodo de depuración para uso agrícola. Este trabajo también presenta proximidad con nuestro estudio realizado porque al lodo residual se le da una destinación de valorización agrícola.

Cruz (2015), evaluó el lodo residual con la finalidad que pueda ser utilizado para beneficio de la agricultura, y explica su uso del lodo residual para ser utilizado como fertilizante en cultivos agrícolas. Este trabajo es importante para el mejoramiento del suelo en beneficio de la agricultura. Existe proximidad con nuestro trabajo realizado porque al lodo residual se le da una destinación final de valorización agrícola para utilizar los valores fertilizantes del lodo residual.

Pérez (2016), analizó los lodos de depuración para determinar el contenido de metales pesados en la muestra de lodo utilizada. El tema presenta proximidad con nuestro trabajo realizado porque al lodo residual se le da una destinación de valorización agrícola.

En el trabajo de González (2015), destaca la estabilización del lodo residual, proceso de estabilización que tiene importancia para que el lodo residual pueda ser utilizado en actividades agrícolas y se pueda beneficiar la agricultura. El estudio presenta proximidad con nuestro trabajo realizado porque al lodo de depuración se le da una destinación de valorización agrícola.

En Reyes (2008), explica la aplicación del lodo residual para un estudio sobre el mejoramiento de suelos arenosos, lográndose un buen resultado en beneficio de la agricultura y pueda ser utilizado sus relaciones de concentración de nutrientes para cultivos agrícolas y como consecuencia darle una destinación de valorización agrícola.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Purificación de aguas residuales

Los lodos residuales subproductos del proceso de la depuración de aguas residuales están compuestos por diferentes elementos tales como: materia mineral disueltos, compuestos orgánicos y microorganismos, estos últimos resultantes de la depuración biológica aerobia.

Entre los lodos de depuración, subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales, se distingue los subproductos de la depuración de aguas residuales urbanos (domésticos) y de aguas residuales industriales.

Los segundos provienen del tratamiento de aguas residuales industriales. Estas aguas residuales se tratan con mayor frecuencia directamente aguas abajo de su producción.

En el presente trabajo, solo nos ocupamos de los lodos urbanos, con la finalidad de darles una valorización agrícola al lodo producido durante los procesos de tratamiento de aguas residuales domésticos. Después explicaremos cuándo y cómo se producen estos lodos durante el proceso de la transformación de aguas residuales.

2.3.2. Tratamiento de aguas residuales

2.3.2.1. Definición de aguas residuales

Según (OEFA 2014), explican son aguas que presentan relaciones de concentración muy diferentes al agua original, modificaciones que resultan debido a las diferentes acciones que han sido realizadas por el hombre. Luego las aguas residuales para que puedan ser reusados, vertidos al río o mar, necesitan previamente ser conducidos a procesos unitarios para la transformación del agua residual en la unidad del proceso de tratamientos de aguas residuales.

La contaminación de las denominadas aguas residuales puede resultar de muchos factores: diversas descargas domésticas, escorrentías, infiltraciones, etc. Esta contaminación se puede cuantificar por características físicas (MES, olor, etc.), químicas (DQO, DBO₅, Nitrógeno Kjeldahl, nitrógeno mineral, contenido de fosfato, de material tóxico,) y biológico (bacterias, virus,...). La noción de equivalente habitante EH, que representa la carga promedio descargada por habitante y por día, se introdujo para caracterizar los vertidos totales de aguas residuales.

Asumiendo como base la depuración para 1 habitante equivalente produce de 15 a 20 kg de lodos, en materia seca (Apea, 2000), lo que generalmente corresponde a una cantidad de materia fresca cuatro veces mayor teniendo en cuenta la humedad del subproducto generado de la depuración, lodo, después de ser conducidos a una deshidratación a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales.

2.3.3. Clasificación de las aguas residuales

2.3.3.1. Domésticas

Representan las aguas residuales que se originan durante las actividades diarias desarrolladas por el hombre, actividades domésticas y comerciales, que necesitan ser conducidos para un proceso de tratamiento.

2.3.3.2. Industriales

Representan las aguas residuales que se originan durante las diferentes actividades desarrolladas para los procesos industriales de la transformación de la materia, por ejemplo, los procesos agroindustriales, mineros, etc.

2.3.3.3. Municipales

Representan las aguas residuales de origen domésticos a veces mezclados con aguas provenientes de las lluvias, aguas pluviales que circulan hacia los colectores pluviales, o con aguas residuales industriales.

Las aguas residuales vertidos al sistema de alcantarillado que no han sido conducidos para su depuración hacia las estaciones de tratamiento de aguas residuales, serán vertidos hacia los ríos y mares con efectos negativos para la población y el ecosistema.

En las Figuras II.1 y II.2 se muestran la secuencia para la gestión de aguas residuales municipales y las empresas de saneamiento que gestionan el proceso de potabilización del agua para el consumo de la población, respectivamente.

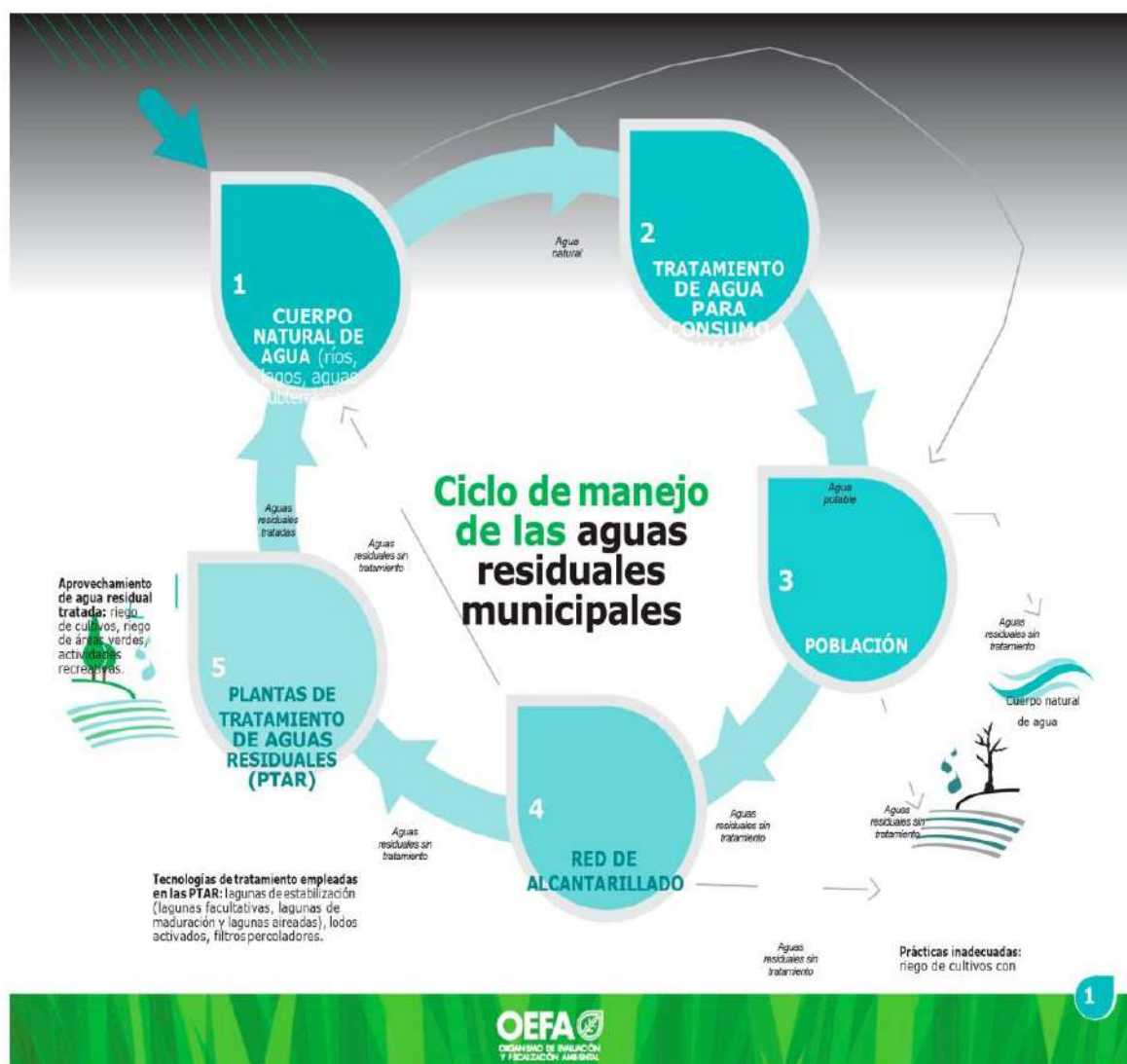


Figura II.1. Ciclo de manejo de las aguas residuales municipales.
 Nota: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

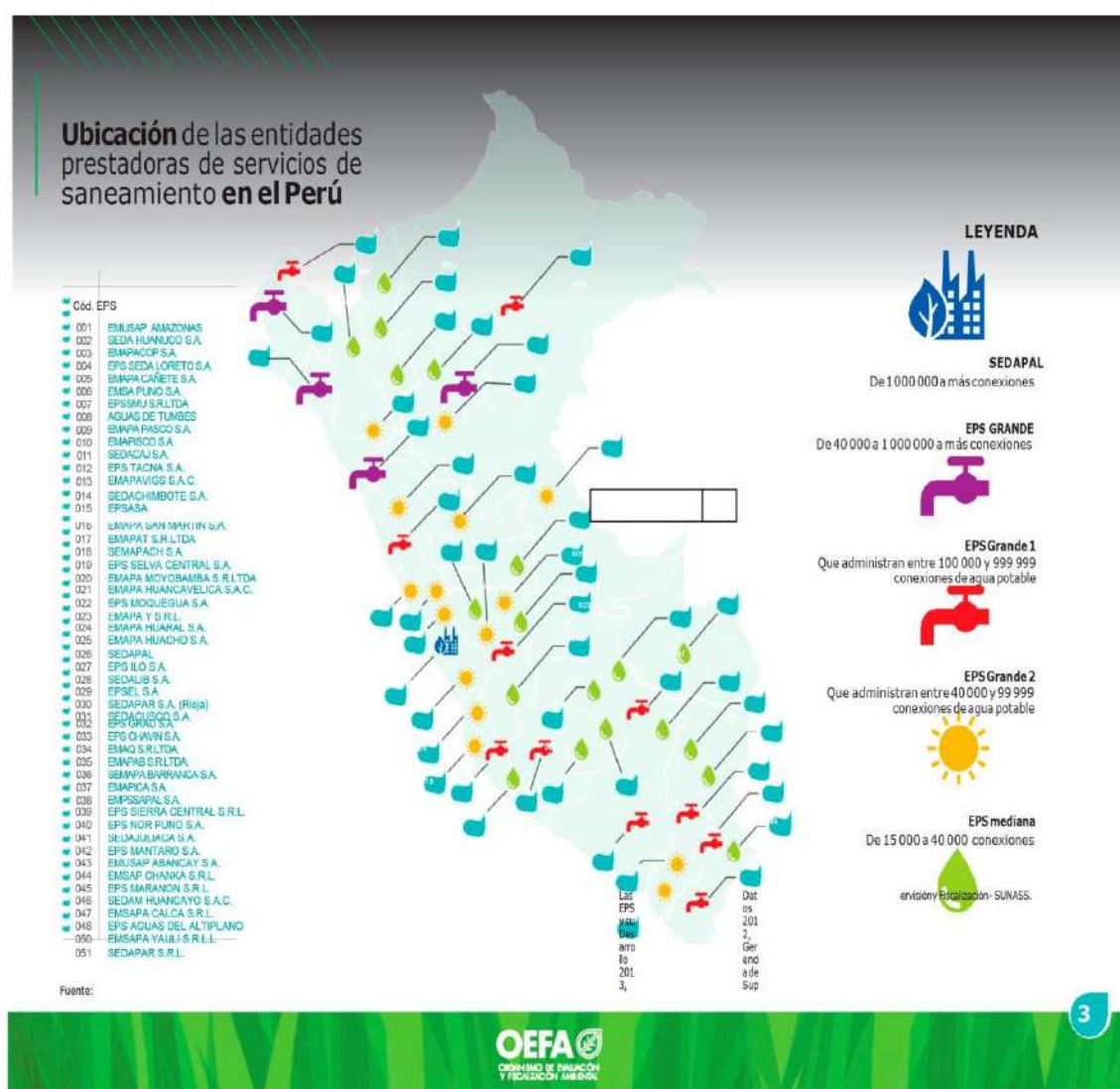


Figura II.2. Empresas de saneamiento que gestionan el proceso de potabilización del agua para el consumo de la población.

Nota. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

2.3.4. Descripción del esquema del proceso para la transformación de aguas residuales

La Figura II.3 representa esquemáticamente las operaciones unitarias realizadas en una planta de tratamiento de aguas residuales, son similares a las estaciones de depuración en Bélgica (Anexo IV: Figuras IV.1A, IV.2A y IV.3A, esquemas del proceso para el tratamiento de aguas residuales de la comunidad de Retinne, Bélgica). En el esquema puede verse que ingresa, a la unidad de proceso, aguas residuales para su tratamiento, y a la salida del proceso se obtiene como producto el agua depurada y como subproducto el lodo residual

que recircula y el lodo excedente es purgado, lodo residual utilizado para la valorización agrícola.

El pretratamiento puede incluir tamizado, eliminación de arenilla y de aceite. El tratamiento primario se limita a las operaciones de separación líquido-sólido y líquido-líquido, como la sedimentación por gravedad y flotación.

El lodo primario que se extrae en el fondo del tanque de sedimentación está compuesto por materia mineral y orgánica. En algunos casos, se realiza un tratamiento de coagulación-floculación para mejorar la sedimentación. Hablamos luego de lodos físico-químicos.

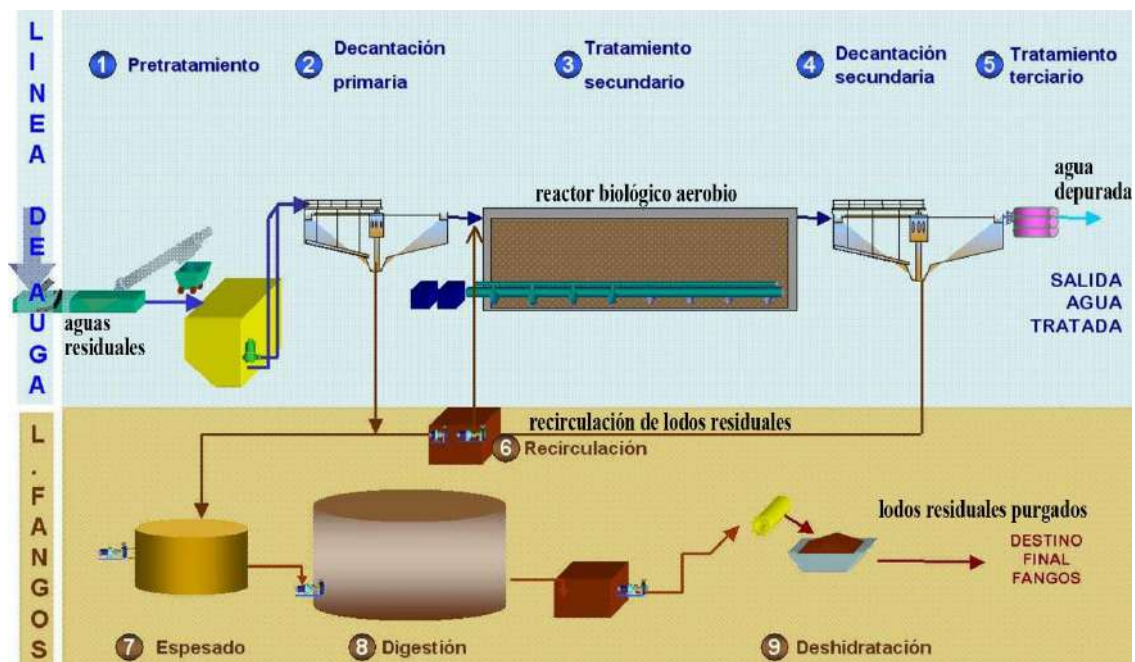


Figura II.3. Esquema del proceso para la transformación de aguas residuales y lodos residuales.

Nota. Innova ambiental-Solvi.

En las Figuras II.4 y II.5 pueden verse la representación esquemática del proceso de transformación de aguas residuales, para obtener el agua depurada como producto principal del proceso de tratamiento de aguas residuales y como subproducto el lodo residual.

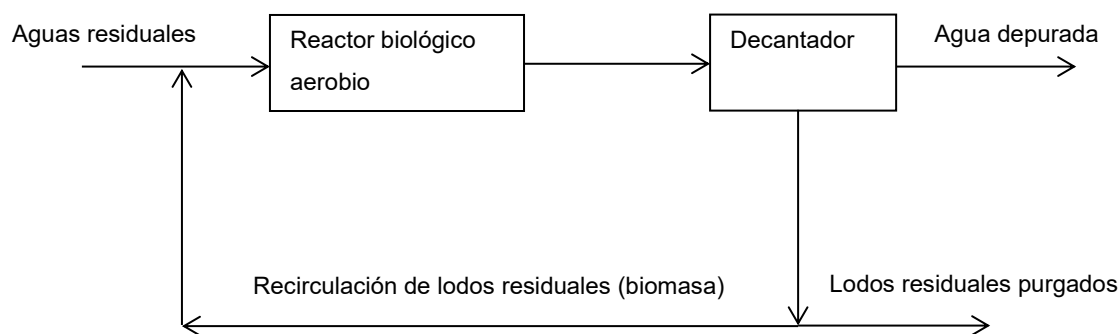


Figura II.4. Esquema del proceso de la depuración biológica aerobia de aguas residuales.

Nota: Sibony J (1997)

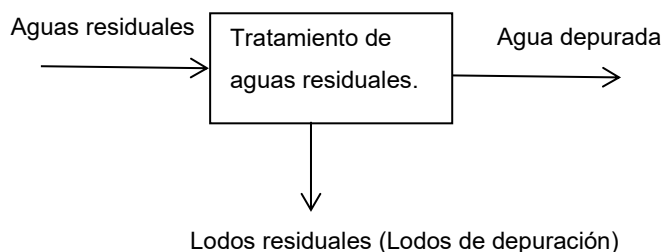


Figura II.5. Esquema de la unidad de proceso para la depuración biológica de aguas residuales.

Se muestra en la Figura II.3 que el tratamiento secundario, durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, esencialmente biológico, tiene como objetivo la degradación de materiales orgánicos biodegradables contaminantes del agua residual.

La asimilación de estos materiales orgánicos contaminados, por una flora de microorganismos produce compuestos gaseosos por un lado y biomasa por otro lado (crecimiento celular). El exceso de biomasa producida, el lodo secundario, debe retirarse del sistema para asegurar la continuidad de la depuración.

Estos lodos son muy orgánicos, más del 50% en base seca, y contienen esencialmente microorganismos y sus secreciones.

Básicamente, existen los procesos utilizados para la sedimentación interna (lagunas), procesos para la biomasa fija (filtros percoladores, biodiscos)

y procesos de reciclaje de biomasa. Estos últimos, más conocidos con el nombre de procesos de lodos activados, son los más extendidos, proceso que ha sido utilizado para obtener los subproductos del tratamiento de aguas residuales.

Un proceso clásico de lodos activados incluye:

- Una piscina de aireación en la que el agua a depurar se pone en contacto con la biomasa.
- Un dispositivo de mezcla y aireación;
- Un tanque de sedimentación, secundario, en el que tiene lugar la clarificación del agua y el espesamiento de la biomasa;
- Un dispositivo de reciclaje que extrae el exceso de lodo del fondo del tanque de sedimentación y devuelve una parte al tanque de aireación. El exceso de lodo se envía a un espesador.

El tratamiento terciario tiene como finalidad afinar la depuración según las calidades requeridas para el agua vertida. Los tratamientos terciarios más habituales son la nitrificación-desnitrificación y la defosfatación. En ambos casos, también se trata de procesos biológicos que producen los llamados lodos terciarios. En algunos casos, el tratamiento terciario se realiza dentro del reactor biológico secundario, por secuenciación temporal, y se combinan los lodos secundarios y terciarios. Se pueden identificar tres categorías de lodos:

1. primarias, de tratamientos mecánicos y preliminares, **2. secundarias**, activadas, de tratamientos biológicos, y **3. terciarias**, químicas, de tratamientos físico-químicos finales (Canziani & Spinosa 2019).

Para las operaciones unitarias de transformación, durante el tratamiento de aguas residuales, observamos que la base para el tratamiento de aguas residuales es alimentar constantemente microorganismos mediante materias orgánicas contaminantes y el oxígeno.

Los microorganismos consumen la materia orgánica contaminante y la transforman mediante su metabolismo aerobio en una nueva biomasa microbiana (denominada lodo de depuración de aguas residuales) y otra parte en dióxido de carbono, agua, y materias minerales (el esquema del proceso del tratamiento de aguas residuales puede verse en las Fig. II.6 y II.7), y (Ec. II.1).

Las Figuras II.6 y II.7 muestran los esquemas del proceso, operaciones unitarias para procesos de transformación, durante el tratamiento de aguas residuales y el denominado reactor biológico aerobio, que es la unidad principal de una estación de depuración.

En un reactor aerobio, las aguas residuales reciben un tratamiento biológico lo que origina la producción de una biomasa microbiana o lodo de estación de depuración. El proceso de transformación consiste en la eliminación por una flora microbiana de materias asimilables contenidos en el agua residual, por lo general de materias orgánicas biodegradables contaminadas, donde una parte de la energía que resulta de la degradación de estas materias asegura el crecimiento de microorganismos, estas nuevas células forman el lodo. Luego, a la salida de la estación de depuración se obtiene el agua depurada, pero quedan los residuos de la depuración que es el lodo residual. Estos lodos están formados de agua y materias secas que contienen sustancias orgánicas y minerales.

Las estaciones de depuración producen lodos líquidos, pastosos o sólidos, y su eliminación forma parte de problemas medioambientales actuales.

El lodo de depuración debe ser primero deshidratado mecánicamente, luego secado para poder ser incinerado, con o sin recuperación de energía o utilizado en la agricultura o construcción, de tal forma al lodo se le pueda dar una destinación final de valorización.

Debido a que los lodos de depuración tienen poca cantidad de materias secas y difíciles de comprimir o por problemas de cinética de secado del lodo, entonces es necesario agregar a estos lodos cierta cantidad de materias secas de origen externo, materias alcalinas, o interno (lodos de depuración de aguas residuales previamente secados).

Luego, el presente trabajo trata de la influencia de agregar materias secas, de origen interno y externo, para lograr estabilizar el lodo de depuración, y darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

Las Fig. II.6 y II.7 muestran el ingreso de aguas residuales que alimenta al reactor biológico aerobio y un arrastre permanente de microorganismos desde

esta unidad de proceso de depuración a una segunda unidad de proceso al que está conectado, denominado decantador.

Cuando los microorganismos que se desarrollan y aglutinan en pequeños grupos llamados flóculos han adquirido la densidad suficiente para alimentarse, quedan retenidos en el decantador y son evacuados por el fondo. La mayor parte de este lodo microbiano se recicla para proporcionar la biomasa que tratara la nueva agua residual, el resto se elimina mediante una purga fuera del proceso de depuración de aguas residuales.

El agua residual que ha sido depurada se clarifica y puede ser recuperada para ser vertido en el medio acuático.

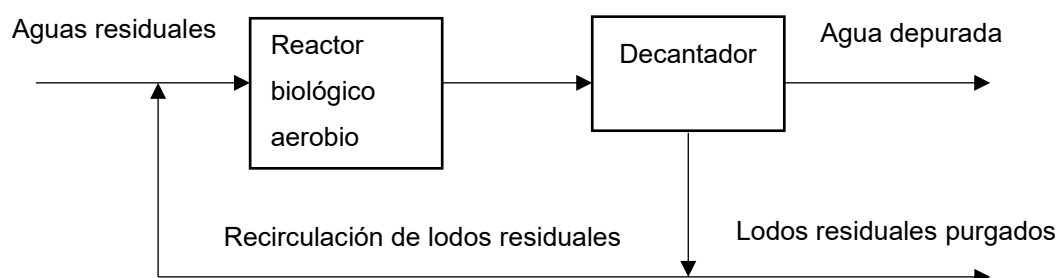
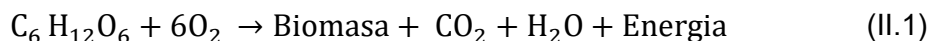


Figura II.6. Esquema del proceso de la depuración biológica de aguas residuales.
Nota: Sibony (1997)

La Figura II.6 representa el esquema del proceso para la depuración de aguas residuales así también el esquema del reactor biológico aerobio para el proceso de la transformación de aguas residuales, unidad del proceso donde mediante un tratamiento biológico origina la producción de una nueva biomasa microbiana o lodo, subproducto producido del proceso de tratamiento de aguas residuales y por dióxido de carbono, agua, y materias minerales (ecuación II.1). La depuración biológica consiste en la eliminación por una flora microbiana de materias asimilables contenidos en el agua (principalmente de materias orgánicas biodegradables, de compuestos nitrogenados y fosfatos). Una parte de la energía generados en la degradación de estas materias asegura el crecimiento de microorganismos, estas nuevas células forman el lodo.

Se indica en la ecuación (II.1) una representación de la reacción química durante el tratamiento biológico del agua residual:



Según Ferrer et al. (2018), explicó que los microorganismos que son eliminados del proceso durante la operación unitaria para realizar los procesos de transformación de aguas residuales, subproductos de tratamiento de aguas residuales, denominados lodos excedentes, son conducidos para su eliminación hacia una de las secciones de salida del proceso de tratamiento de aguas residuales, secciones de salida del proceso denominados I y II, por lo general el lodo excedente es conducido hacia la sección de salida II para su separación. El proceso que ha sido explicado para la generación del lodo residual de la depuración de aguas residuales es similar a los procesos desarrollados a nivel nacional para el tratamiento de aguas residuales. Un esquema general del sistema de separación y recirculación de lodos activados puede verse en la Figura II.7

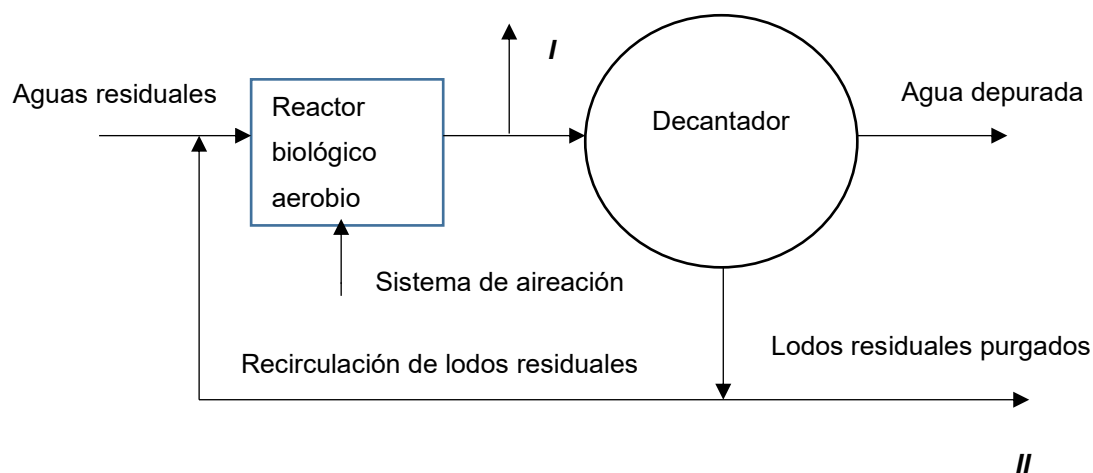


Figura II.7. Esquema para el proceso de la depuración biológica de aguas residuales y lodos residuales

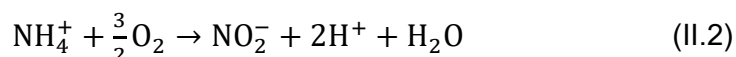
Nota: Tratamientos biológicos de aguas residuales, Ferrer et al. (2018)

Las Figuras II.6 y II.7 muestran el proceso de depuración de aguas residuales, realizado utilizando un reactor biológico aerobio, para la depuración biológica de aguas residuales y se puede decir que un sistema utilizado para separar la materia orgánica contaminante de aguas residuales en un inicio fue el objetivo de los tratamientos biológicos.

Se considera que la clasificación en autótrofos y heterótrofos, está en función de la fuente de carbono y del dador de electrones utilizados. Durante el proceso de lodos activados, aproximadamente 95% de biomasa están formados por las bacterias.

Las ecuaciones II.2 y II.3, indican la producción de nitrato a partir del nitrógeno amoniacal generados a través del crecimiento de bacterias Amoniooxidantes y Nitritooxidantes respectivamente, son bacterias autótrofas. Se generan las siguientes ecuaciones bioquímicas durante el proceso de la nitrificación:

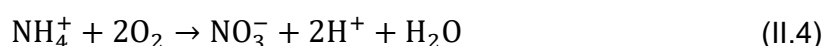
Reacción 1:



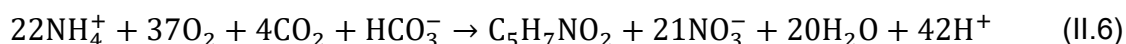
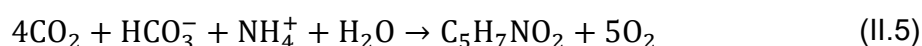
Reacción 2:



Reacción total:



Una parte del nitrógeno amoniacal ($\text{N}-\text{NH}_4^+$) lo asimila el tejido celular. La asimilación autótrofa se representa mediante la reacción de síntesis:



Si el sistema para el proceso se desarrolla de manera favorable con el ambiente, se va a producir la nitrificación durante los procesos biológicos aerobios.

Además, la eliminación de fósforo progresivamente cada vez más se considera a través de métodos o procesos biológicos para la separación de fósforo, con la ventaja de tener una disminución en el uso de reactivos, así también una menor generación de subproductos del proceso de la depuración de aguas residuales y mayor contenido en fósforo lo que los hace apropiado para utilizarlo en la agricultura.

3. Subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales

Junto con tratamientos dirigidos a la depuración de aguas residuales, el lodo subproducto que ha sido generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales reanuda las operaciones relacionadas con los lodos. En la unidad de proceso de operación unitaria para la decantación del subproducto residual, el subproducto residual todavía presenta una alta proporción de agua, más del 95% para el lodo primario y más del 99% para el secundario (Ben-Aïm 2000). Las distintas etapas del tratamiento de los lodos tienen como objetivo la estabilización y concentración por deshidratación. Estas operaciones de secado son importantes porque determinan la calidad del lodo (contenido de materia seca, consistencia,).

3.1. Estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales

El objetivo para la estabilización del subproducto del tratamiento de aguas residuales, que no se lleva a cabo de forma sistemática, es evitar la fermentación del lodo que provocaría molestias por olores. Al mismo tiempo, el contenido de patógenos se reduce en proporciones que varían según el tipo de tratamiento. Se hace una distinción entre estabilización biológica, química y térmica. La estabilización biológica se puede lograr mediante metanización, digestión anaeróbica mesófila, estabilización aerobia termofílica o compostaje. El tratamiento químico se puede realizar mediante encalado o estabilización con nitritos. El secado (sequedad superior al 90%) constituye a su vez una forma de estabilización térmica (Apesa 2000).

En el presente trabajo, se ha realizado el tratamiento de estabilización del subproducto residual generado durante el proceso de la depuración de aguas residuales domésticas, denominados A y B, para tal fin se adicionan sustancia alcalina al lodo residual subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales domésticas.

3.2. Deshidratación de lodos de depuración

La etapa de deshidratación mecánica permite dar una consistencia más sólida al lodo de depuración, alcanzando niveles de sequedad que oscilan entre 15 y 40%. Tal como está, el lodo difícilmente puede deshidratarse, y algunas veces espesarse, y se le debe dar un acondicionamiento para mejorar su procesabilidad.

De hecho, los materiales orgánicos que constituyen el lodo tienen un marcado carácter hidrófilo y hacen del lodo un sistema coloidal estable en la cual el agua de los poros está fuertemente ligada.

Es necesario romper esta estabilidad coloidal para liberar agua y permitir la deshidratación mecánica.

Las diversas operaciones que permiten la ruptura de la estructura coloidal se agrupan bajo el término acondicionamiento. Las técnicas más utilizadas es el acondicionamiento térmico y acondicionamiento químico. El acondicionamiento térmico se realiza principalmente en grandes estaciones equipadas con digestores y solo se menciona a título informativo. Consiste en tratar los lodos por cocción. Cuando el lodo alcanza una temperatura suficiente, 160 a 210°C, se produce una transformación irreversible de su estructura que libera gran parte del agua ligada.

3.3. Tratamiento químico del lodo de depuración

El tratamiento o acondicionamiento químico utiliza reactivos minerales (electrolitos minerales con policationes) u orgánicos (polímeros), cuya adición de forma controlada (dosificación y mezcla) provoca la coagulación y/o floculación de la suspensión. El resultado es un agrupamiento de partículas sólidas muy pequeñas con geometría similar a una red tridimensional, superior a 0.1 milímetros, las partículas sólidas agrupadas han sido denominadas flóculos, la suspensión (mezcla) que contiene partículas sólidas están dispersos en un fluido y la estructura del flóculo depende en gran medida del tipo de reactivo utilizado. Las partículas sedimentan en la unidad del proceso de decantación por acción de la fuerza de la gravedad.

Los reactivos minerales (sales de hierro, sales de aluminio, cal, etc.) dan flóculos relativamente finos y estables. Este tipo de flóculo es adecuado para la filtración de alta presión y al vacío, que emplea una tela de malla fina. Los polímeros orgánicos por su parte dan lugar a flóculos voluminosos (varios milímetros), más frágiles y aptos para centrifugación o filtración a través de un filtro de banda con una malla grande. El uso de estos polielectrolitos sintéticos se está extendiendo incluso para la filtración a presión (Lotito et al.1990).

Los polímeros utilizados en la práctica son generalmente del tipo catiónica porque las partículas que constituyen el lodo de depuración están cargadas principalmente negativamente en la superficie. Los productos vendidos están en forma líquida o sólido. Su uso requiere un paso de dilución muy importante para favorecer la mezcla en el momento de la inyección en el lodo. Los polvos tienen un precio más bajo que los líquidos, pero requieren una unidad de preparación más costoso.

3.4. Sectores de eliminación y valorización del lodo de depuración

A nivel europeo, los principales sectores de gestión de lodos son la valorización en la agricultura, puesta en descarga y oxidación térmica por incineración o por vía húmedo. La descarga al mar está prohibida desde 1998. Los lodos también se utilizan en cantidades más pequeñas como combustible para fábricas de cemento y ladrilleras (Gross 1993) o se esparcen en suelos no agrícolas, ensayos en áreas forestales.

3.4.1. Valorización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales

Debido a su contenido de elementos minerales y orgánicos, los lodos producidos durante el proceso de tratamiento de aguas residuales pueden utilizarse de manera alternativa para sustituir fertilizantes en beneficio de cultivos agrícolas. Esto es para distinguir el valor húmico del lodo de depuración de su valor fertilizante.

El primero está representado por el contenido de materia orgánica que no experimenta mineralización, el segundo por el aporte de nutrientes, contenido de valores fertilizantes para uso agrícola.

La relación carbono/nitrógeno define la velocidad de mineralización. Cuanto más bajo sea, más rápida será la mineralización.

Se muestra en la Tabla II.1 los contenidos medios característicos de los elementos fertilizantes en lodos de depuración, expresados en base seca.

Siendo el contenido de nitrógeno, presente en el subproducto de la depuración de aguas residuales, un nutriente muy importante para su uso en los cultivos agrícolas. Los rendimientos en relación a la producción agrícola, utilizando como nutriente el nitrógeno, son muy sensibles tanto a las faltas como al exceso. La concentración del nutriente mencionado en el subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales generalmente es el factor limitante para su valorización en la agricultura (Agencia Nacional para la Recuperación y Eliminación de Residuos, 1988).

Por razones de seguridad alimentaria, la legislación europea exige el cumplimiento de especificaciones estrictas (Consejo de la Unión Europea, 1986). Controladas por las diferentes restricciones se refieren en particular a la calidad de los lodos de depuración, la naturaleza de los suelos y su ubicación, así como las cantidades esparcidas y los períodos de esparcimiento.

Asimismo, para la estabilización del lodo de depuración, las normas ambientales peruanas presentan reglamentaciones permisibles para la valorización del lodo de depuración de aguas residuales.

Tabla II.1. *Contenido de elementos fertilizantes en lodos de depuración, % de MS.*

Nitrógeno total (expresado en N)	1 a 8%
Fosforo (expresado en P ₂ O ₅)	2 a 7%
Azufre (expresado en S)	0.8 a 1.5%
Calcio (expresado en CaO)	2 a 8%
Magnesio	1%
Potasio	1%
Sodio	1%

Nota: Agencia Nacional de Recuperación y Eliminación de Residuos, 1988.

3.4.1.1. Valor del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales

Existen elementos o compuestos que pueden alterar la calidad de los lodos destinados a esparcir:

- Los oligoelementos metálicos y más particularmente metales pesados (Cd, Hg, Pb). Algunos de estos metales entran en la categoría de oligoelementos (Zn, Cu) y son útiles para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, en niveles excesivamente altos, se vuelven tóxicos. En cuanto a los metales pesados, los riesgos para la salud son conocidos en la actualidad. Los niveles permisibles se especifican en las normas ambientales reglamentarias para lodos de PTAR.
- Los contaminantes orgánicos: pesticidas, detergentes, hidrocarburos aromáticos policíclicos, los policlorobifenilos. Salvo en casos especiales (contaminación, accidente), los niveles comúnmente observados permanecen bajos.
- Los Microorganismos patógenos: bacterias, parásitos, virus, hongos.

Desde un punto de vista epidemiológico, los únicos riesgos importantes para los seres humanos y los animales son la presencia de huevos de salmonela

o de tenia. Para hacer frente a estos riesgos para la salud (así como a las molestias por olores), las directivas imponen un tratamiento para reducir el poder fermentable de los lodos y desinfectarlos.

3.4.1.2. *Los suelos para el esparcido del lodo de depuración*

Las cantidades del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales esparcidos son determinados según su composición y la del suelo. La proximidad de aguas subterráneas, manantiales o ríos, se considera antes de cualquier esparcido. Se requieren distancias mínimas de estas áreas sensibles. Además, el esparcido no se permite su aplicación en caso de heladas, lluvias fuertes o en suelos saturados de agua para evitar la escorrentía o la rápida filtración al agua subterránea.

3.4.2. La valorización energética del lodo de depuración

3.4.2.1. *La incineración del lodo de depuración*

La incineración de los lodos de depuración debe permitir la oxidación completa de su fracción orgánica a 800-900°C, en atmósfera oxidante (exceso de aire). Son posibles diferentes implementaciones:

- Incineración en un horno específico

Esta solución es adoptada por plantas que producen grandes cantidades de lodos, pero también puede ser el resultado de la combinación de varias plantas de tratamiento que valoricen sus lodos de depuración de forma conjunta.

- Co-incineración con residuos domésticos

Esta opción se considera cuando el volumen de lodos no justifica la construcción de un horno y hay un incinerador doméstico cerca (Surh 2002). La capacidad térmica del horno debe ser tal que permita la introducción de lodos. Los lodos en forma pastosa, 15 a 30% de materia seca, se consideran más bien como refrigerantes, mientras que los lodos con un contenido de materia seca

superior al 60% tienen un poder calorífico inferior cercanos a los residuos domésticos y actúan como combustible.

3.4.2.2. *Pirolisis de lodos de depuración*

La pirolisis o termólisis de lodos (> 85% MS) se obtiene en ausencia de aire (O_2 <2%), a media (400-500°C) o alta (500-700°C) temperatura. Esta destilación térmica requiere un aporte externo de energía y produce gas y coque. Los gases de pirolisis (PCI de 10 a 20 MJ/Nm³) generalmente se queman y proporcionan parte de la energía requerida por los procesos endotérmicos (Antonini 2000).

En cuanto al coque, se puede utilizar como combustible secundario. Dependiendo de la composición inicial del lodo, puede ser necesario una purificación del coque. En efecto, la carga contaminante (metales pesados, cloro, etc.) se encuentra concentrada en el coque.

3.4.2.3. *Gasificación del lodo de depuración*

La gasificación tiene como objetivo la conversión total de la carga orgánica en gas combustible. El carbono se gasifica mediante la reacción de Boudouard y/o mediante la reacción de un gas con agua para dar por un lado un gas combustible y un residuo inerte por el otro. La conversión se realiza en defecto de aire global por combustión del lodo (> 85% MS) en aire, aire enriquecido u oxígeno.

A veces se agrega vapor de agua al agente gazificante. Las temperaturas suben a 900-1100°C cuando se usa aire y 1000-1400°C cuando se usa oxígeno. La gasificación del aire proporciona un gas pobre, mientras que el uso de oxígeno conduce a la producción de un gas más rico por eliminación de lastre de nitrógeno (Antonini 2000).

3.5. Ventajas del secado del lodo para su valorización

Una operación del secado convectivo del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, subproducto denominado A y B después de la deshidratación mecánica tiene varias ventajas tanto antes de la valorización agrícola como en la incineración.

El objetivo del secado depende de la aplicación. Al esparcir, se realiza el secado hasta su finalización, pero a veces se busca un secado parcial para la incineración.

3.5.1. Secado y esparcido agrícola, valorización agrícola del lodo

Una operación de secado convectivo del lodo residual, subproducto del tratamiento de aguas residuales, subproducto residual denominado B, antes del esparcido, su valorización y uso tiene ventajas y permite cumplir con los requisitos de higienización y estabilización. Estas ventajas son las siguientes:

- Disminución de volumen y masa por eliminación de agua. Estas reducciones influyen en los costos de almacenamiento, transporte y manipulación. Los lodos granulados, en particular, no requieren ningún mantenimiento particular durante el almacenamiento.
- Concentración de nutrientes en el sólido seco.
- Estabilización, reducción del poder fermentable, reducción de olores cuando la sequedad es superior al 90%. En estas condiciones secas, la baja actividad del agua inhibe cualquier desarrollo bacteriano.
- Higienización por destrucción de microorganismos patógenos si la temperatura es alta, 30 min a 70°C es suficiente. En este sentido, el secado cumple con las normas ambientales.
- Cambio de una textura pastosa a una textura sólida que facilita el esparcido agrícola.

3.5.2. Secado y valorización de energía del lodo

Aparte de la oxidación húmeda, todos los procesos de valorización de energía utilizan lodos parcial o totalmente secos. La principal ventaja del secado es el aumento del poder calorífico inferior, PCI.

De hecho, el PCI de un lodo deshidratado al 20% de MS es cercano a 1,25 MJ/kg mientras que un lodo secado al 90% de MS está entre 14,5 y 16,8 MJ/kg.

El secado parcial entre el 30 y 45% permite obtener la auto combustibilidad de los lodos y encuentra su aplicación antes de la incineración en un horno específico. El secado realizado para alcanzar un 60 a 90% de materia seca permite elevar el PCI de los lodos al de los residuos domésticos ($\cong 8400$ kJ/kg), lo que es ventajoso para la co-incineración. De esta forma, la introducción de lodos secos no interfiere con el funcionamiento del horno. En cuanto a la pirólisis o gasificación, el presecado de los lodos ($\geq 85\%$ de MS) generalmente se integra en el proceso y se obtiene previamente.

Cuando es posible, la integración energética reduce el costo general del sector de valorización. Se puede utilizar biogás de metanización (estaciones equipadas con digestores) o gas de síntesis obtenido por pirólisis o gasificación para alimentar el quemador del secador.

El calor liberado durante la condensación del gas húmedo de la secadora se puede utilizar para precalentar el agua. Parte de la energía contenida en los gases de combustión del incinerador se puede utilizar para precalentar el aire que alimenta el secador.

El proceso de pirólisis DTV de TRAIDEC (disociación térmica y valorización) utiliza por completo el contenido energético de los lodos. La energía de los gases de termólisis se recupera en un generador de vapor. Este vapor cubre las necesidades energéticas de un secador que lleva los lodos de un 20 a un 85% de sequedad. Solo es necesario agregar combustible durante las fases de apagado y arranque (Chambe 2000).

Cualquiera que sea el sector de valorización del lodo, el paso de secado posterior a la deshidratación tiene ciertas ventajas y es incluso más importante. Teniendo en cuenta las crecientes cantidades de lodos a gestionar en el futuro,

el diseño racional de las unidades de secado y la elección de las condiciones de tratamiento adaptadas a cada tipo de lodos se convertirán en pasos necesarios en el desarrollo de sistemas de tratamientos óptimos.

Esto está lejos de ser el caso ahora. Una mejor comprensión del proceso es esencial y necesariamente requiere investigación científica.

4. Conceptos relativos al secado del lodo de depuración

El propósito es presentar los conceptos esenciales relacionados con el secado convectivo para el subproducto que ha sido generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales. En efecto, el proceso de la operación unitaria del secado convectivo es una disciplina un poco aparte dentro de la ingeniería química a la que se asocia un lenguaje específico y una metodología para procesar los resultados.

4.1. Definición

El secado convectivo es la extracción de humedad de una sustancia, y la sustancia que la contiene puede ser sólido, líquido o gaseoso. Para el análisis realizado en el presente trabajo de investigación, secado significa la reducción en el contenido de humedad de agua del lodo de depuración, desde un valor inicial a otro final por medio de la evaporación en una corriente de aire.

El secado convectivo para el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales es una operación de separación que se realiza para extraer el solvente de un material por vaporización y eliminando la fase gaseosa formada. En la mayoría de los casos, el solvente extraído es agua. En el caso particular del secado por convección que se considera en este trabajo, una corriente de aire caliente proporciona el flujo de calor necesario para el cambio de estado de la materia, de líquido a vapor, y para transportar el vapor producido.

Durante la operación unitaria para el secado se producen a la vez los procesos para el flujo de calor y para el flujo de materia, transferencias que se generan al mismo tiempo y existen a la vez un gradiente de temperatura y un gradiente de concentración, transferencia de calor para evaporar el líquido por convección del

aire y la operación unitaria de transporte de materia por evaporación del líquido contenido en el sólido, subproducto del tratamiento de aguas residuales.

El secado para el lodo residual, subproducto residual del proceso de la depuración de aguas residuales, se realiza mediante convección por aire, con circulación transversal y a presión atmosférica, del lodo de depuración en condiciones constantes de secado.

En el secado del lodo, puede ser realizado de manera directa utilizando el flujo de aire previamente calentado, para así generar un flujo de calor y se pueda transferir el aire caliente hacia la superficie del sólido, lodo, para la operación unitaria de secado, en cambio en el secado indirecto el calor es suministrado por conducción, por lo general a través de la superficie de un metal en contacto con el sólido.

En el secado directo por convección de un flujo de aire caliente hacia la superficie del sólido, el flujo másico del agua se puede obtener mediante las resistencias del flujo de calor transportado y el flujo másico que ha sido transportado hacia el aire durante la operación unitaria del secado o por las resistencias de transporte de la fase sólida.

La humedad puede moverse dentro del lodo por varios mecanismos. En lechos de lodo y en sólidos que tienen grandes poros abiertos, el movimiento del líquido es producido por tensión superficial y capilaridad.

El aire fluye a la superficie del lodo a secar, transportando a su paso la humedad y suministrando el calor para la evaporación del líquido contenido en el lodo.

Los lodos inicialmente húmedos pronto alcanzan el equilibrio con el medio exterior, asumiendo que todo el calor transferido es por convección. Esto es solo teórico, en la práctica existe además el flujo de calor que es transportado por los tipos de mecanismos de conducción y radiación, que pueden ser o no despreciables.

Conforme ocurre la evaporación el contenido de humedad del fluido en el área de transferencia, superficie del lodo, disminuye lo que origina un gradiente de concentración entre la zona interna del lodo y su superficie, que obliga al agua a difundirse hasta el exterior del lodo o ascender por capilaridad.

En el momento en que el caudal con la cual el agua asciende hacia la superficie del lodo es igual al caudal de evaporación, los valores durante la operación unitaria de secado para el flujo másico del agua disminuyen durante la operación de secado del lodo, suponiendo que la humedad, velocidad superficial y temperatura del aire permanecen constantes.

Sin embargo, en el instante que los valores de la humedad del lodo residual son inferiores al valor de la humedad crítica, en ese momento el flujo másico del agua que ha sido transportada durante la operación unitaria para el secado del lodo residual presenta valores mínimos.

El lodo deshidratado es uno de los materiales denominados blandos o altamente deformables. Durante una operación de secado, sufren una contracción más o menos significativa.

En el caso del secado por convección, la evolución de la superficie externa es muy importante porque tiene un impacto directo durante el transporte de masa y de calor, particularmente cuando las limitaciones a la transferencia son extragranulares. Cualquier intento de modelado riguroso debe tener en cuenta este fenómeno de contracción.

En la industria alimentaria, las técnicas tradicionalmente utilizadas para medir la contracción son relativamente imprecisas, medición manual mediante brújula o regla (Ratti 1994), medición del desplazamiento de volumen durante la inmersión.

4.2. Nociones relativos al aire húmedo

La utilización de aire para el secado del lodo de depuración necesita la introducción de ciertas nociones relativos al aire húmedo. El contenido de humedad se puede caracterizar por diferentes variables: P_e , la masa referida al aire seco o humedad absoluta Y , en kg/kg de aire seco, o la humedad relativa HR . La humedad absoluta Y está definida por la ecuación (II.7). La humedad relativa, generalmente expresada en % (ecuación II.8).

$$Y = 0.622 \frac{P_e}{P_{atm} - P_e} \quad (II.7)$$

$$HR = 100 \frac{P_e}{P_e^{sat}} \quad (II.8)$$

Otra característica importante se considera la temperatura del bulbo húmedo (temperatura húmeda), T_h , es la temperatura de equilibrio evaporativo dinámico. Las fórmulas utilizadas para determinar P_e , el volumen húmedo v_{hum} , la densidad y la temperatura de bulbo húmedo se muestran en el Anexo I.

4.3. Formas de agua dentro de un sólido húmedo

El agua contenida dentro de un material húmedo se presenta en muchas formas, diferenciamos agua ligada y agua libre. El agua libre presenta un comportamiento como agua pura.

La expresión de la actividad del agua, ecuación (II.9), se obtiene escribiendo la igualdad de las fugacidades de las fases líquida y gaseosa.

$$a_e = \frac{P_{eq}(T)}{P_e^{sat}(T)} = \frac{HR}{100} \quad (II.9)$$

El agua libre llena la mayoría de los vacíos en la estructura. Está atrapado en forma líquida por fuerzas de origen capilar. El agua ligada se refiere al agua fijada por adsorción a las paredes de las estructuras según una importancia que puede determinarse mediante adsorción y absorción de agua.

La adsorción y absorción, permiten conocer el contenido de agua final de un producto expuesto a unas variables externas definidas durante el proceso de la operación unitaria de secado, denominado agua de equilibrio W_{eq} , por otro lado, proporcionan información sobre las condiciones límites durante el modelado, particularmente cuando los materiales son altamente higroscópicos (Coumans 2000).

Se sabe que, un material se denomina higroscópico cuando absorbe y retiene fácilmente la humedad del aire, y no higroscópico cuando no se une de forma natural a la humedad del aire. El siguiente punto desarrolla el concepto de isoterma de sorción con más detalle.

4.3.1. Isotermas de sorción de humedad

La isoterma de sorción relaciona la humedad del sólido con la humedad del ambiente, a una temperatura dada.

Es característico de muchas interacciones que tienen lugar a escala microscópica entre la estructura del sólido y las moléculas de agua. Por tanto, esta curva permite describir el comportamiento higroscópico del sólido.

Las isotermas se pueden determinar para un sólido expuesta con humedades crecientes (captación de agua) o decrecientes (pérdida de agua).

Dependiendo del tipo de material, las isotermas pueden adoptar diferentes formas. Según Brunauer et al. (1940) definieron cinco tipos de isotermas para describir la adsorción de gas en la superficie de un sólido.

Esta clasificación se suele utilizar para caracterizar las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno, pero ha sido extendido a las isotermas de adsorción-desorción.

Estas isotermas representan el volumen adsorbido en función de la presión parcial (Figura II.8). El tipo I corresponde a la adsorción mono-capa, conocido como Langmuir (1918).

En el caso de la adsorción de nitrógeno, los tipos II y III se encuentran para sólidos macroporosos, mientras que las isotermas tipo IV y tipo V corresponden a sólidos mesoporosos.

Las isotermas de tipo IV y tipo V a menudo tienen histéresis relacionada con la condensación capilar.

Para las isotermas del agua, se acostumbra colocar la humedad relativa del aire o la actividad del agua en las abscisas y el contenido de agua de equilibrio del material en las ordenadas (en lugar del volumen adsorbido).

Materiales que contienen polímeros higrófilos como las fibras naturales y los productos alimenticios generalmente presentan un comportamiento de tipo II.

El tipo III se encuentra para productos menos higrófilos como cauchos, fibras sintéticas o productos alimenticios con alto contenido de glucosa (Maskan & Göğüs 1997).

Las isothermas de algunos materiales inorgánicos son de tipo IV. Cabe señalar que muchos productos no pueden clasificarse de manera inequívoca porque su isoterma pertenecen a diferentes clases.

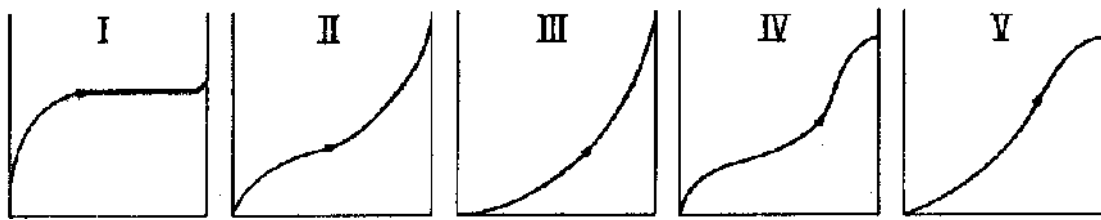


Figura II.8. Representación esquemática de 5 tipos de isothermas de adsorción.
Nota: Definidas por Brunauer et al., según Lecloux (1981).

La Figura II.9, presenta una isoterma sigmoideal para la adsorción encontrado para un fluido, agua.

Tiene la forma de S de un sigmoideo característico del tipo II.

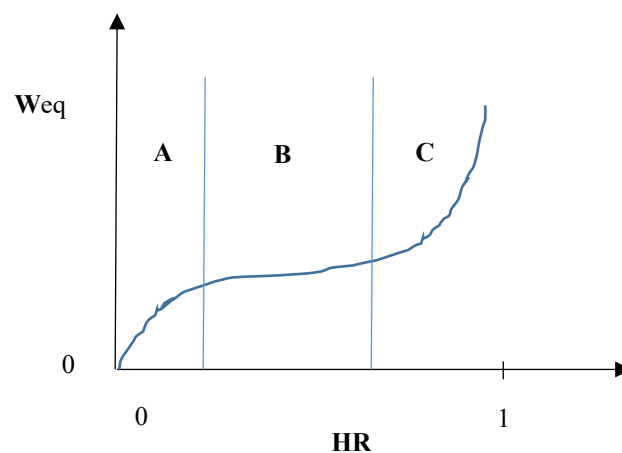


Figura II.9. Esquema de la Isoterma de forma sigmoideal, tipo II.

Para presiones de agua parciales bajas (zona A), se une una primera capa de agua a la estructura sólida. La energía de enlace es muy fuerte y las moléculas de agua no son muy móviles (teoría de Langmuir).

A presiones intermedias (zona B) notamos que la pendiente de la curva aumenta. Se forma una segunda capa de moléculas, y luego otras nuevamente: la adsorción es de múltiples capas. La energía de enlace es menor que para la primera capa (teoría BET).

A presiones cercanas a la saturación (zona C), la pendiente de la curva aumenta aún más bruscamente. Las últimas moléculas de agua se adhieren a las irregularidades de la superficie, esto es una condensación capilar y la energía de enlace es muy baja (ecuación de Kelvin, II.10).

La máxima higroscopicidad se logra cuando el sólido está en equilibrio con aire saturado. Este contenido de agua define el límite higroscópico. Por debajo de este límite, el material húmedo se encuentra en el llamado rango higroscópico.

Se constata por la experiencia que las curvas de desorción y adsorción no siempre se superponen exactamente: luego hay un fenómeno de histéresis. Para explicar este fenómeno, comúnmente se proponen tres hipótesis:

La primera hipótesis involucra la llamada teoría de la botella. Durante la adsorción, la condensación tiene lugar en grandes cavidades, mientras que, en la desorción, la entrada del poro está bloqueada por un menisco en un capilar de pequeño diámetro.

La ecuación de Kelvin (Ec.II.10) muestra que la presión P durante la adsorción, radio grande, es mayor que la presión de desorción, radio pequeño.

En la ecuación (II.10), σ es la tensión superficial, V_m el volumen molar del líquido, θ el ángulo de contacto, r el radio medio del menisco, R la constante del gas ideal y P_e^{sat} . Que han sido utilizadas para isothermas relacionadas con la sorción de humedad.

Esta teoría puede ser generalizada para sólidos que contienen poros conectados a la superficie exterior por pequeños capilares.

$$RT \ln \frac{P}{P_e^{sat}} = -2\sigma V_m \frac{\cos \theta}{r} \quad (II.10)$$

La segunda hipótesis es considerar que el ángulo de contacto θ (según la Ec. II.10) durante la desorción es menor que durante la adsorción, debido a la presencia de impurezas.

La tercera hipótesis se basa en la teoría del poro abierto para el cual la forma del menisco no es la misma en adsorción que en desorción dependiendo del tamaño de las capas adsorbidas y la forma de los poros.

A partir de las isothermas, también es posible obtener una propiedad termodinámica denominada entalpía para procesos diferenciales de absorción, que es una medida del grado de unión del agua y la cantidad de energía que se debe suministrar para liberar esta agua.

Este aporte energético debe tenerse en cuenta al dimensionar secadores destinados a procesar productos fuertemente higroscópicos.

4.3.1.1. Expresiones matemáticas para isothermas

Se han propuesto muchas ecuaciones para expresar isothermas. Algunos se basan en una expresión de adsorción teórico, mientras que otros son de naturaleza empírica.

Una desventaja de estas relaciones es que no son aplicables en todo el rango de humedad relativa.

Puede verse en la Tabla II.2 las expresiones matemáticas de isothermas más utilizadas.

Tabla II.2. Expresiones matemáticas de isothermas más utilizados

Langmuir	$W_{eq} = \frac{ABHR}{1 + BHR}$	Baja HR
BET	$W_{eq} = \frac{W_m BET(hum)}{(1 - hum)(1 + (BET - 1)hum)}$	hum < 50
GA	$W_{eq} = \frac{W_m G(K)(hum)}{(1 - K(hum))(1 + (G - 1)(K)hum)}$	10 < hum < 90
Chung	$W_{eq} = \frac{1}{B} (\ln A - \ln(-\ln HR))$	20 < HR < 90
Halsey	$W_{eq} = \left(-\frac{A}{\ln HR} \right)^{\frac{1}{B}}$	10 < HR < 80
Harkins-Jura	$W_{eq} = \left(\frac{B}{\ln(HR) - A} \right)^{\frac{1}{2}}$	HR > 50
Henderson	$W = \left(-\frac{\ln(1 - hum)}{S} \right)^{\frac{1}{B}}$	hum < 90
Kuhn	$W_{eq} = \frac{S}{\ln(HR)} + B$	hum < 50
Oswin	$W = S \left(\frac{hum}{1 - hum} \right)^B$	hum < 95
Smith	$W_{eq} = S - B \ln(1 - hum)$	hum < 90

La ecuación de Langmuir (1918) se refiere a la adsorción de una sola capa y, por lo tanto, solo es válida en la primera parte de la isoterma.

El modelo Brunauer-Emmet-Teller (BET) tiene en cuenta la adsorción multicapa. Supone que la energía, calor, para adsorción producida inicialmente es diferente a las capas posteriores, asimilado al agua pura (Brunauer et al. 1938).

W_m es el contenido de agua de la monocapa y C_{BET} es la constante BET.

Esta expresión matemática se utiliza para isothermas de forma sigmoidea, para valores de humedad relativa inferiores al 40%.

El modelo matemático definido por Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) puede considerarse un aporte importante para una mejora de la ecuación BET al

introducir un comportamiento intermedio diferente del agua pura para las capas siguientes a la mono-capa inicial.

G se denomina constante de Guggenheim y corresponde al calor total de sorción de la primera capa adsorbida.

K es un factor de corrección que tiene en cuenta las propiedades de sorción de las multicapas.

Algunas expresiones que se muestran en la tabla II.2 también existen en las llamadas versiones modificadas para tener en cuenta la temperatura (Veltchev & Menkov 2000).

Las expresiones modificadas, así como la expresión GAB, fueron adoptados como estándar por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Agrónomos (ASAE 1996).

4.3.1.2. Calor isostérico de desorción

La entalpia para procesos diferenciales de adsorción puede calcularse considerando la expresión matemática siguiente (Ec. II.11).

Esta relación requiere determinar las isothermas a diferentes temperaturas para calcular la variación logarítmica de la humedad relativa en función de la inversa de la temperatura, para un contenido de agua. Sin embargo, a partir de las ecuaciones modificadas, es posible obtener la expresión analítica del calor de sorción Q_s .

$$Q_s = -R \frac{d \ln \frac{HR}{100}}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \quad (II.11)$$

4.3.2. Tipos de agua en lodos de depuración

Hemos visto que podemos distinguir dos tipos de fluido que han sido denominados agua libre y ligada. Estos conceptos no se observan estrictamente en la literatura que trata sobre la repartición de diferentes tipos de agua

contenidos en los subproductos generados del proceso de tratamiento para la transformación de aguas residuales.

Observándose subcategorías específicas según los autores y los métodos utilizados para caracterizar las formas del agua.

Según (Vesilind & Martel 1989) proponen la siguiente clasificación siguiendo ensayos dilatométricos: el agua libre es aquella que puede ser eliminada por simple sedimentación por gravedad, el agua intersticial es aquella que está atrapada en flóculos o en estructuras celulares, su eliminación requiere la ruptura de flóculos o células; el agua superficial es aquella que se retiene en la superficie de las partículas sólidas por enlaces de hidrógeno, su eliminación pasa por un tratamiento térmico; finalmente, el agua de hidratación es aquella que está químicamente ligada y que requiere un gasto energético importante para su eliminación.

De acuerdo con Smollen (1990) utiliza el secado a baja temperatura para distinguir las categorías de agua en lodos deshidratados. Agua denominada libre es aquella que podría ser eliminado por deshidratación mecánica.

Durante el secado, el autor encuentra que una cierta cantidad de agua llamada "agua inmovilizada" se elimina a una velocidad constante. El agua que queda es agua ligada, tanto física como químicamente.

Según (Tsang & Vesilind 1990) también utilizan un método termogravimétrico para distinguir los tipos de agua en lodos deshidratados.

El agua libre es la suma de agua eliminada por deshidratación y secado a una velocidad constante. Los cortes de pendiente de la curva de secado les permite distinguir entre el agua intersticial, el agua superficial y el agua unida químicamente que no se elimina.

Puede verse en la Tabla II.3 las clasificaciones del agua en la muestra basada en la síntesis realizada por Bongiovanni (1998), permite la verificación cruzada entre autores y asignar a las distintas subcategorías denominadas agua libre o agua ligada en el sentido termodinámico. El agua libre es aquella que se elimina durante la deshidratación.

El agua inmovilizada de la clasificación Smollen es, por tanto, agua libre. El agua ligada puede globalmente ser repartido en tres familias (Rolf & Halde 1979).

El agua unida químicamente se fija mediante fuertes enlaces químicos y solo se puede eliminar más allá de 105°C (incluida el agua de hidratación).

El agua unida físicamente, por adsorción o absorción, también se elimina mediante secado térmico (incluida el agua superficial).

Finalmente, el agua ligada mecánicamente se encuentra en estructuras capiloposas (incluida el agua intersticial).

Tabla II.3. Clasificaciones de agua libre y agua ligada

	Rolf	Vesilind	Smollen	Tsang
Agua libre en el sentido termodinámico	Agua libre	Agua libre (eliminado por decantación gravitacional)	Agua libre (eliminado por deshidratación mecánica) Agua inmovilizada (eliminado por secado a velocidad constante)	Agua libre (eliminado por deshidratación mecánica y por secado a velocidad constante)
Agua ligada en el sentido termodinámico	Agua ligada químicamente	Agua de hidratación	Agua ligada químicamente	Agua ligada químicamente
	Agua ligada físicamente	Agua superficial	Agua ligada físicamente	Agua de superficie
	Agua ligada mecánicamente	Agua intersticial		Agua Intersticial

5. Cinética de secado convectivo del lodo de depuración

Utilizando los dispositivos experimentales clásicos se pueden registrar la masa (kg) en función del tiempo (s). Luego obtenemos una curva que representa la pérdida de masa en función del tiempo (Figura II.10).

Sin embargo, también se utiliza la masa húmeda del lodo, W (kg /kg), representa el agua libre del lodo definido sobre base seca y no la muestra de masa (kg) del

lodo en función del tiempo de secado (s) para trazar la curva de secado del lodo de depuración (Figura II.11).

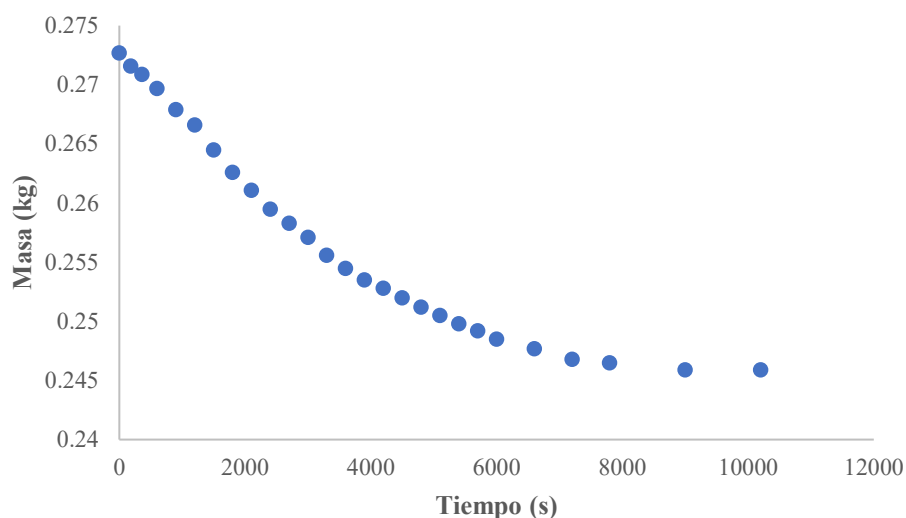


Figura II.10. Pérdida de masa (kg) con respecto al tiempo de secado (s).

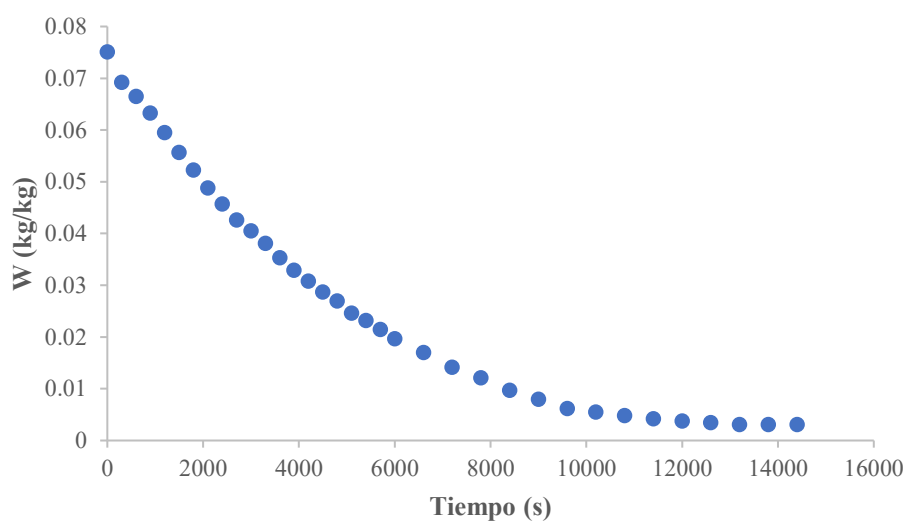


Figura II.11. Curva de pérdida de masa, humedad del lodo, secado del lodo de depuración.

Según su aplicación, los datos se pueden utilizar para trazar el esquema gráfico del flujo másico del agua durante la operación unitaria de secado del subproducto del proceso de depuración de aguas residuales, según el flujo másico del agua para el secado del lodo de depuración (F , kg H_2O evap / m^2s) este representado considerando el tiempo de secado del lodo (puede verse la Figura II.12) o del agua libre del lodo definido en base seca (Figura II.13).

En el caso que el lodo de depuración sea perfectamente rígido y no sufra ninguna modificación de su superficie, el flujo puede ser obtenido directamente por derivación de la curva de pérdida de masa (Ec. II.12). Donde S_s , es la masa del sólido seco (peso del sólido que se seca).

$$F = \frac{S_s}{A_0} \left(-\frac{dW}{dt} \right) = \frac{1}{A_0} \left(-\frac{dS}{dt} \right) = \frac{1}{A_0} N \quad (\text{II.12})$$

Por otro lado, en el caso de que el lodo húmedo sufra contracción, es necesario conocer la superficie externa $A(W)$ de la muestra para trazar la curva de secado en términos de flujo (Ec. II.13).

$$F = \frac{1}{A(W)} N \quad (\text{II.13})$$

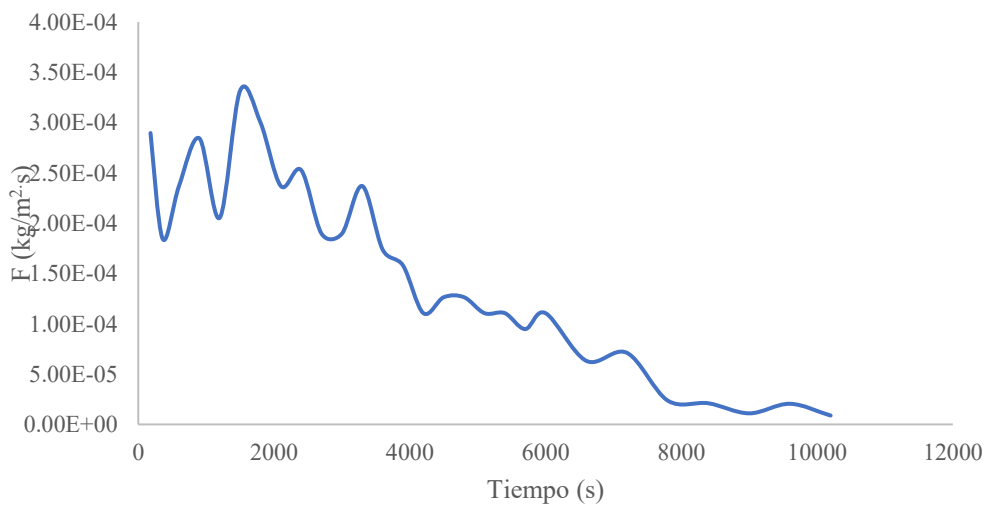


Figura II.12. Velocidad de secado del lodo en función del tiempo.

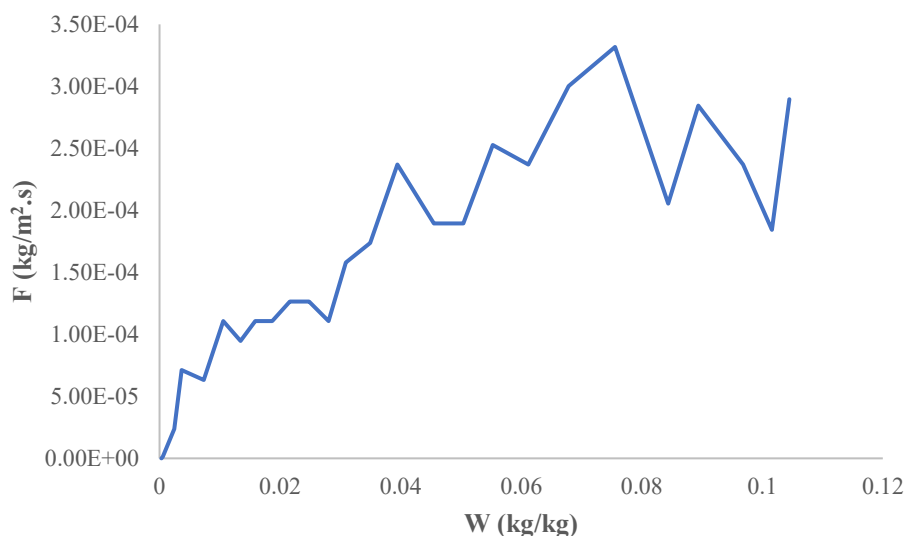


Figura II.13. Curva de Krischer muestra la evolución del flujo másico del agua durante el secado del lodo en relación al agua libre del lodo.

La Figura II.12 muestra que, durante el flujo másico del agua, para el proceso de la operación unitaria de secado del lodo, los tiempos son crecientes y las humedades decrecientes. Puede verse en la Figura II.13, el transporte de masa para un periodo de flujo másico constante del lodo con tiempos crecientes y humedades decrecientes, la operación de secado del lodo de depuración continua con un periodo de flujo másico constante para luego ir disminuyendo el flujo másico a valores mínimos de humedad que corresponde a la humedad crítica, para luego tener valores de humedad de equilibrio instantáneo donde se detiene el secado del lodo húmedo.

5.1. Formas de las curvas de Krischer

Analizando la forma de las curvas de Krischer permite una primera aproximación macroscópica al comportamiento del lodo durante el secado. En la curva esquemática mostrada en la Figura II.14 puede verse 3 o 4 fases según el caso.

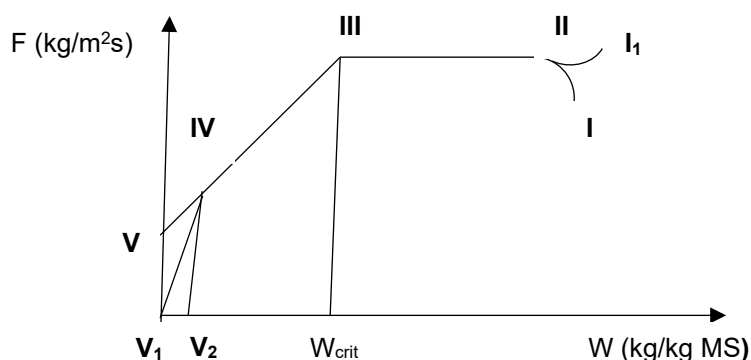


Figura II.14. Esquema de la curva de Krischer teórica.

5.1.1. Fase o periodo de ajuste de temperatura

Puede verse en la Figura II.14 la representación esquemática donde los puntos I y I₁ representan el inicio de secado para un material frío y caliente respectivamente, es la fase de ajuste de temperatura.

La fase de ajuste I-II o I₁-II, es la zona en la cual la temperatura de la muestra se adapta a su alrededor. Corresponde a un ajuste de temperatura del lodo húmedo hasta alcanzar un valor estacionario, y puede ocurrir una disminución o aumento de la temperatura según el estado inicial del lodo.

Corresponde al aumento de temperatura del lodo a secar hasta alcanzar la temperatura húmeda correspondiente al ambiente de secado (zona I-II). Presentando generalmente una duración mínima, por lo general se desprecia.

5.1.2. Fase o período de flujo másico constante

Durante esta fase, a menudo isentálpico, el agua se evacúa con un flujo constante, zona II-III de la Figura II.14. La denominación isentálpico se utiliza cuando el calor intercambiado por convección se utiliza íntegramente para la vaporización de agua. Esto ya no es cierto cuando parte del calor se intercambia por radiación o por conducción además de la convección.

Denotamos por F_c el flujo de secado a velocidad de secado constante, durante esta fase denominada superficie o plano horizontal de secado del lodo.

Se considera que la evaporación ocurre en la superficie del lodo de depuración y la superficie está cubierta con una película continua de agua. El agua eliminada es libre y la superficie conserva la temperatura húmeda mencionada en el primer período. Esta fase dura mientras se suministre la superficie con suficiente fluido líquido proveniente de la parte interna del lodo. Así también el flujo calórico transportado no presenta variación durante este período.

Las resistencias a la transferencia se encuentran casi exclusivamente en el sistema fluido-superficie del lodo, interfase fluido-superficie. Por lo tanto, el flujo másico transportado no depende exclusivamente de las condiciones externas, es decir la velocidad superficial, humedad y temperatura del agente secante, la superficie expuesta al secado y la presión. Sin embargo, el estado de la superficie puede tener una importancia: el flujo puede ser mayor para una superficie rugosa que para una superficie plana (Geankoplis 1993).

5.1.3. La fase o periodo de flujo másico decreciente del lodo

Las interpretaciones difieren un poco según el periodo mencionado. Se citan normalmente dos definiciones: la definición del frente en retroceso y la definición para la superficie húmeda (Keey 1978). El primer modelo plantea la hipótesis que el frente de vaporización se desplaza hacia el interior del material mientras que el segundo establece que la vaporización se desarrolla en la superficie, pero que está parcialmente seca.

5.1.3.1. Primera fase del flujo másico

La primera fase del flujo másico decreciente (zona III-IV, Figura II.14) se inicia en el área de contacto del lodo de depuración para el transporte del fluido caliente, aire, y sea posible llegar al límite higroscópico, se ha eliminado toda el agua libre en la superficie, una parte del material se encuentra en el límite higroscópico, es decir cero contenidos de agua para materiales no higroscópicos.

Definimos la humedad crítica W_{crit} , volumen del fluido líquido, agua, es el valor de la humedad del lodo, momento que se inicia la fase del flujo másico decreciente.

En este periodo, son las diferentes resistencias internas del material a las transferencias de calor y de materia que controlan la velocidad de secado. Estas resistencias serán más grandes cuanto más lejos se situé el frente de secado del sistema fluido-superficie del lodo (Nadeau & Puiggali 1995).

La Figura II.14 muestra que una vez que el lodo está en el rango higroscópico, todo lo que queda es agua ligada, comienza la segunda fase de velocidad decreciente. El secado se completa cuando la humedad del lodo ha alcanzado su equilibrio con el medio exterior para las operaciones consideradas (zona IV-V₂). Además, el contenido de equilibrio depende solo de la temperatura y la humedad relativa del agente secante. Si el lodo no es higroscópico, este segundo período no existe: la primera zona de decrecimiento continúa hasta el final del secado (zona IV-V).

5.1.3.2. Segunda fase del flujo másico decreciente

En el área húmeda correspondiente al lodo de depuración, la caída del flujo de secado está relacionada con la aparición de zonas secas en la superficie del lodo, correspondientes a un contenido total de agua que equivale a W_{crit} . Sin embargo, si relacionamos el flujo con la fracción de superficie húmeda, el flujo es constante. Este período continúa hasta que la superficie exterior se seca completamente (zona III-IV).

En el esquema que se muestra (Figura II.14) puede verse que en la segunda zona para la velocidad decreciente refleja un control de la velocidad de secado del lodo de depuración por la difusión del agua dentro del lodo de depuración. El secado termina en la etapa de secado cero (zona IV-V₁) o a W_{eq} para los materiales higroscópicos (zona IV-V₂). El frente de secado, flujo de aire caliente, se puede retirar en el secado del lodo y entonces estaremos en el primer modelo.

5.2. Tipos de curvas de flujo según Sherwood

Esta interpretación de las curvas de Krischer (Figura II.14) corresponde a casos ideales. Globalmente, podemos considerar que las curvas presentan:

- Una zona de precalentamiento;
- Una fase de flujo másico constante influenciada por las variables del proceso de la operación;
- Una fase de flujo másico decreciente generalmente influenciada con respecto a las transferencias internas.

Según sea la representación geométrica para el transporte del flujo másico del lodo residual y su orientación de las concavidades (Figura II.15). De acuerdo a Sherwood (1936) fue uno de los primeros en proponer una clasificación basada en la mayor o menor importancia de las resistencias a las transferencias. La curva B, con la concavidad hacia arriba, es típica de un secado controlado por limitaciones intragranulares, asimismo la fase a flujo constante de la zona I-II en la Figura II.14 no siempre está presente.

La curva D, con una concavidad hacia abajo, grafica el caso opuesto donde las transferencias están limitadas por transferencias externas en la capa límite.

La curva A es un caso mixto: la parte de decrecimiento lineal está controlada por las resistencias externas a la transferencia, mientras que el final de la curva es similar a la curva B (concavidad hacia arriba) e indica las limitaciones intragranulares al final del secado.

La curva C corresponde a un material en el que se retira el frente de secado. Al principio del retroceso del frente, la difusión del líquido es limitante. Hacia el final del secado, es la difusión de agua en fase vapor a través del sólido que es limitante.

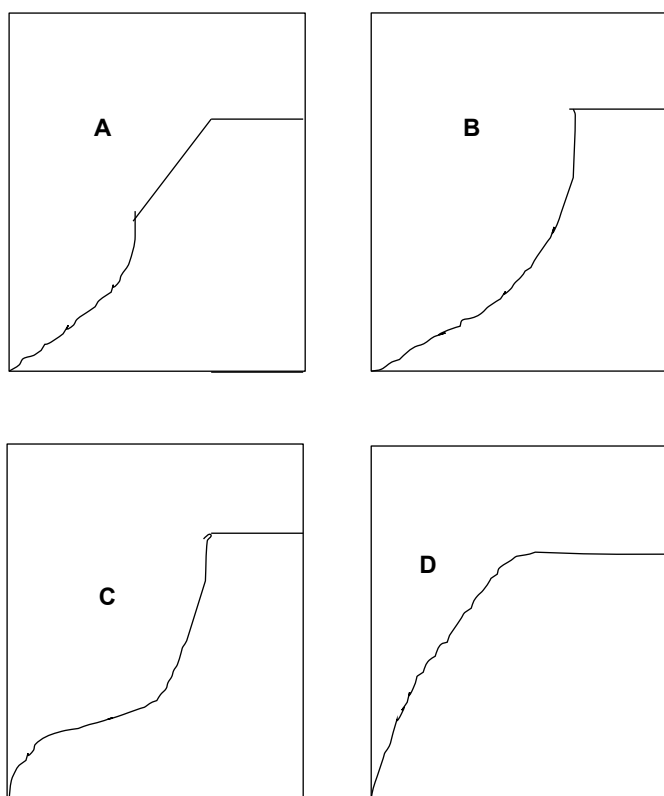


Figura II.15. Esquemas de tipos de curvas de flujo másico con respecto al agua libre del lodo.
Nota: Sherwood (1936).

5.3. Evolución de la temperatura en la superficie del lodo

La evolución de la temperatura puede ser relacionado a las diferentes fases de transporte del flujo másico del lodo residual, subproducto del proceso de la depuración de aguas residuales.

Una vez que el flujo de secado decrece, la temperatura del lodo aumenta hasta alcanzar la temperatura del agente secante al final del proceso de secado T_{air} (Figura II.16, curva 1)

La temperatura en el interior del material sigue una evolución prácticamente idéntica. La principal diferencia se produce durante la fase decreciente para el transporte del flujo másico; se observa que la temperatura aumenta lentamente al interior del material, debido a las resistencias que se producen durante la operación unitaria de secado para que se pueda realizar el transporte de energía.

De acuerdo con Puiggali (1993) señala que la superficie plana a temperatura húmeda existe solamente para los materiales donde el secado presenta una fase isoentálpica.

Cuando el producto experimenta transformaciones particulares (gelificación, solidificación o contracción), es posible que el secado no ocurra en condiciones isoentálpicas y que la temperatura aumente continuamente desde la temperatura de acumulación hasta la temperatura del aire (Figura II.16, curva 2).

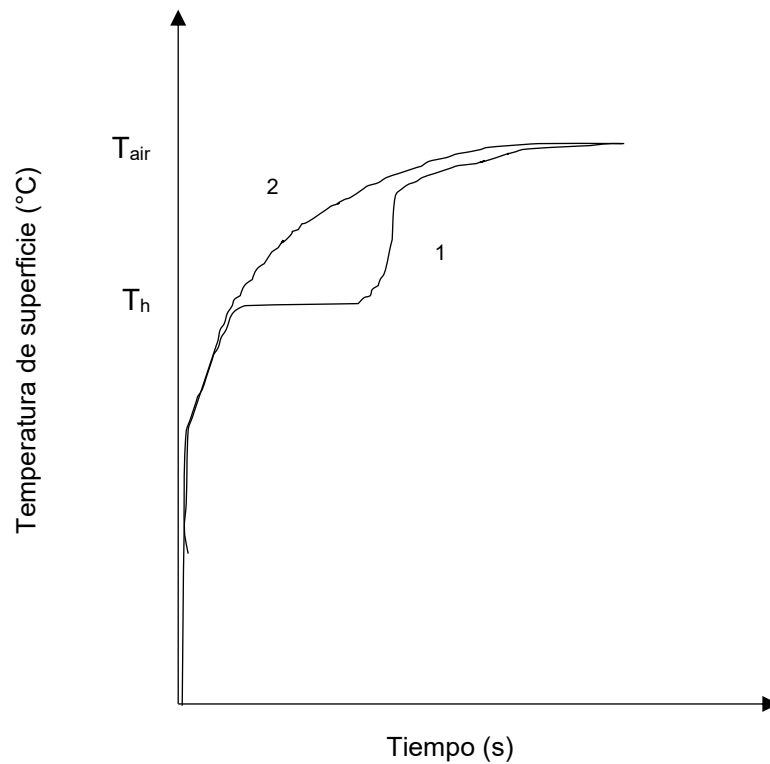


Figura II.16. Esquema mostrando el incremento de la temperatura en el área de transferencia con respecto al tiempo para un caso de secado (1) con o (2) sin fase isoentálpica.
Nota: Puiggali (1993).

6. Aproximación de la expresión matemática simplificada

En una primera aproximación de la expresión matemática, podemos considerar por separado los períodos a flujo constante y a flujo decreciente, y describir los mecanismos para el transporte del flujo másico y para el transporte de energía calórica producidos durante la operación unitaria realizados para el secado del lodo residual, subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales.

6.1. Periodo a flujo de secado constante del lodo de depuración

Las resistencias a la transferencia para la fase del flujo másico constante del lodo residual se limitan casi exclusivamente a una capa límite en la superficie del lodo (Figura II.17). La naturaleza y la estructura interna del sólido no intervienen. En este caso, los flujos de masa (Ec. II.14) y de calor (Ec. II.15) son expresados como el producto de un coeficiente de transferencia (k o h) y de una fuerza impulsora en la transferencia. El transporte del flujo térmico con respecto al flujo másico se relaciona a través del calor latente de vaporización (Ec. II.16). El aporte de calor por radiación o conducción se ignora en este proceso.

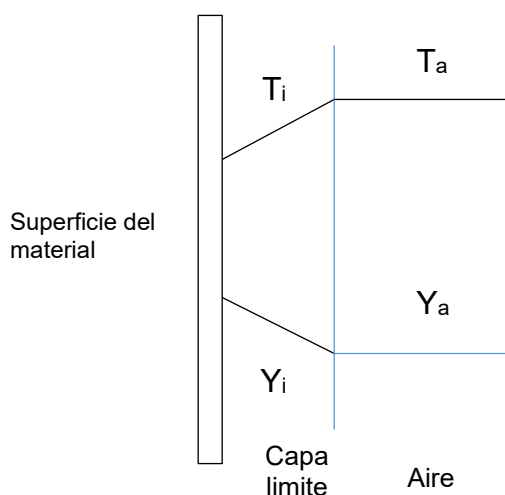


Figura II.17. Esquema de la capa límite en la superficie del lodo húmedo.

$$F = k\rho_a(Y_i - Y_a) \quad (\text{II.14})$$

$$Q = h(T_a - T_i) \quad (\text{II.15})$$

$$Q = F\Delta H_{vap} \quad (\text{II.16})$$

En la interfase, hacemos la hipótesis de un equilibrio termodinámico local: La humedad del aire con respecto a la temperatura están relacionados. Si la actividad del agua tiene un valor de 1, La temperatura que predomina en la interfase es la temperatura húmeda y la humedad corresponde al nivel de saturación. Para la fase del flujo másico sin variación del flujo, resulta la siguiente expresión matemática del flujo:

$$F_c = k\rho_a(Y_{sat}(T_h) - Y_a) \quad (\text{II.17})$$

Se muestra en la Ec. II.17 que un aumento del flujo puede ser provocado por:

- Un aumento del coeficiente de transferencia;
- Una disminución del contenido de humedad del aire de secado;
- Un aumento de la temperatura húmeda.

Los coeficientes para el transporte del flujo térmico y para el transporte del flujo másico pueden ser determinados mediante medición del flujo durante este período controlado por las resistencias extragranulares (Ec. II.14 y II.15).

Cuando la actividad del agua es inferior a 1, se puede observar que la temperatura en la interfase aumenta y que la fuerza impulsora a la transferencia disminuye después del descenso del fluido líquido, agua, en el sistema fluido-superficie, interfase. Progresivamente las resistencias intragranulares se vuelven limitantes.

6.2. Período de secado decreciente del lodo de depuración

6.2.1. Formas de transporte de agua

En la fase del flujo másico transportado del lodo para flujo decreciente de secado, la estructura del lodo de depuración determina la manera en que se produce el transporte del agua, líquida o vapor. Los dos principales mecanismos son la difusión y la capilaridad. En general, un mecanismo predomina en un momento dado, pero diferentes mecanismos pueden suceder en el tiempo.

En el caso de sistemas homogéneos donde las fases sólidas y líquidas son mutuamente solubles (jabones, pastas, gelatina,..), el transporte se efectúa por difusión. Podemos igualmente incluir en esta categoría los materiales con poros suficientemente finos ($r_p < 0,1 \mu\text{m}$) para los cuales el líquido está repartido uniformemente y los materiales fibrosos. Si bien el transporte de agua puede ser muy complejo en esta última categoría (fuerzas osmóticas, capilares,..), se asimila a la difusión para la modelización (Vanderschuren 2000).

El transporte se efectúa también por difusión al final del secado de ciertos materiales como arcilla, almidón, harina, papel, madera, lodo. Los modelos utilizados se basan en la Ley de Fick (Ec. II.18). N_a es el flujo másico que nos indica la rapidez de transferencia durante la difusión para la densidad de flujo de materia, D_a es la constante de proporcionalidad, difusividad o coeficiente de difusión, C_a la concentración másica por unidad de volumen del componente a, y $\left(\frac{dC_a}{dX}\right)$ es el gradiente de concentración, del componente a, en dirección del eje de coordenada X, en dirección de la difusión.

$$N_a = -D_a \frac{dC_a}{dX} \quad (\text{II.18})$$

En medios granulares o capilares-porosos ($r_p > 0,1$ a $1 \mu\text{m}$), la transferencia de líquido está asegurada por capilaridad (papel, textil, arena, ladrillos,...). La transferencia de líquido obedece a la ley de Darcy (Ec. II.19).

El movimiento del agua se efectúa en el sentido de las presiones negativas crecientes, es decir, hacia las zonas donde el líquido está en tensión.

En la ecuación de Darcy, para la permeabilidad, V_{MF} es la velocidad media de circulación del fluido, K es la constante de proporcionalidad, permeabilidad, ΔP es la caída de presión o pérdida de carga de un fluido debido a la fricción, L es la distancia recorrida durante la circulación del fluido. Siendo la caída de presión ΔP por unidad de longitud L , el gradiente de presión ($\Delta P/L$).

De igual forma se considera la ecuación de Fanning que nos relaciona la pérdida de carga por fricción con un factor de fricción f , F_A es la pérdida de carga o caída de presión de un fluido debido a la fricción, L es la distancia recorrida por el fluido, fluido pasado durante la circulación, V es la velocidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad, D es el diámetro de la conducción (Ec. II.20).

$$V_{MF} = K \left(\frac{-\Delta P}{L} \right) \quad (II.19)$$

$$F_A = \frac{4fLV^2}{2gD} \quad (II.20)$$

Cuando el agua está en forma de vapor, su desplazamiento puede ser efectuado por difusión (frente en retroceso) o difusión-sorción en el caso del vapor de agua ligada.

Históricamente, los primeros estudios sobre el secado consideraron solamente el mecanismo de transporte por difusión según la Ley de Fick (Lewis 1921, Sherwood 1929).

Unos años más tarde, bajo el impulso de las investigaciones en el campo de la física de los suelos, el transporte de líquido durante el secado de materiales porosos ha sido influenciado por la capilaridad.

Se han emitido restricciones sobre el uso del concepto de difusión de líquidos y han afirmado que el transporte de agua es inducido por los gradientes de presión en los sólidos granulares.

El mecanismo de transporte de agua por difusión es a menudo utilizado en la modelización matemática, aunque si ciertas reservas pueden ser expresadas acerca de la dirección física de tal mecanismo.

6.2.2. Expresiones matemáticas de secado del lodo de depuración

En una primera aproximación, la zona de secado a flujo decreciente puede ser expresada mediante leyes de procesos simples. La Ec. II.21 muestra que la disminución del flujo constante observada por debajo de la humedad crítica del agua W_{crit} está relacionada por una ley de potencia con la reducción del contenido de agua. Esta expresión permite dar cuenta, de manera simple, de la cinética de secado de diferentes tipos de productos secos en diversas configuraciones (Nadeau & Puiggali 1995).

$$F = F_c(T, HR, v) \left(\frac{W - W_{eq}}{W_{crit} - W_{eq}} \right)^\beta \quad (II.21)$$

La escritura e integración de los balances completos de masa y de calor han sido ampliamente estudiados para el caso de sólidos rígidos.

Desde los primeros trabajos de Lewis (1921) hasta la actualidad, expresiones matemáticas fenomenológicos cada vez más elaborados han sido propuestos por diferentes autores.

De acuerdo con Luikov (1966) ha aplicado la termodinámica de los fenómenos irreversibles para modelizar la transferencia acoplada de calor y materia en un medio poroso. Más tarde, el propuso una expresión matemática de dos zonas para el caso de sólidos capilares-porosos que desarrollan una zona seca en la superficie, modelo de frente en retroceso (Luikov 1975).

Para la determinación del coeficiente de rapidez para el transporte de materia, según Suzuki y Maeda (1968) formularon una expresión matemática teniendo en cuenta la coexistencia de zonas secas y húmedas en la superficie del material. Según (Krisher & Kast 1978) propusieron un modelo "multimecánico", considerando que la transferencia de agua se efectúa por capilaridad y difusión en fase gaseosa.

La teoría de la toma del promedio sobre un volumen elemental representativo ha sido introducida en el dominio del secado por Whitaker (1977). Perré desarrolló herramientas matemáticas adaptadas a esta teoría (Perré & Degiovanni 1990); (Perré & Turner 1999).

La mayoría de estas expresiones matemáticas asumen que la superficie externa del lodo es constante, o los lodos son un material particularmente deformable y sufren una importante contracción. La modelización del secado de los productos sometidos a deformación es más compleja porque necesita la integración de los aspectos mecánicos.

Si bien se establece que la toma en cuenta de la contracción es esencial, los avances en este dominio son recientes y relativamente poco numerosos. Este tipo de aproximación ha sido netamente utilizado en el dominio de los polímeros, de los suelos, de las arcillas (Ketelaars et al. 1992) y de los geles (Bogdanis 2001). Sin embargo, para los medios complejos y celulares como los productos agroalimentarios, en los que se pueden clasificar los lodos, este análisis es muy difícil (Ratti 1994).

Según (Sjöholm & Gekas 1995), han desviado, por ejemplo, los aspectos mecánicos incorporando el cambio de volumen para la rapidez del transporte de materia durante el secado de rodajas de manzana.

La descripción y la toma en consideración de la contracción son indispensables en este estudio. El tema siguiente describe el fenómeno de contracción en el lodo de depuración.

7. Reducción de volumen del lodo

En el proceso de la operación unitaria utilizando flujo térmico como energía calorífica para el secado, algunos materiales se comportan como materiales rígidos, mientras que otros se contraen y presentan una reducción de volumen. En la primera categoría, toda el agua evacuada es reemplazada por el aire y el material final es poroso (ladrillo, aerogel, arcillas de bajo contenido de agua,). Para la segunda categoría, los elementos que constituyen la estructura sólida se

aprietan bajo la influencia de fuerzas internas (xerogeles, arcillas con alto contenido de agua, lodos de depuración, etc.).

Esta contracción se denomina reducción de volumen del sólido durante la operación de secado del subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales. La reducción de volumen se califica como libre cuando el material se contrae libremente bajo la influencia de condiciones externas homogéneas.

La reducción de volumen se dice que es ideal o total cuando la disminución del volumen corresponde exactamente al volumen de agua evaporada: el material se comporta como un medio poroso saturado, no se desarrolla ninguna porosidad, el agua está ocupando todos los poros de la estructura sólida.

La mayoría de los sólidos pastosos exhiben un comportamiento intermedio: la reducción de volumen es ideal mientras la estructura sólida siga siendo deformable, y se detiene cuando la estructura alcanza un cierto límite de rigidez.

Según Brinker y Scherer (1990) describen en detalle el mecanismo de contracción de los geles, al que los lodos de depuración pueden asimilarse en cierta medida. Los elementos principales de esta descripción adaptada a los lodos se incluyen aquí. Varios fenómenos pueden causar la contracción: reacciones químicas (reacciones de condensación), fuerzas osmóticas, fuerzas de repulsión (doble capa electrónica) o fuerzas capilares.

Para los subproductos generados durante el proceso de la depuración del afluente, parece que la capilaridad influye en la contracción. Luego, durante el secado, se puede pensar que el fenómeno mayor que se produce es un transporte de salida del agua y se puede despreciar las reacciones químicas o las fuerzas osmóticas. La salida del agua es influenciada por las tensiones superficiales como se explica en los párrafos siguientes.

La existencia de una interfase está asociada a una energía superficial. En el caso de un líquido en contacto con una fase gaseosa, las moléculas en la superficie tienen una energía más importante porque parte de las fuerzas de cohesión no están equilibradas.

Este desequilibrio provoca la atracción de las moléculas de la superficie hacia el interior con el fin de minimizar la energía del sistema. Cuando las tres fases están

en contacto (sólido, líquido, y gas), el sistema evolucionará a fin de minimizar su energía.

Veamos el caso de una película de agua sobre una superficie sólida. Como se muestra en la Figura II.18, hay dos interfases caracterizadas con una energía diferente, sólido-líquida (γ_{sl}) y líquido-gas (γ_{lg}).

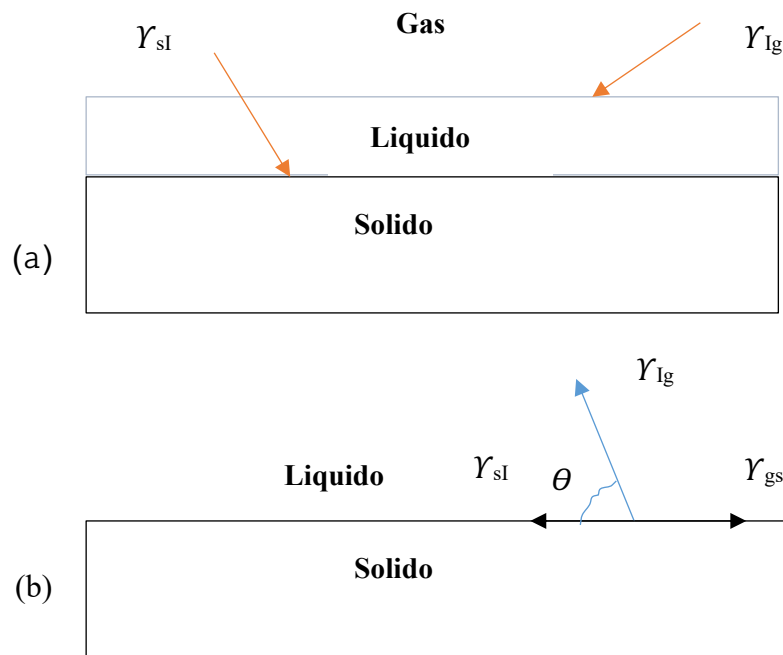


Figura II.18. Esquemas de la película de agua sobre una superficie sólida: a) líquido humectante b) líquido no humectante, esquema del ángulo de contacto.

Cuando se distribuye la película húmeda sobre la superficie, una parte de la interfase solido-gas va ser reemplazada por una doble interfase con el cambio de energía siguiente:

$$\Delta E = \gamma_{ls} + \gamma_{lg} - \gamma_{gs} \quad (\text{II.22})$$

Si la variación es negativa, la película humedecida se va distribuir espontáneamente. De lo contrario, la interfase va ser caracterizada por un ángulo de contacto θ de manera a equilibrar las fuerzas presentes.

El líquido es humectante (caso de la película, $\theta = 0$). El ascenso de un líquido en un capilar responde a esta minimización de la energía por el reemplazo de la interfase gas-sólido por una interfase líquido-sólido. La ganancia de energía es la siguiente: $2\pi r h (\gamma_{gs} - \gamma_{ls})$, r es el radio del capilar y h la altura de ascenso del líquido. El líquido realiza un trabajo igual a $P_c \Delta V$, P_c es la presión capilar y ΔV el volumen de líquido desplazado. El balance de energía da:

$$P_c \Delta V = 2\pi r h (\gamma_{gs} - \gamma_{ls}) \quad (II.23)$$

Introduciendo la expresión del volumen y utilizando la Ec. II.23, obtenemos la expresión de la presión capilar (Ec. II.24). El hecho de que sea negativo indica que el líquido está en tensión en el capilar.

$$P_c = - \frac{2\gamma_{lg} \cos(\theta)}{r} \quad (II.24)$$

Por otro lado, Laplace demostró que existe una variación de la presión en el menisco en una interfase líquido-gas, la presión la más baja prevalece en el lado convexo. R siendo el radio de curvatura, en el caso de un menisco hemisférico esta diferencia es:

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{lg}}{R} \quad (II.25)$$

La comparación de la Ec. II.24 y II.25 muestra que, en un capilar, el menisco es hemisférico con un radio de curvatura igual a $r/\cos(\theta)$.

Durante el secado de un producto poroso, si imaginamos que el material se vuelve insaturado en la superficie debido a la salida de agua, el líquido

restante se pondrá en tensión debido al desarrollo de una presión capilar. La tensión del líquido tiene dos consecuencias.

La primera es la contracción del sólido que soporta la tensión y la segunda es el transporte del fluido líquido, agua, en dirección del flujo según el gradiente de presión.

El proceso de la contracción es, por lo tanto, la consecuencia del desarrollo de presiones capilares no despreciables, que es el caso de los poros de pequeños diámetros (Ec. II.23).

La importancia de la contracción dependerá de las propiedades de compresión del sólido. En efecto, durante el secado, la estructura sólida tiende a endurecerse de tal manera que la contracción se detiene antes de que termine la eliminación del agua.

Esta parte ha puesto las bases de las nociones útiles en el estudio del secado de un producto en general.

CAPITULO III: METODOLOGIA

Se utilizan diferentes métodos de caracterización del lodo residual para la valorización agrícola del lodo B, subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, para tal fin se realiza el proceso para estabilizar el subproducto, denominado lodo residual B, proceso de estabilización realizado con la finalidad de que el subproducto residual, lodo B, pueda ser utilizado en el acondicionamiento del suelo, un producto final estabilizado que podrá ser utilizado para mejorar las características físicas, químicas y/o biológicas del suelo. Asimismo, se consideran valores referenciales y así también los niveles permisibles especificados en las normas ambientales reglamentarias.

Los **métodos** utilizados **para la caracterización** y estabilización del subproducto que ha sido obtenido del tratamiento de aguas residuales, lodo residual B, son los siguientes:

3.1. Concentración de sustancia residual seca (SS o MS)

Esta medida se realiza colocando la muestra en un horno a 105°C durante 24 h (APHA et al. 1985). Después de la operación unitaria en el proceso de secado para la muestra de sustancia residual, lodo residual, se obtienen resultados para los pesos iniciales y finales, luego se puede calcular el peso final de la sustancia residual seca.

El cálculo para la concentración de materia seca en la muestra de la sustancia residual se expresa en porcentaje:

$$MS(\%) = (M_f/M_0)100 \quad (III.1)$$

En la Figura III.1 se muestra el esquema para los procesos de secado de la muestra húmeda, MH, y de calcinación de la muestra seca, MS, del lodo de depuración.

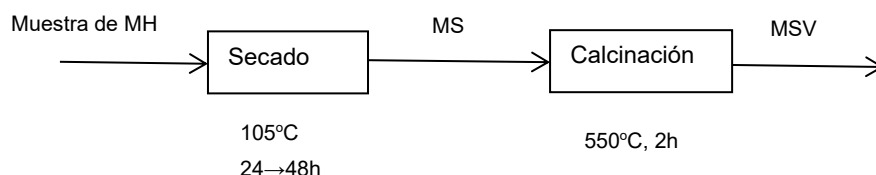


Figura III.1. Representación esquemática del secado de muestra húmeda, materia húmeda MH, y calcinación de la materia seca MS del lodo de depuración.

3.2. Concentración de sustancia residual volátil (SRV, MV, o SV)

El residuo seco obtenido de la medición de la materia seca se tritura y es colocado durante dos horas en un horno a 550°C. Después del proceso de calcinación para la muestra de sustancia residual seca, lodo residual seco, se obtienen resultados para los pesos iniciales y finales, luego se puede calcular el peso final de la sustancia residual volátil.

Para la mayoría de lodos, la determinación de la materia volátil es una evaluación aproximada de la materia orgánica (Degrémont 1989).

La concentración se expresa en porcentaje en relación a la materia seca.

M_0 es la sustancia residual seca al inicio de la calcinación y M_f el peso final de la sustancia residual seca al finalizar la calcinación:

$$MV(\% \text{ sobre MS}) = ((M_0 - M_f)/M_0)100 \quad (\text{III.2})$$

Luego se procede a calcular concentraciones de MV en la muestra, expresado en porcentaje.

3.3. Estabilización del subproducto de la depuración del afluente

Según Meneses y Cabrera (2022), indicó que, para la estabilización del subproducto, lodo residual B, generado durante el proceso de la depuración de aguas residuales, es necesario adicionar sustancia alcalina al subproducto residual con la finalidad de obtener como resultado de la estabilización del lodo residual relaciones de concentración de potencial de hidrógeno superiores a siete, y después mantenerlo constante para relaciones de concentración de potencial de hidrógeno aproximados a doce. Proceso que ha sido realizado con el propósito de darle estabilización al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales y se le pueda dar una destinación de valorización, con el propósito que el subproducto residual pueda beneficiar a la agricultura y minimizar la contaminación del medio exterior, y así también minimizar riesgos ambientales como consecuencia de su uso, darle estabilidad a la materia orgánica y obtener un producto final estabilizado libre de patógenos.

Si presentan resultados favorables, tablas IV.16 al IV.23 y IV.26 al IV.28, y considerando los valores permitidos especificados en las normas ambientales. Como consecuencia, de los resultados obtenidos, los lodos residuales pueden ser valorizados en la agricultura en el acondicionamiento del suelo, mediante el esparcido agrícola o también ser utilizados en la rehabilitación de suelos industriales.

El Objetivo principal de la estabilización del lodo de depuración es determinar la eficacia de la higienización de lodos residuales agregando materia alcalina al lodo en la elaboración de un producto permisible para darle una destinación final de valorización agrícola, para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

Mostrándose, de acuerdo a los valores que han sido obtenidos en este trabajo, que el tratamiento realizado para la estabilización del lodo residual con materia alcalina es favorable para la higienización del lodo, y también para obtener un producto estabilizado de calidad para darle una destinación final de valorización agrícola.

El proceso para la estabilización del subproducto, lodo residual, generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales con materia alcalina, ha sido realizado para minimizar agentes patógenos, eliminar malos olores, su potencial de descomposición, y se pueda utilizar sus valores fertilizantes para beneficio de la agricultura.

3.4. Caracterización del lodo de depuración

Se realiza la determinación de los parámetros fisicoquímicos de lodos de depuración que permitan evaluar y comparar los resultados con cuantificaciones referenciales a fin de establecer los posibles usos de los lodos, o los tratamientos previos para su valorización agrícola y pueda beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes.

3.5. Tipo y diseño de investigación

a. Tipo de investigación

Es una investigación **científica** (mediante un método científico basado en la observación experimental) – **tecnológico**, que correlaciona datos numéricos experimentales a fin de aplicarlos para la estabilización y valorización agrícola de lodos residuales, subproducto de tratamientos de aguas residuales, lodos denominados A y B, generados en plantas de operaciones unitarias para procesos de depuración de aguas residuales.

b. Enfoque

Se utilizan análisis estadísticos y datos numéricos (enfoque cuantitativo), para medir y cuantificar la valorización agrícola del lodo residual, mediante la observación experimental y análisis de datos, y se pueda verificar la hipótesis, y las operaciones unitarias para procesos de secado convectivo del lodo residual, con la finalidad de correlacionar datos y obtener las diferentes variables que influyen durante la estabilización del lodo residual B, de tal forma que se le pueda

dar una destinación final de valorización agrícola al lodo residual B en beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación ambiental.

c. Diseño

Desde el punto de vista del diseño de la investigación científica se realizó una investigación experimental, y desde el punto de vista de la naturaleza de los datos se realizó la investigación cuantitativa.

En la investigación experimental: en este diseño, los datos fueron obtenidos de experimentos donde se manipulan las variables independientes, que actúan como predictores, se miden las respuestas para variables dependientes y se controlan variables extrañas o externas, variables problemáticas, que se encuentran presentes durante el proceso de la estabilización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales.

La investigación cuantitativa, se realiza porque los objetivos es la cuantificación de los hechos, y se pueda obtener datos que nos permitan valorizar y utilizar el subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales.

El **diseño** para la **investigación científica** fue realizado con el propósito de darle valorización agrícola al lodo de depuración mediante la preprueba (causa) y posprueba (efecto) para la presente investigación científica.

En el esquema siguiente, Figura III.2, representación esquemática realizada con el objetivo de diseñar dos grupos considerados: un grupo que ha sido denominado experimental y otro grupo denominado grupo de control, las muestras son utilizadas para el denominado grupo experimental (primera línea horizontal superior) y para el denominado grupo de control (segunda línea horizontal inferior), luego se les da la evaluación para la entrada o pre prueba.

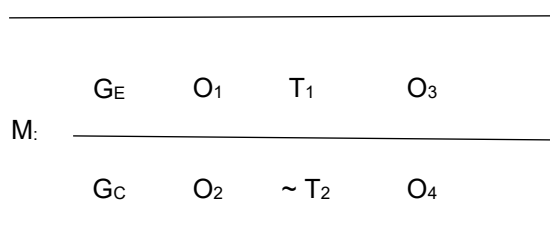


Figura III.2. Esquema del diseño de control antes y después (preprueba-posprueba).

Dónde:

M: muestra de estudio

O₁, O₂: evaluación de entrada o preprueba, tanto al denominado grupo experimental y al denominado grupo de control.

G_E: grupo experimental, se manipulará la variable independiente.

G_C: grupo de control

~ T₂: con el grupo de control no se hará tratamiento alguno de estabilización del lodo de depuración, solo se controlará sistemáticamente las variables intervinientes que no influyan más que la variable independiente.

O₃, O₄: post prueba o evaluación de salida al grupo experimental (después de la estabilización del lodo de depuración) y al grupo de control (en el grupo de control no se realizará estabilización de lodos de depuración alguna).

Mediante el diseño de investigación científica considerado se analizó sobre el nivel para la estabilización del subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales a través de la aplicación de la preprueba sobre el lodo de depuración.

Después de los resultados obtenidos se aplica la estabilización como parte del tratamiento, luego se aplicó la posprueba para verificar la eficacia de la estabilización del lodo.

Kerlinger (2002), explicó sobre la investigación científica considerando el diseño para la investigación mediante observaciones que han sido realizadas en la naturaleza, observaciones realizadas en el medio exterior con la finalidad de obtener resultados favorables para el proyecto a ser desarrollado, de igual forma han sido considerados en este trabajo realizado los aportes relevantes mencionados por Kerlinger (2002) con el propósito de darle una destinación de valorización al subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales.

Las pruebas se realizaron con el objetivo de obtener la cuantificación de las pruebas realizadas al lodo residual, subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, con la finalidad de obtener valores favorables para los pesos de la sustancia residual seca y materia volátil, y parámetros de los lodos de depuración a analizar que nos permiten tener resultados para una destinación

de valorización del subproducto de depuración de aguas residuales generados en PTAR domésticas de Lima metropolitana.

La investigación experimental se realizó agregando al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales cantidades definidas de sustancia alcalina.

Luego de tratamientos realizados al lodo de depuración, y por los resultados obtenidos en este trabajo de investigación han permitido confirmar que el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales ha sido estabilizado y sus valores fertilizantes pueden ser utilizados en beneficio de la agricultura y así también para la minimización de la contaminación ambiental.

Mediante el diseño experimental se probará que la hipótesis propuesta en el presente trabajo de investigación pueda ser considerada científica y sea objetivamente contrastable con datos empíricos. Considerando las hipótesis planteadas en el presente trabajo para lodos de depuración de aguas residuales generados en PTAR domésticas de Lima metropolitana, y luego del tratamiento de la estabilización y manipulación de las variables correspondientes, como consecuencia se observa cambios en el lodo de depuración, dando origen a un producto final (lodo valorizado para el esparcido agrícola) que beneficiará a la agricultura y al medio ambiente.

De esa manera se puede dar solución a problemas que pueda generar el lodo de depuración en su estado natural.

Luego, utilizando el método científico se puede dar respuesta a las hipótesis planteadas, sea contrastable, y la idea planteada en este trabajo de investigación pueda ser considerada científica, así también compatible con el conocimiento científico.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se muestran resultados al vincular valores obtenidos en este trabajo realizado y los procesos de la operación unitaria para la operación del secado convectivo que han sido realizados en el subproducto generado del proceso de depuración de aguas residuales, lodo residual A y B. Se estudia la influencia de variables externas para la operación del secado convectivo (la temperatura del aire T , la velocidad superficial del aire v , y la humedad del aire Y) durante el secado convectivo del lodo de depuración para los lodos A y B considerados en este trabajo de investigación. Según los valores permisibles obtenidos del tratamiento realizado para la estabilización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, lodo residual B, se puede confirmar que el lodo residual B ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, y beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes y a la minimización de la contaminación ambiental.

Después de la toma de muestras de cada uno de los lodos húmedos, los valores para la sustancia residual seca y volátil han sido determinados, expresados en porcentajes (Tabla IV.1). El lodo A, ha conservado las mismas características, contiene mayor humedad, mientras que el lodo B presenta un contenido de materia seca mayor, menor humedad y un contenido de materias volátiles inferior que el lodo A.

La afirmación mencionada se puede explicar por la toma de muestra. El lodo A ha sido recogido cuando la unidad de deshidratación estaba en funcionamiento, mientras que el lodo B fue recogido al pie del espesador. En el primer caso, lodo A, la composición del lodo es más constante, régimen de flujo establecido, en relación al segundo, lodo B, donde las primeras fracciones recogidas son más espesas y dependen de la manera en que el técnico recoja la muestra.

El contenido de materia seca y volátiles han sido obtenidos para los lodos A y B sin estabilizar y estabilizado respectivamente (Tabla IV.1).

Tabla IV.1. *Contenido de materia seca y materias volátiles obtenidos antes y después de la estabilización de los lodos A y B*

LODO	MS (%)	Materias volátiles (% MS)
Lodo A	13.09 ± 0.02	65 ± 1.3
Lodo B	15.12 ± 0.01	41 ± 0.6

El efecto considerando las variables externas experimentales durante el proceso de la operación unitaria para la operación del secado convectivo y así también para el proceso de la estabilización del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, lodo residual A y B, han sido estudiadas. Para este fin un plan experimental de tres niveles ha sido realizado. Las temperaturas estudiadas han sido fijados a 80, 120 y 160°C. El aire ha sido utilizado a la humedad del medio ambiente y la adición de vapor ha permitido alcanzar las presiones parciales de vapor de agua, aproximadamente de 20 y 40kPa. Estas presiones parciales corresponden a las humedades absolutas de 0,15 y 0,41 kg/kg. Considerando la temperatura y la humedad del aire, los caudales para el aire fueron escogidos para alcanzar velocidades superficiales del aire de 1, 2 y 3 m/s. Las condiciones experimentales elegidas corresponden a situaciones encontradas en el secado industrial de lodos (Janssens 1998).

Para el lodo de depuración B, como se indican un plan experimental para la influencia, durante el secado y durante la estabilización del subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales, para las condiciones externas experimentales y tres niveles experimentales han sido considerados, que corresponde a 27 puntos experimentales diferentes. El caudal de aire ha sido escogido de manera alcanzar velocidades superficiales del aire de 1, 2 y 3 m/s. El aire a humedad ambiente, ha sido utilizado ($H_A = 0,006$ kg/kg), humedad del aire. La adición de vapor se realizó para alcanzar otros dos niveles de

humedad absoluta del aire, es decir 0,15 y 0,41 kg/kg o presiones parciales de vapor de 20 y 40 kPa.

En la práctica, algunas pruebas que corresponden a una alta humedad del aire no pudieron ser terminadas a causa de las inestabilidades durante el pesaje. Para los puntos del plan, las pruebas de secado del lodo de depuración han sido realizadas en continuo para obtener las curvas de pérdida de masa.

Se muestra en la Tabla IV.2 las condiciones de operaciones realizadas en el lodo de depuración B.

Tabla IV.2. Plan experimental realizado en muestras del lodo B

Prueba número	Temperatura (°C)	Velocidad	Humedad		
			H _R (%)	H _A (kg/kgSS)	P _V
1 ^w	79.9	0.9	x	x	x
2 ^w	79.9	1.9	x	x	x
3 ^w	79.9	2.9	x	x	x
4	79.9	0.96	37.8	0.14	18000
5	79.9	1.8	35.8	0.12	16600
6	78.8	2.6	36.7	0.12	16300
7 ^y	77.8	0.87	77.7	0.27	32200
8 ^y	77.8	1.6	75.7	0.28	32700
9 ^z	z	z	z	z	z
10 ^w	119.9	0.9	x	x	x
11 ^w	119.9	1.9	x	x	x
12 ^w	119.9	2.9	x	x	x
13	117	0.89	5.7	0.07	129000
14 ^y	122	1.89	6.7	0.10	16300
15	118.9	2.6	7.8	0.12	17400
16	117	0.87	16.8	0.29	33500
17 ^y	122	1.6	14.7	0.29	31800
18 ^z	z	z	z	z	z
19 ^w	160	1	x	x	x
20 ^w	160	2	x	x	x
21 ^w	160	3	x	x	x
22	160	1.05	4	0.19	24700
23 ^y	160	2.14	4	0.19	24700
24	160	3	x	x	x
25	161	0.98	5	0.37	38200
26	162	2.01	6	0.38	38900
27 ^y	162	3.0	6	0.38	38900

(w): No hay desviación estándar en la velocidad y temperatura, el sensor no registra datos (x): Sin registro del sensor de control temperatura-humedad (y): secado con interferencias (z): punto no realizado.

Algunas mediciones indicadas por puntos (x) de control de temperatura y humedad del aire no han sido realizadas y/o registradas por razones materiales. (w) la desviación estándar no se pudo calcular para estos puntos

experimentales. Las pruebas 1, 2, 3, 10, 11, 12, 19, 20 y 21 se realizaron con aire a humedad ambiental, (y) Ciertas pruebas a alta humedad relativa fueron perturbadas por la condensación y la inestabilidad de la balanza durante la medición. Los errores experimentales son más importantes para los resultados correspondientes a estos puntos.

En general, se observó que la realización de las pruebas con aire humidificado es particularmente delicada. En efecto, el funcionamiento del generador de vapor es tal que la producción se detiene cuando el nivel de agua necesita ser completado. En consecuencia, durante la prueba de secado, la producción de vapor puede ser interrumpida brevemente hasta cinco veces. Estas fases transitorias influyen en el desarrollo del secado del lodo y también tienen el efecto de que el contenido de humedad del aire es inferior al valor objetivo del plan experimental.

Puede verse en la Figura IV.1 las fases transitorias en el caso de la prueba 17. Si se observa la curva de pérdida de masa (Figura IV.1) se puede ver dos ligeras roturas (círculos). Estas roturas se reflejan en la curva de pérdida de masa durante el proceso para la operación unitaria de la operación del secado convectivo del lodo residual B.

La falta de control del sistema indica que la cinética de secado convectivo del lodo de depuración B está fuertemente influenciada por las condiciones externas, y por lo tanto las resistencias extragranulares predominan durante una parte del secado del lodo de depuración.

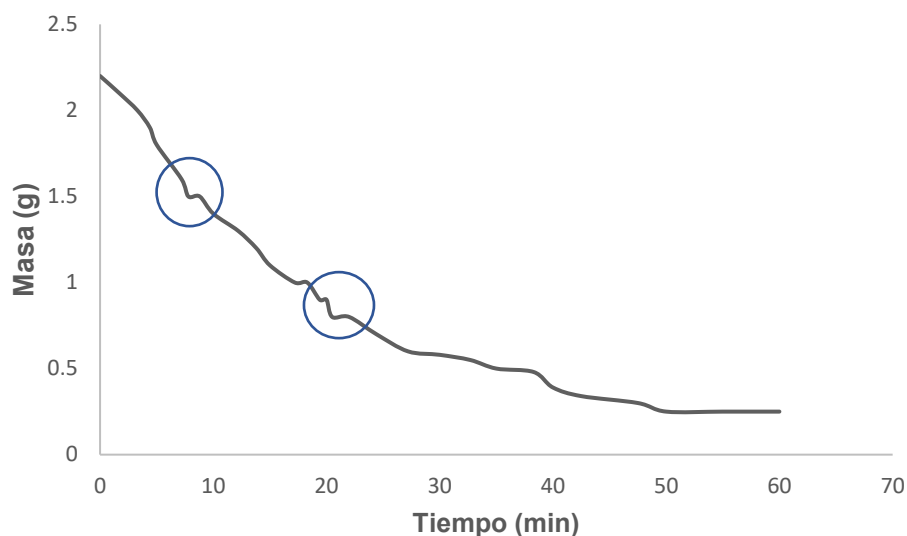


Figura IV.1. Curva de pérdida de masa con respecto al tiempo de secado del lodo residual, mostrándose las roturas, círculos, durante el secado. Lodo B

Puede verse en la Figura IV.1, la curva para la pérdida de masa del agua que ha sido transportada durante la operación unitaria del secado convectivo del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, lodo residual B, en función del tiempo de secado, para la prueba experimental 17 realizada a la temperatura del aire 122°C, velocidad superficial del aire 1.7 m/s y humedad absoluta del aire 0,29 kg/kg.

Para el lodo de depuración A, el mismo plan experimental ha sido realizado en muestras del lodo A. Se indican en la Tabla IV.3 los procesos que han sido realizados. Los problemas para la regulación de la alta humedad mencionados anteriormente también se presentan para el lodo A.

Tabla IV.3. Plan experimental realizado con muestras de lodo A

Prueba número	Temperatura (°C)	Velocidad	Humedad		
			H _R (%)	H _A (kg/kg SS)	P _V
1	79.9	0.9	x	0.005	x
2	79.9	1.8	x	0.005	x
3	81.8	2.9	x	0.006	x
4	77.8	0.9	41.8	0.15	17990
5	79.9	2.0	35.9	0.14	1700
6 ^y	80.8	3.0	35.8	0.14	17200
7 ^y	78.8	0.9	71	0.28	31800
8 ^y	77.8	2.0	68	0.27	31300
9 ^y	79.9	2.7	71	0.30	33200
10	120	1	x	0.006	x
11	120	2	x	0.006	x
12	122	3	x	0.006	x
13	117	1.1	9	0.12	16100
14	120	1.8	7	0.12	15800
15 ^y	119	2.7	8	0.11	15300
16	120	0.8	16	0.26	29700
17	120	1.7	17	0.29	31700
18	120	2.7	18	0.33	35700
19	160	1	x	0.006	x
20	160	2	x	0.006	x
21	164	3	x	0.006	x
22	162	1.1	4	0.21	25500
23	160	2.1	4	0.20	24700
24 ^y	162	3.2	4	0.21	26500
25 ^y	162	1.0	6	0.39	39100
26 ^y	161	2.3	6	0.38	38100
27	165	3.1	6	0.44	42100

(x): Sin registro de la humedad del aire a través del sensor (y): secado con interferencias.

4.1.1. Curvas de contracción de secado del lodo de depuración

Durante el secado convectivo del lodo de depuración, se produce la contracción del lodo a causa de la pérdida de agua y da como resultado una pérdida del volumen del lodo de depuración de aguas residuales.

Las curvas de contracción muestran la evolución del volumen estándar por el volumen inicial, V/V_i , en función de la masa del fluido incompresible, agua, estandarizado considerando la masa inicial del fluido líquido incompresible, agua, W/W_i .

En las pruebas realizadas, se utilizan muestras para realizar un secado del lodo continuo. Las figuras tienen dos puntos, al inicio ($W/W_i = 1$) y al final del

secado ($W/W_i = 0$). Para facilitar la lectura de las figuras, los puntos están ligeramente desplazados para $W/W_i = 0$.

Las curvas de contracción se determinaron para la mayoría de los puntos experimentales (excepto los puntos 6, 7 y 9). Según la Figura IV.2, puede verse la curva obtenida cuando se consideran valores para el volumen estandarizado que viene dado por su valor inicial V/V_i con respecto a la masa del fluido, agua, en relación a su valor inicial W/W_i . Las curvas de contracción presentan una zona de contracción lineal que continúa con un pequeño plano o placa horizontal al final del secado, la línea vertical indica la separación en la figura.

El plano horizontal indica que la muestra ha alcanzado sus dimensiones finales. La presencia de una zona lineal es generalmente característico de una contracción ideal, es decir, para el cual la reducción del volumen de la muestra corresponde exactamente por efecto de la disipación de cierta cantidad del fluido líquido incompresible que ha sido evaporada por secado.

Las curvas de contracción experimentales han sido comparadas con la contracción ideal. Observamos una buena correspondencia entre las curvas experimentales y la contracción ideal durante la duración de la zona lineal. Desde el momento donde termina la contracción, el volumen experimental medido es mayor que el volumen correspondiente a una contracción ideal.

El valor límite del contenido de humedad del lodo de depuración en la cual la contracción termina, así como el valor final del volumen V/V_i han sido determinados para cada curva por medio de un programa de regresión lineal.

Se trata de ajustar sucesivamente dos líneas rectas en los puntos experimentales (Figura IV.3).

La primera línea recta parte del punto (1,1) y finaliza cuando la contracción se detiene en el punto $((W/W_i)_{FS}, (V/V_i)_{FS})$. La segunda línea es una línea horizontal que representa al plano horizontal en (V/V_i) final. Dado que el punto (1,1) debe pertenecer a la primera línea recta, sólo hay dos parámetros a ajustar: el valor final de V/V_i , $(V/V_i)_{FS}$ y el valor del límite de secado $(W/W_i)_{FS}$ (Ec. IV.1).

$$\frac{V}{V_i} = 1 + \frac{1 - (V/V_i)_{FS}}{1 - (W/W_i)_{FS}} \left(\frac{W}{W_i} - 1 \right) \quad \text{para} \quad \frac{W}{W_i} > \left(\frac{W}{W_i} \right)_{FS} \quad (IV.1)$$

$$\frac{V}{V_i} = \left(\frac{V}{V_i} \right)_{FS} \quad \text{para} \quad \frac{W}{W_i} \leq \left(\frac{W}{W_i} \right)_{FS}$$

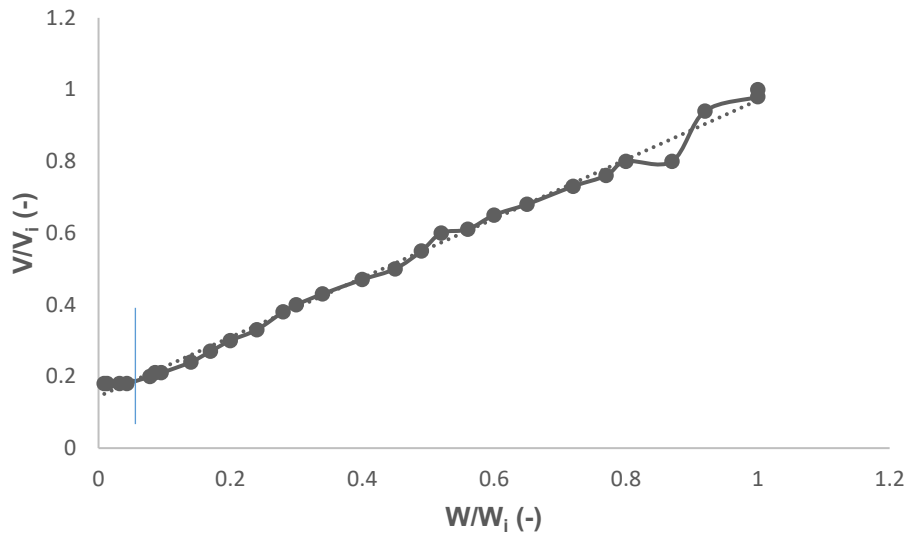


Figura IV.2. Curva de contracción obtenida en las pruebas de secado. lodo B

En la Figura IV.2 se muestra la curva de contracción para el secado del lodo de depuración B, donde la curva de contracción se ajusta a una línea recta.

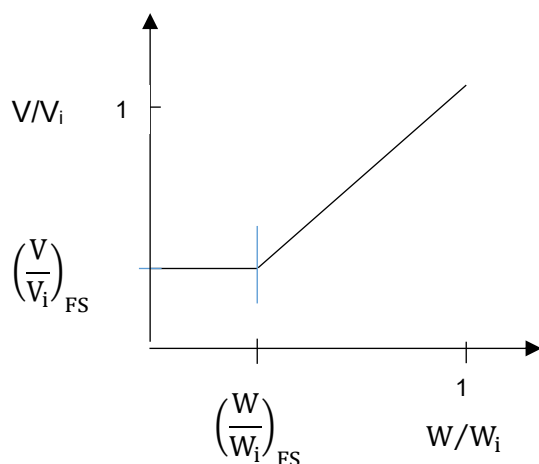


Figura IV.3. Esquema para la representación de las dos líneas rectas ajustadas en las curvas de contracción y la ubicación de los dos parámetros de ajuste.

Durante el secado del lodo de depuración, la estructura del lodo se endurece y la contracción se detiene antes de terminar la eliminación del agua.

4.2. Verificación de hipótesis

Se menciona como hipótesis general que el subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, lodo residual, en plantas de operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales, pueden ser valorizados.

Asimismo, en la hipótesis específica se afirma que las características problemáticas del lodo residual, subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, influyen para su uso del lodo residual en cultivos agrícolas.

Las condiciones externas de operación presentes influyen durante el secado convectivo de las muestras utilizadas para realizar las pruebas experimentales en los lodos sin estabilizar y estabilizado, siendo importante la operación de secado convectivo para la estabilización del lodo residual B. Luego, el secado convectivo de las muestras utilizadas ha permitido generar la posibilidad, mediante las relaciones de concentración que han sido obtenidos para procesos

de estabilización de los lodos residuales A y B, de confirmar si el lodo de depuración B puede o no ser estabilizado y como consecuencia se le pueda dar una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

Para confirmar la afirmación mencionada se realizó el secado convectivo de las muestras consideradas, se observa la evolución de las alturas en la contracción de las muestras y luego se contrasta los resultados obtenidos de las pruebas de secado convectivo y estabilización del lodo de depuración A y B con las normas ambientales reglamentarias. Se estudia el efecto de las variables externas, en la operación unitaria de secado convectivo del lodo residual, durante el secado convectivo y el proceso de estabilización para el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales considerados en el presente trabajo. Asimismo, para tal fin se considera los resultados obtenidos para los parámetros de la regresión multilíneal, los límites de confianza del 95% (L_{CN}), y el error cuadrático medio de la regresión (ECR) que se muestran en la Tabla IV.4.

Puede verse que el límite W/W_i , contenido de humedad sobre base seca, es siempre muy pequeño. Sin embargo, es significativamente diferente de cero en más de la mitad de las pruebas (en negrita), es decir, el valor "cero" no está dentro del intervalo de confianza del parámetro.

La contracción final de V/V_i no es significativamente diferente de cero para las pruebas 4 y 8.

La Tabla IV.4, indican valores para límites de confianza, L_{CN} , a 95% y el error cuadrático medio de la regresión, ECR, obtenidos al determinar el límite por debajo del cual termina la contracción y la contracción final para el Lodo B.

Tabla IV.4. Valores del límite de confianza, L_{CN} , a 95% y ECR obtenidos al determinar el límite por debajo del cual cesa la contracción y la contracción final-Lodo B

Prueba número	$(W/W_i)_{FS}$	L_{CN}	$(V/V_i)_{FS}$	L_{CN}	ECR
1	0.057	0.031	0.18	0.023	0.018
2	0.015	0.037	0.18	0.025	0.015
3	0.000	0.096	0.19	0.068	0.028
4	0.037	0.088	0.14	0.099	0.028
5	0.044	0.054	0.18	0.040	0.018
8	0.088	0.089	0.18	0.089	0.019
10	0.048	0.033	0.14	0.022	0.012
11	0.057	0.031	0.14	0.019	0.013
12	0.033	0.079	0.20	0.047	0.036
13	0.103	0.055	0.16	0.029	0.021
14	0.066	0.047	0.16	0.025	0.019
15	0.125	0.031	0.16	0.018	0.013
16	0.097	0.068	0.23	0.049	0.019
17	0.092	0.063	0.15	0.042	0.024
19	0.042	0.041	0.16	0.024	0.015
20	0.048	0.092	0.22	0.055	0.034
21	0.017	0.051	0.20	0.029	0.015
22	0.088	0.066	0.18	0.045	0.026
23	0.058	0.275	0.23	0.147	0.033
24	0.127	0.059	0.19	0.026	0.025
25	0.067	0.055	0.14	0.033	0.017
26	0.123	0.042	0.19	0.026	0.017

Se realizó una regresión multilíneal, en los lodos residuales A y B, para determinar si existe una relación entre el límite de secado convectivo del lodo de depuración, la contracción final y las condiciones externas de operación. La regresión multilíneal proporciona el valor de los diferentes parámetros n_j de la expresión matemática mostrada en la Ec. IV.2. Además de la aportación del fluido aire que ha sido utilizado durante el proceso de la operación unitaria para el secado convectivo del lodo residual A y B, considerando las condiciones externas de operación del fluido aire, la expresión matemática incluye un término independiente.

$$y = n_1 + n_2T + n_3v + n_4H_A \quad (IV.2)$$

Puede verse en la Tabla IV.5 resultados para la regresión multilíneal, considerando el lodo residual B, aplicada al límite final de secado del lodo $(W/W_i)_{FS}$ y $(V/V_i)_{FS}$. Aparte de una ligera influencia de la temperatura del aire sobre $(V/V_i)_{FS}$, no es posible mostrar una influencia de las variables externas

operativas, sobre las curvas de contracción. Por lo tanto, se utilizará una sola curva para todas las pruebas.

Tabla IV.5. *Parámetros del análisis de regresión multilíneal realizado sobre $(W/W_i)_{FS}$ y $(V/V_i)_{FS}$. Lodo B*

Regresión multilíneal sobre $(W/W_i)_{FS}$ y $(V/V_i)_{FS}$				
	$(W/W_i)_{FS}$		$(V/V_i)_{FS}$	
	Parámetros n_j	L_{CN}	Parámetros n_j	L_{CN}
Termino independiente	3.98	7.01	0.98	2.97
Temperatura	2.02	5.01	3.03	1.99
Velocidad	-7.04	2.02	6.97	8.98
Humedad	0.98	0.99	-1.98	6.02

La Tabla IV.6, muestra para el lodo residual B, que el límite $(W/W_i)_{FS}$ es 0,0571 para una $(V/V_i)_{FS}$ de 0,178

Tabla IV.6. *Valores obtenidos y límites de confianza a 95% de $(W/W_i)_{FS}$ y de $(V/V_i)_{FS}$ determinado sobre todas las pruebas-Lodo B*

	$(W/W_i)_{FS}$	$(V/V_i)_{FS}$
Valor obtenido por ajuste	0.0571	0.178
L_{CN} a 95%	0.0121	0.008

4.2.1. Lodos de depuración A y B

Con excepción de las pruebas 7 y 9, las curvas de contracción se determinaron para los diversos puntos del plan experimental. Al igual que en las muestras del lodo residual B, se puede distinguir una zona de contracción lineal seguida de un plano horizontal correspondiente a la contracción final.

Puede verse en la Tabla IV.7 un límite significativamente diferente de cero en 14 de 26 pruebas. Notamos que en promedio el volumen final es más alto en este caso $((V/V_i)_{FS} = 0,317)$ que para el lodo residual B $(V/V_i)_{FS} = 0,179)$.

La contracción final no es significativamente diferente de cero para los ensayos 4, 8, 16, 17 y 26.

Tabla IV.7. Valores del límite de confianza, L_{CN} , a 95% y ECR obtenidos al determinar el límite por debajo del cual cesa la contracción y de $(V/V_i)_{FS}$ - Lodo A

Prueba número	$(W/W_i)_{FS}$	L_{CN}	$(V/V_i)_{FS}$	L_{CN}	ECR
1	0.033	0.075	0.23	0.045	0.028
2	0.037	0.024	0.24	0.012	0.011
3	0.136	0.042	0.26	0.019	0.019
4	0.089	∞	0.31	∞	0.040
5	0.098	0.035	0.26	0.016	0.015
6	0.055	0.089	0.21	0.051	0.023
8	0.107	∞	0.29	∞	0.029
10	0.068	0.033	0.34	0.012	0.018
11	0.062	0.075	0.32	0.031	0.025
12	0.108	0.052	0.36	0.025	0.017
13	0.082	0.067	0.31	0.038	0.026
14	0.029	0.033	0.28	0.014	0.012
15	0.078	0.025	0.35	0.010	0.008
16	0.005	0.028	0.25	0.023	0.026
17	0.007	0.033	0.25	0.025	0.029
18	0.012	0.058	0.29	0.027	0.025
19	0.072	0.049	0.36	0.022	0.013
20	0.178	0.144	0.37	0.058	0.053
21	0.135	0.066	0.41	0.025	0.022
22	0.116	0.048	0.32	0.018	0.015
23	0.073	0.050	0.38	0.019	0.015
24	0.103	0.068	0.35	0.025	0.021
25	0.007	0.107	0.27	0.059	0.033
26	0.004	0.121	0.35	0.052	0.045

Considerando una comparación de las curvas experimentales y de las curvas correspondientes a una contracción ideal indica que el carácter ideal de la contracción no persiste hasta el final de la zona lineal. En efecto, se puede observar que el volumen medido experimentalmente es mayor que el correspondiente a la contracción ideal, signo del desarrollo de la porosidad en el interior del sólido. Esta desviación con respecto a la contracción ideal se observa para los valores de W/W_i .

Los resultados del análisis de regresión multilíneal aplicado al límite final de secado convectivo del lodo residual A y al volumen final puede verse en la Tabla IV.8. Se muestra que no existe ninguna relación entre el límite a partir del cual cesa la contracción y las variables de operación. El volumen final $(V/V_i)_{FS}$

está principalmente influenciado por la humedad del medio exterior y la temperatura del fluido compresible utilizada durante el proceso de secado convectivo del lodo residual.

El efecto generado por la temperatura es la más pronunciada, como se muestra en los valores de las variables en t_{n_j}/s_{n_j} , donde s_{n_j} es la desviación estándar del parámetro n_j . Estos dos valores son superiores al valor de referencia correspondiente al nivel de significancia $\alpha = 0,95$: 2,0796.

Tabla IV.8. *Parámetros del análisis de regresión multilineal realizado en $(W/W_i)_{FS}$ y sobre $(V/V_i)_{FS}$ -Lodo A*

Regresión multilineal sobre $(W/W_i)_{FS}$ y $(V/V_i)_{FS}$					
$(W/W_i)_{FS}$			$(V/V_i)_{FS}$		
	Parámetros n_j	L_{CN}	Parámetros n_j	L_{CN}	n_j/s_{n_j}
Termino independiente	4.12	8.12	2.11	5.94	4.98
Temperatura	3.10	6.13	0.98	5.02	6.01
Velocidad	2.00	1.97	2.14	2.03	1.89
Humedad	-1.89	0.99	-2.01	0.97	-2.97

Puede verse en la Figura IV.4 la influencia de la temperatura del fluido que ha sido utilizada durante la operación unitaria para el proceso de secado convectivo en la contracción del lodo residual.

Se observa que la contracción es menos importante cuando la temperatura aumenta de 80°C (♦) a 120°C (▲). El cambio de 120°C (▲) a 164°C(*) induce a una pequeña disminución de la contracción. Esta observación está probablemente relacionada con un fenómeno de endurecimiento y reducción de volumen de la muestra, por encima de los 120°C, al incrementar la temperatura del fluido compresible utilizada para el proceso de secado convectivo del lodo residual provoca que se genere una capa exterior seca que dificulta la contracción.

La influencia de la humidificación del aire es algo menos pronunciada, pero concuerda con los resultados de la regresión multilíneal: el volumen final disminuye a medida que aumenta la humedad del aire. Esta evolución puede igualmente estar relacionada con el fenómeno de endurecimiento de la superficie, que se ralentiza cuando aumenta la humedad.

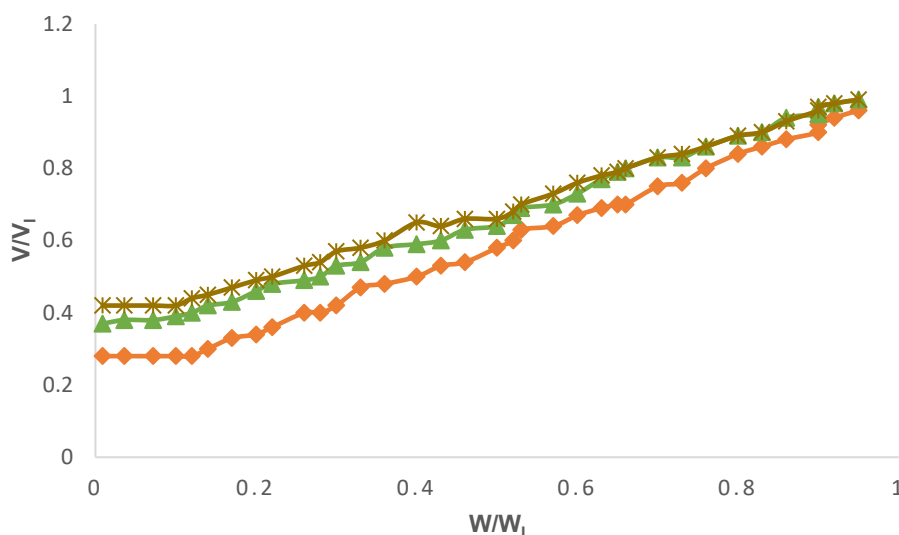


Figura IV.4. Efecto de la temperatura del fluido compresible utilizado durante el proceso de secado convectivo del lodo residual, en el proceso de contracción, pruebas 3, 12 y 21. Lodo A.

La Figura IV.4, muestra la influencia de la temperatura del fluido compresible utilizada en la contracción, durante el secado convectivo para el subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, han sido realizadas las siguientes pruebas:

($\blacklozenge$) prueba 3: a temperatura de 82°C, velocidad superficial del aire 3 metros/segundo y humedad absoluta del aire 0,006 kg agua/kg aire seco, ($\blacktriangle$) prueba 12: a temperatura de 120°C, velocidad superficial del aire 3 metros/segundo y humedad absoluta del aire 0,006 kg agua/kg aire seco y ($\blackstar$) prueba 21: a temperatura de 164°C, velocidad superficial del aire o velocidad de la corriente de aire seco que circula sobre la superficie del lodo residual, para corriente paralela a superficies planas 3 metros/segundo y humedad absoluta del aire 0,006 kg agua/kg aire seco.

En síntesis, el análisis de las curvas de contracción pone en evidencia a la vez las similitudes y diferencias en el comportamiento de los lodos A y B. Los lodos residuales A y B, presentan una contracción isotrópica caracterizada por una larga zona lineal seguida de un plano horizontal que corresponde al volumen final. La zona lineal corresponde a una contracción ideal para el lodo B, mientras que la contracción se ralentiza para el lodo A, a partir de $W/W_i \cong 0.3$. El volumen final, valor del plano horizontal, es en promedio más bajo para el lodo B ($(V/V_i)_{FS} = 0,179$) que para el lodo residual A ($(V/V_i)_{FS} = 0,317$).

En el caso del lodo residual B, la contracción puede considerarse independiente de las variables de operación y determinarse una única curva de contracción. Para el lodo residual A, la contracción es rápidamente frenada por un probable fenómeno de endurecimiento-reducción de volumen que es sensible a una temperatura del fluido compresible y la humedad del medio exterior. Luego, no es posible admitir una única curva de contracción para todas las pruebas de secado convectivo realizadas en el lodo A.

En lo que concierne al trazado de las curvas de Krischer, la superficie exterior de la muestra puede determinarse a partir de la curva de contracción única para el lodo residual B, mientras que cada prueba debe considerarse por separado para el lodo residual A.

En ambos casos, las tres condiciones externas de operación influyen en la cinética de secado convectivo del lodo de depuración con más efecto de la temperatura del fluido compresible en relación a la velocidad superficial del fluido compresible, flujo másico del aire seco, y la humedad del aire. Estas dos últimas variables tienen una influencia inversa (el flujo de secado del lodo aumenta con el incremento de la velocidad superficial y el descenso de humedad) y tienen la misma magnitud para el lodo A, mientras que la influencia de la velocidad es mayor que la humedad en el caso del lodo B.

Una cantidad útil considerando el proceso de transformación, la capacidad para la evaporación, ha sido determinada para las pruebas realizadas en ambos tipos de lodo de depuración.

Se muestra que existe una relación lineal entre la capacidad de evaporación y el flujo máximo de secado del lodo. Esta relación indica que lo esencial del secado se desarrolla cuando las limitaciones extragranulares a la transferencia son predominantes. Las capacidades de evaporación calculadas son mayores para el lodo residual B que para el lodo residual A, lo que indica que se necesitarán secadores más grandes para secar el lodo residual A.

Las texturas finales, del lodo al final del secado, de los dos tipos de muestras son muy diferentes. Cada lodo de depuración es un material único y presenta un comportamiento de secado y una textura resultante que son particulares. Esta es una de las razones a la que se hace referencia por las que el número de publicaciones en este campo es relativamente pequeño (Ferrasse et al. 2002).

Las pruebas de caracterización han sido utilizadas en las muestras del lodo A y B sometidas a las condiciones de operación de la prueba 21 del plan experimental. Recordando, las variables externas experimentales son las siguientes: Temperatura: 160°C, Humedad del aire: 0.006 kg/kg, humedad con respecto al medio exterior o atmosférica, y velocidad media de aire seco sobre la superficie del lodo residual es 3 m/s.

4.2.1.1. Regresión multilíneal para el lodo B

El efecto con respecto a las tres variables externas del proceso de secado mediante convección por el aire (temperatura del fluido compresible, velocidad de la corriente de aire seco que circula sobre la superficie del lodo residual, para corriente paralela a superficies en el plano horizontal, y la humedad absoluta del aire con respecto al medio exterior o atmosférica) para realizar la operación unitaria de secado por convección del aire, durante el proceso de operación unitaria del secado convectivo y estabilización del lodo de depuración puede ser cuantificada aplicando una regresión multilíneal entre el flujo constante de secado F_c observado en el plano horizontal (etapa de flujo másico constante del lodo residual) considerando estas tres variables de operación.

Las estimaciones de los parámetros de la regresión multilíneal puede verse en la Tabla IV.9 con sus límites de confianza, L_{CN} , del 95%.

Las variables en t_{nj}/S_{nj} son significativamente diferentes de cero (valor de referencia: 2,1199 para un límite de significancia $\alpha = 0,95$).

La temperatura es la que más influye en el valor del flujo constante de secado del lodo en el plano horizontal, seguida del flujo másico de aire seco o corriente de aire seco que circula sobre la superficie del lodo residual y la humedad con respecto al medio exterior o atmosférico.

Tabla IV.9. *Parámetros del análisis de regresión multilineal realizado sobre el flujo constante de secado convectivo del lodo de depuración en el plano horizontal del Fc (periodo de velocidad constante). Lodo B*

Regresión multilineal sobre Fc			
	Parámetros n_j	L_{CN}	$t = n_j/S_{nj}$
Termino independiente	-0.979	4.003	-8.00
Temperatura	1.987	3.005	16.01
Velocidad	4.003	0.998	8.03
Humedad	-2.001	7.007	-5.02

4.2.1.2. Regresión multilineal para el lodo A

El efecto considerando las variables externas para el proceso de operación unitaria de secado por convección del aire, durante el proceso de operación unitaria del secado convectivo y estabilización del lodo de depuración puede ser cuantificada aplicando una regresión multilineal entre el valor máximo del flujo constante (etapa del flujo másico constante de secado con respecto al lodo residual) y estas tres variables de operación.

Este análisis es diferente del aplicado a los lodos B porque los valores máximos del flujo de secado probablemente ya están afectados por limitaciones intragranulares.

Los resultados de la Tabla IV.10 muestran que las tres variables tienen una influencia significativa.

La comparación de las variables t (referencia = 2,1098 para $\alpha = 0,95$) indica que la temperatura tiene el mayor efecto sobre el flujo máximo de secado, seguida del flujo másico del aire seco o velocidad de la corriente de aire seco, corriente paralela en el plano horizontal, que circula sobre la superficie del lodo residual y la humedad con respecto al medio exterior, cuyos efectos son del mismo orden de magnitud, pero opuestos. Por lo tanto, se puede observar el mismo tipo de resultados obtenidos para el lodo residual B.

Tabla IV.10. *Parámetros del análisis de regresión multilíneal realizado sobre el flujo máximo de secado del lodo de depuración en el plano horizontal del Fc (periodo de velocidad constante). Lodo A*

Regresión multilíneal sobre el flujo máximo			
	Parámetros n_j	L_{CN}	$t = n_j/S_{n_j}$
Termino independiente	-10.02	4.97	-3.87
Temperatura	2.01	2.99	11.02
Velocidad	2.98	2.01	5.01
Humedad	-2.01	7.98	-5.03

Las curvas del flujo másico, durante la velocidad de secado del lodo, obtenidas para el secado de los lodos B y A se diferencian esencialmente por la presencia en el lodo residual B o la ausencia en el lodo residual A de un plano imaginario horizontal de flujo constante de secado del lodo (periodo de velocidad constante).

En el caso del lodo residual A, lodo de mayor humedad, la ausencia del plano horizontal y los valores de flujo sistemáticamente inferiores a los del lodo residual B se justifican por la aparición casi inmediata de una resistencia intragranular a la transferencia.

En ambos casos las tres condiciones externas de operación influyen en la cinética de secado convectivo y así también en la estabilización del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, con más efecto

de la temperatura del fluido compresible en relación al flujo másico del aire seco que circula sobre la superficie del lodo residual y la humedad del aire.

Estas dos últimas variables tienen una influencia inversa, el flujo de secado aumenta al incrementarse el flujo másico del aire seco, para corriente de fluido paralela en el plano horizontal, y por el descenso de humedad del medio exterior, y presenta la misma magnitud para el lodo residual A, mientras que el efecto del flujo másico del aire seco es mayor con respecto a la humedad del medio exterior en el caso del lodo residual B.

El efecto de las variables externas durante la operación unitaria de secado por convección desde un fluido en movimiento hacia la superficie húmeda del lodo residual muestra que para cada lodo existen limitaciones extragranulares para la transferencia durante un largo período de tiempo. Al final del secado, las curvas de flujo másico se superponen, lo que indica que sólo quedan resistencias intragranulares. Esta superposición se realiza en $W/W_i \cong 0,02$ a $0,05$ para el lodo B y $W/W_i \cong 0,2$ para el lodo residual A.

En el caso del lodo residual B, cuyas curvas de flujo de secado constante se caracterizan por un plano horizontal de flujo constante, etapa de flujo másico de secado continuo, en esta etapa de flujo másico continuo las expresiones matemáticas con respecto a coeficientes de transferencia pueden expresarse mediante relaciones adimensionales.

Luego de evaluar el efecto de las variables externas durante la operación unitaria de secado convectivo del subproducto que ha sido generado durante el proceso de la depuración de aguas residuales, lodo de depuración, y asimismo por los valores que han sido obtenidos mediante pruebas realizadas en este trabajo a los lodos residuales A y B considerados, pruebas realizadas para el proceso de estabilización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, con el propósito que el lodo residual B pueda ser utilizado y valorizado para beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación ambiental, han permitido confirmar las hipótesis planteadas en este trabajo realizado:

1. La materia orgánica del lodo de depuración influye en el proceso de estabilización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, producido en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El contenido de materia orgánica del lodo influye en la estabilización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales y se debe evitar con el propósito de obtener un producto que pueda ser valorizado para beneficio de la agricultura, y reducir agentes patógenos por debajo de niveles permisibles especificados en las normas ambientales. La hipótesis se logró confirmar durante el proceso del comportamiento de la estabilización, tablas de resultados para ratios de concentración de estabilización del lodo residual A y B, lodos sin estabilizar y estabilizados.

Para ratios de concentración de estabilización del lodo residual A se obtienen valores superiores no permisibles por normas ambientales, valores que indican que el lodo de depuración A no está estabilizado, pero el lodo residual B ha sido estabilizado por presentar ratios de concentración de estabilización permisibles según normas ambientales.

2. El proceso de estabilización de lodos de depuración relaciona la vinculación entre la fracción de la concentración de sustancia orgánica contenido en el subproducto generado durante el proceso de la depuración de aguas residuales y la estabilización con respecto a la fracción de la concentración de sustancia orgánica del subproducto de la depuración de aguas residuales.

Hipótesis que ha sido posible comprobar durante el proceso del comportamiento de la estabilización para lodos residuales A y B sin estabilizar y estabilizados, tratamiento que se desarrolla para disminuir la concentración de sustancia orgánica, MV, con respecto a la concentración de masa de sustancia deshidratada, SS, con el propósito de evitar efectos tóxicos y pueda ser utilizado en beneficio de la agricultura, resultados obtenidos en el presente trabajo que ha permitido confirmar que se le puede dar una destinación de valorización al subproducto de la depuración de aguas residuales para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

Según las normas ambientales reglamentarias para lodos de PTAR, se indican que si los valores de ratios de concentración de estabilización son ≤ 0.6 el lodo de depuración estará estabilizado. Los resultados experimentales indicados en la tabla del comportamiento de la estabilización del lodo B, muestran valores permisibles según normas ambientales para ratios de concentración de estabilización obtenidos en las pruebas de estabilización del lodo residual B. Por lo tanto, el lodo residual B ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

3. Los lodos estabilizados, a partir del subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales, favorecen la producción de un producto final útil en beneficio de la agricultura.

Los lodos de depuración estabilizados que presentan valores de ratios de concentración de estabilización ≤ 0.6 favorecen la producción de un producto final útil en beneficio de la agricultura, lodo residual B, pueden ser utilizados para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, y presentan las siguientes ventajas:

- La sustancia alcalina utilizada presentan relaciones de concentración de potencial de hidrogeno superior a 7 que favorece el proceso de estabilización para la producción de un producto final útil, lodo residual B.
- Los lodos B estabilizados en el ambiente mejoran, conservando la cantidad del producto, lo que permite el almacenamiento y pueda ser utilizado sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura.
- Las concentraciones de sustancia alcalina agregada al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, presenta como efecto la estabilización del subproducto residual que ha sido generado en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

- El uso del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, después de haber sido estabilizado para beneficio de la agricultura, mejora sus propiedades químicas y físicas del suelo agrícola, proporcionándole al suelo valores de potencial de hidrógeno requeridos (aproximadamente neutral), presentando el lodo residual B contenido de nutrientes para uso agrícola (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Zinc, Cobre, Sodio, Cromo, Hierro, Manganeseo, Boro). Luego el lodo residual B estabilizado es un producto final de calidad que se puede utilizar como fertilizante en el esparcido agrícola para la fertilidad del suelo.

4. El proceso de la estabilización del subproducto que ha sido generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales es influenciado por las características problemáticas del lodo residual y las variables externas durante la operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento.

Las características problemáticas, como el contenido de la fracción orgánica en el lodo A y B, y las condiciones externas de operación: la temperatura, velocidad superficial y la humedad absoluta del aire.

Estas características problemáticas influyen durante la velocidad de secado convectivo del lodo, la estabilización y la valorización agrícola del lodo B. Los lodos residuales fueron utilizados para realizar las pruebas experimentales en el lodo de depuración A y B sin estabilizar y estabilizado. Por lo tanto, la operación unitaria del secado convectivo del lodo residual es fundamental para la estabilización del lodo residual B.

Luego, la operación unitaria del secado convectivo del lodo A y B ha permitido determinar mediante los resultados obtenidos en este trabajo, que el lodo residual B ha sido estabilizado y como consecuencia se le puede dar una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

Para confirmar la afirmación anterior se realizaron la operación unitaria del secado convectivo para el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, valores de concentración que han sido obtenidos mediante el proceso de estabilización del lodo de depuración B y se verifican con las normas ambientales reglamentarias. Se estudia la influencia con respecto a las variables

externas durante la operación unitaria del secado convectivo de los lodos A y B en el presente trabajo realizado, pruebas experimentales necesarias que fueron realizadas para el proceso de estabilización considerando el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales y luego darle una destinación de valorización agrícola.

Para tal fin de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo se hace la evaluación de los datos experimentales obtenidos en las pruebas que se muestran en este trabajo, páginas 104 a 123, para verificar la influencia en relación a las variables externas durante el proceso de operación unitaria para el secado por convección de un fluido en movimiento en el proceso con respecto a la operación unitaria del secado convectivo del lodo de depuración B que fueron cuantificadas aplicando una regresión multilineal entre el flujo constante de secado del lodo de depuración (etapa de flujo másico de secado continuo) y estas tres variables externas en relación a la operación unitaria del secado convectivo.

La temperatura del aire es la que más influye durante el flujo constante de secado del lodo residual B, etapa de flujo másico de secado continuo, seguida del flujo másico del aire seco, corriente de aire que circula sobre la superficie del lodo residual, y la humedad con respecto al medio exterior.

Las curvas en relación al flujo másico, flujo másico del fluido líquido con respecto a la concentración de humedad del lodo residual, obtenidas durante la operación unitaria de secado considerando los lodos B y A se diferencian esencialmente por la presencia en el lodo residual B o la ausencia en el lodo residual A de un plano de flujo constante de secado del lodo residual (periodo de velocidad constante). En el caso del lodo residual A, lodo de mayor humedad, la ausencia del plano horizontal y los valores de flujo inferiores a los del lodo residual B se justifican por la aparición casi inmediata de una resistencia intragranular a la transferencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, páginas 104 a 123, se observa que la cinética de secado convectivo y estabilización del lodo de depuración está fuertemente influenciada por las condiciones externas, y por lo

tanto las resistencias extragranulares predominan, durante una parte del secado convectivo.

En ambos casos, las tres condiciones externas de operación influyen en la cinética de secado convectivo del lodo residual con más efecto durante el secado de la temperatura del fluido gaseoso en relación al flujo másico del aire seco y la humedad del aire. Estas dos últimas variables tienen una influencia inversa, el flujo de secado del lodo de depuración aumenta con el aumento de la velocidad superficial y la disminución del contenido de humedad del aire, y son de la misma magnitud para el lodo A, mientras que el efecto del flujo másico del aire seco es mayor que la humedad del medio exterior en relación al caso del lodo B.

La evaluación del efecto con respecto a las variables externas muestra que para cada lodo existen limitaciones extragranulares para la transferencia durante un largo período de tiempo. Al final del secado, las curvas de flujo de masa se superponen, lo que indica que sólo quedan resistencias intragranulares.

En consecuencia, las condiciones externas de la operación unitaria del secado convectivo del lodo o variables externas: temperatura del fluido gaseoso en circulación, flujo másico del aire seco y la humedad con respecto al medio exterior son variables que afectan al flujo másico del líquido evaporado durante la operación unitaria de secado convectivo con respecto al lodo residual principalmente durante la etapa del flujo másico de secado continuo.

Por lo tanto, los datos experimentales que han sido obtenidos en este trabajo realizado han permitido confirmar el efecto con respecto a condiciones externas para el proceso de operación unitaria de secado durante el flujo másico del secado convectivo en relación al lodo de depuración necesarios para la estabilización y valorización agrícola del lodo de depuración B. Luego, el lodo residual B estabilizado puede ser valorizado en la agricultura para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

En la referencia 4.2.2 se presenta información adicional con respecto a la influencia de las variables externas en relación al proceso de secado del lodo residual, proceso para la operación unitaria de la velocidad de secado convectivo del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas

residuales, que permiten tener datos adicionales para confirmar la hipótesis propuesta.

4.2.2. Etapa de flujo másico continuo

En las curvas para el flujo másico de secado constante con respecto al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, etapa de flujo másico continuo, pueden verse un plano horizontal de flujo constante.

El proceso de secado en esta etapa de flujo másico continuo, flujo másico del agua, para el secado por circulación tangencial se expresa según la siguiente ecuación:

$$\frac{dW}{A d\theta} = k_y (H_w - H_g) \quad (IV.3)$$

Siendo $dW/A.d\theta$ la velocidad de secado, por unidad de área, de transferencia de masa ($\text{kg H}_2\text{O evap}/\text{m}^2\text{h}$), k_y : coeficiente para el transporte de flujo másico, masa de agua evap./((tiempo)(área), por unidad de diferencia de humedad.

H_w : Aire saturado, aire húmedo en el cual el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida, masa de agua/masa de aire seco. H_g : humedad en el seno del aire, masa de agua/masa de aire seco. A : superficie húmeda sobre la cual circula el flujo másico de aire seco, m^2 .

Así también puede verse en la Figura II.14, la representación esquemática para la curva de krischer entre el punto II y III, etapa de flujo másico de secado continuo para el plano horizontal.

Considerando la cantidad transportada de energía calorífica, si el calor se emplea en evaporar la humedad, el flujo másico de líquido evaporado tendría la siguiente expresión matemática:

$$\frac{dW}{A d\theta} = \frac{h_c}{\lambda_w} (T_{bs} - T_{bh}) \quad (IV.4)$$

La Ecuación IV.4 nos indica que el símbolo h_c , es el coeficiente para el transporte de energía térmica, $\text{energía}/(\text{tiempo})(\text{área})(^\circ\text{C})$, T_{bs} : temperatura del medio exterior $^\circ\text{C}$, T_{bh} : temperatura del bulbo húmedo del aire o a la temperatura de interfase $^\circ\text{C}$, λ_w : cambio de calor latente del estado líquido al gaseoso, calor de vaporización, $\text{energía}/\text{masa de agua evaporada}$.

Luego considerando las expresiones matemáticas IV.3 y IV.4 se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dW}{Ad\theta} = k_y(H_w - H_g) = \frac{h_c}{\lambda_w}(T_{bs} - T_{bh}) \quad (\text{IV.5})$$

Siendo $dW/Ad\theta$, el flujo másico de líquido evaporado, masa de agua evaporada/ $(\text{tiempo})(\text{área})$, etapa de flujo de secado continuo.

4.2.3. Etapa de flujo másico de secado variable

En este periodo la velocidad de secado con respecto al subproducto generado del proceso de tratamiento de aguas residuales experimenta una disminución continua durante el proceso de operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento.

El exceso de humedad del lodo de depuración sobre el valor del equilibrio corresponde a la concentración de humedad libre.

La velocidad del secado del lodo de depuración es una función lineal de la concentración de humedad, (X) : masa de agua/masa de sólido seco, con respecto a la humedad crítica (X_c) y el valor de humedad en el equilibrio (X_e) , y en un instante dado es expresado por la siguiente ecuación:

$$(W_s/A)(dX/d\theta) = N_c(X - X_e)/(X_c - X_e) \quad (\text{IV.6})$$

Siendo W_s el peso del lodo a secar, kg de lodo seco, el lado izquierdo de la ecuación corresponde a la definición de flujo másico de líquido evaporado, masa de agua evap./ $(\text{tiempo})(\text{área})$, y el término $(X - X_e)/(X_c - X_e)$ expresa la proporción

de área superficial húmeda a la superficie total inicial de secado, y $N_c = dW/Ad\theta$ es el flujo másico de secado, masa de agua evap/(tiempo)(área), durante la etapa de flujo másico continuo del lodo residual, definido considerando la ecuación IV.5.

Con respecto a la influencia del flujo másico del aire seco, afectan la velocidad de secado considerando el lodo de depuración, en la etapa del flujo másico continuo, debido a su influencia sobre los coeficientes h_c y k_y , como se observa en la ecuación IV.5. Esto se debe a que el flujo másico del aire seco que circula paralelo sobre superficies planas influye sobre el espesor de la capa laminar con respecto a la superficie húmeda de secado, a través del cual ocurren las transferencias de calor por convección y masa por evaporación. Según Perry indica que Shepherd, Hadlock y Brewer demostraron que h_c puede expresarse en función del flujo másico del aire seco para un fluido en movimiento paralelo sobre superficies planas como sigue:

$$h_c = 0.0176G^{0.8} \quad (IV.7)$$

En la cual, h_c : coeficiente con respecto al transporte del flujo de calor, kcal/h.m².°C, y G : flujo másico del aire seco, kg/h.m².

Con respecto al efecto de la temperatura del fluido compresible en circulación y la humedad del medio exterior, el efecto considerando estas variables en relación al transporte del flujo másico durante la operación unitaria de secado del lodo residual, etapa de flujo másico continuo, puede verse según la ecuación IV.5, a velocidad de aire constante, h_c y k_y no son afectados, siendo el efecto principal sobre la fuerza impulsora ($T_{bs}-T_{bh}$) y (H_w-H_g).

Según Badger y Banchero indican que Mc Cready y Mc Cabe realizaron pruebas experimentales de secado de una pulpa de asbesto con diferentes valores de humedad de aire, y verificaron que el transporte del flujo másico de líquido evaporado aumenta con respecto a la disminución de humedad del medio exterior y disminuye al aumentar la humedad.

Así también se tiene que de acuerdo con la ecuación IV.4, cuando se incrementa la temperatura del fluido compresible en circulación se incrementa la magnitud ($T_{bs}-T_{bh}$), y en consecuencia, se incrementa el flujo másico de secado N_c , durante la etapa de flujo másico continuo.

En relación al efecto de la velocidad superficial del aire, la velocidad de secado N_c varía directamente con (H_w-H_g) y, por lo tanto, cuando se incrementa la humedad del medio exterior, humedad en el seno del fluido exterior en movimiento H_g , desciende el flujo másico del líquido evaporado.

De acuerdo a las referencias anteriores, sobre las etapas con respecto al flujo másico del líquido evaporado del lodo residual así también de los resultados obtenidos en este trabajo, páginas 104 a 123, han permitido confirmar que la velocidad de secado del lodo de depuración es influenciada por las variaciones del flujo másico del aire seco, la temperatura del fluido compresible en circulación y la humedad del medio exterior, principalmente durante la etapa de flujo másico continuo.

Podemos confirmar que el transporte de flujo másico del líquido evaporado varía en forma directamente proporcional con el flujo másico del aire seco, fluido en movimiento paralela sobre superficies planas, y por efecto de la temperatura del aire.

Luego, las principales condiciones externas que influyen en la velocidad de secado del lodo de depuración afectan al flujo másico del líquido evaporado principalmente durante la operación unitaria de secado con respecto a la etapa del flujo másico continuo en relación al proceso de secado del lodo, durante esta etapa existe un incremento de la evaporación del líquido contenido en el lodo de depuración.

Por lo tanto, según los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, las hipótesis han sido demostradas y en consecuencia es posible darle al lodo de depuración de aguas residuales una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo, y beneficiar a la agricultura de sus valores fertilizantes, y a la minimización de la contaminación ambiental.

Se ha enunciado, en este trabajo realizado, que la concentración de sustancia orgánica con respecto al lodo residual influye durante el proceso de estabilización que ha sido realizado en el presente trabajo considerando el subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales. El enunciado mencionado ha permitido confirmar que durante el tratamiento de la estabilización de los lodos residuales A y B (muestras del subproducto del proceso de depuración de aguas residuales) para obtener valores con respecto a ratios de concentración de estabilización en relación al comportamiento durante el proceso de estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales, ratios de concentración de estabilización para lodos residuales A y B sin estabilizar y estabilizados, se obtienen resultados después de las pruebas realizadas con respecto al proceso de estabilización para los subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales, muestras que ha sido denominadas A y B, se obtienen valores $> 0,6$ para ratios de concentración de estabilización del lodo residual A, y según normas ambientales reglamentarias son valores no permisibles para lodos estabilizados.

Por lo tanto, el lodo de depuración A no ha sido estabilizado y no es un producto apropiado para darle una destinación de valorización agrícola. Pero el lodo de depuración B presenta valores de ratios de concentración de estabilización $\leq 0,6$ siendo valores permisibles según normas ambientales para lodos estabilizados. Por lo tanto, los resultados para los lodos residuales A y B obtenidos en este trabajo han permitido confirmar que el lodo residual B ha sido estabilizado, la degradación biológica del lodo residual B ha sido controlada, y se le puede dar una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

Se ha enunciado, en este trabajo realizado, que el proceso de estabilización de los lodos de depuración relaciona la vinculación entre la fracción correspondiente a la concentración de sustancia orgánica contenida en el subproducto del proceso de depuración de aguas residuales y la estabilización con respecto a la fracción de la concentración de sustancia orgánica del subproducto de la depuración de aguas residuales.

El enunciado mencionado se verifico mediante el tratamiento de estabilización que ha sido desarrollado para disminuir la concentración de sustancia orgánica

MV en relación a la masa deshidratada SS con el propósito de evitar efectos tóxicos, luego la estabilización del lodo residual B permite darles una destinación final de valorización agrícola. Los resultados de la estabilización presentan valores permisibles de ratios de concentración de estabilización, ≤ 0.6 , para el lodo B. Asimismo, considerando los valores de concentración que han sido especificados según las normas ambientales para lodos de depuración de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Por lo tanto, según los resultados obtenidos en este trabajo han permitido confirmar que el lodo B ha sido estabilizado.

Luego, se le puede dar una destinación final de valorización agrícola al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, el lodo B ha sido estabilizado y será un producto apropiado para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo para mejorar su fertilidad y productividad.

Se ha enunciado, en este trabajo realizado, que los lodos de depuración estabilizados favorecen la valorización agrícola del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales.

El enunciado mencionado ha permitido confirmar que los lodos con valores de ratios de concentración de estabilización ≤ 0.6 han sido estabilizados, lodo residual B, y presentan las siguientes ventajas:

- Los lodos B estabilizados en el ambiente mejoran, y permite el almacenamiento y conservación del producto.
- La agregación de concentración de sustancia alcalina al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, tiene como efecto la estabilización del lodo residual B.
- Por el aumento del pH del lodo de depuración B estabilizado, los organismos patógenos presentes en el lodo B son destruidos, los lodos de depuración B son así higienizados.
- El contenido de hidróxido de calcio en el lodo B estabilizado aumenta sus valores agrícola y económico, aportando calcio que es un nutriente para las plantas.
- Conservar la cantidad del producto, lodo residual B estabilizado, durante su almacenamiento y transporte.

Se ha enunciado, en este trabajo realizado, que el proceso de estabilización del subproducto generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales es influenciado por las concentraciones de sustancia orgánica del lodo residual y las variables externas durante el proceso de la operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento.

El enunciado mencionado ha permitido confirmar la influencia de las principales condiciones externas, características problemáticas, durante el proceso del secado convectivo y del proceso de estabilización para los subproductos del tratamiento de aguas residuales, muestras que han sido denominados A y B. Las condiciones externas presentes durante el proceso de la operación unitaria del secado convectivo de los lodos A y B influyen sobre el transporte del flujo másico de líquido evaporado y así también en la valorización agrícola con respecto al lodo residual B principalmente en la etapa de flujo másico continuo.

El flujo másico del aire seco, fluido en movimiento que circula paralelo sobre superficies planas, afecta al flujo másico de líquido evaporado del lodo de depuración B, durante la etapa del flujo másico continuo, debido a su influencia sobre los coeficientes de transferencia de masa (k) y de calor (h) respectivamente, debido a que la velocidad superficial influye sobre el espesor de la película de aire en la superficie de secado de los lodos A y B, interfase superficie líquida-fluido, donde ocurre el transporte de flujo térmico mediante el mecanismo de convección de un fluido en movimiento y el transporte de flujo másico mediante evaporación.

El flujo másico del aire seco influye durante el transporte de flujo másico del líquido evaporado del lodo residual B en la etapa de flujo másico continuo.

Considerando la temperatura del fluido compresible en circulación y la humedad del medio exterior, el efecto con respecto a estas condiciones externas que están relacionados al proceso de operación unitaria de secado sobre el flujo másico de líquido evaporado con respecto al lodo de depuración B, en la etapa de flujo másico continuo, puede verse de acuerdo a las expresiones matemáticas que ha sido definidas para representar al transporte de flujo másico y al transporte de flujo térmico, a flujo másico de aire seco constante, que el coeficiente de secado con respecto al transporte de flujo másico (k_{pa}), y el coeficiente con respecto al transporte de flujo térmico por convección (h), no son

afectados, siendo el efecto principal sobre la fuerza impulsora ($Y_i - Y_a$) y ($T_a - T_i$) respectivamente. La velocidad de secado del lodo de depuración B aumenta con la disminución de la humedad del aire y disminuye con el aumento de humedad. Luego, se considera que la evaporación se realiza en la superficie de los lodos de depuración A y B y que la superficie está cubierta de una lámina de agua continua, capa límite. Este periodo se mantiene si la superficie es alimentada de manera suficiente de agua proveniente del interior del lodo A y B. El flujo de calor es constante durante este periodo.

Las resistencias a la transferencia se ubican sobre la interfase superficie líquida-fluido. El flujo másico del líquido evaporado del lodo de depuración B no solo depende de las condiciones externas, es decir la velocidad superficial, la humedad del aire y la temperatura del agente secante, la superficie expuesta al secado y a la presión. Sin embargo, el estado de la superficie puede tener una importancia: el flujo puede ser más importante para una superficie rugosa que para una superficie plana.

Las condiciones externas que deben ser consideradas para llevar a cabo el proceso de la operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento en el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, muestras de lodos residuales denominadas A y B, como el contenido de la fracción orgánica en el lodo, así también el flujo másico del aire seco, la temperatura del fluido compresible, y la humedad del medio exterior presentan efectos durante el proceso para la operación unitaria del secado convectivo y la estabilización del lodo residual B necesarios con el propósito que se le pueda dar una destinación final de valorización en beneficio de la agricultura y la minimización de la contaminación ambiental. Por lo tanto, la operación de secado efectuada mediante la adición de sustancia alcalina es fundamental para que se le pueda dar estabilización al lodo residual B.

Igualmente, el secado convectivo de los lodos A y B nos permitió obtener ratios de concentración para la estabilización del lodo con respecto a los lodos residuales A y B, y darle al lodo B estabilizado una destinación final de valorización agrícola.

La cinética de secado convectivo de los lodos de depuración A y B está muy influenciada por las condiciones externas de operación durante el secado del lodo B, y por lo tanto las resistencias extragranulares predominan durante una parte del secado del lodo residual B.

En ambos casos, las tres condiciones externas de operación influyen en la cinética de secado de los lodos de depuración A y B con mayor influencia de la temperatura del fluido compresible en circulación con respecto al flujo másico del aire seco y de la humedad del medio exterior.

Estas dos últimas variables tienen una influencia inversa, el flujo constante de secado aumenta con el incremento del flujo masico del aire seco y el decrecimiento de la concentración de la humedad, y presentan la misma magnitud para el lodo A, mientras que la influencia de la velocidad superficial es mayor que la humedad en el caso del lodo B.

Asimismo, el efecto de las variables externas durante la operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento, proceso de la operación unitaria en relación al secado por convección así también para la estabilización del lodo de depuración B, necesarios para su valorización agrícola, puede ser cuantificada aplicando una regresión multilíneal entre el flujo constante de secado convectivo del lodo B, fase del flujo másico de líquido evaporado continuo, y considerando estas tres variables de operación. La temperatura es la que más influye en el valor del flujo constante de secado convectivo del lodo de depuración B durante la fase de flujo másico continuo, seguida del flujo másico del aire seco y de la humedad del aire.

La evaluación del efecto en relación a las variables externas durante la operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento, para la muestra de lodo de depuración B y la estabilización del lodo de depuración B muestran a la vez similitudes y diferencias de comportamiento.

De acuerdo a las fases del flujo másico del lodo residual B, así también de los valores de las concentraciones que han sido obtenidos en las pruebas efectuadas en la presente investigación realizada. Por lo tanto, se puede confirmar que la velocidad de secado convectivo del lodo de depuración B es influenciada por las variaciones de la temperatura, la velocidad superficial y así

también por la humedad del medio exterior, principalmente durante la fase de flujo másico continuo.

Luego se puede afirmar que la velocidad de secado convectivo del lodo de depuración B varía en proporción directa con el flujo másico del aire seco y la temperatura del fluido compresible en circulación.

Los lodos residuales A y B presentan una contracción isotrópica caracterizada por una larga zona lineal seguida de un plano horizontal que corresponde al volumen final del lodo de depuración A y B. El volumen final alcanzado es en promedio más bajo para el lodo residual B. Para este lodo, la contracción puede ser considerada independiente de las variables de operación y una sola curva es suficiente para caracterizarlo en todos los casos. Por otro lado, para el lodo residual A, la contracción es sensible a la temperatura y la humedad, probablemente debido al fenómeno del endurecimiento y la formación de una superficie dura o zonas secas con una reducción de volumen del lodo.

En cuanto al flujo de secado convectivo de los lodos de depuración A y B, se observa para ambos lodos residuales A y B que las variables externas presentes en la operación unitaria de secado tienen un efecto durante la cinética de secado del lodo con un mayor efecto de la temperatura en relación a la velocidad superficial y la humedad del aire. El análisis de la influencia de las variables de operación muestra que, para cada lodo, existen limitaciones extragranulares para su transferencia durante un largo período de tiempo.

Las curvas del flujo másico obtenidas difieren esencialmente por la presencia, lodo residual B, o la ausencia, lodo residual A, de una zona con flujo constante durante la etapa de flujo másico continuo del proceso de operación unitaria de secado convectivo con respecto a los lodos de depuración A y B. Para el lodo residual B, la presencia de una zona de flujo constante (período de velocidad constante) permite determinar los coeficientes con respecto al transporte de flujo másico y al transporte de flujo térmico, y expresarlos mediante relaciones adimensionales. Para el lodo residual A, la ausencia de una zona de flujo constante y los valores de flujo sistemáticamente inferiores en relación al

lodo residual B se justifican por la aparición casi inmediata de resistencias intragranulares a la transferencia.

Los resultados obtenidos en este trabajo para el lodo residual B estabilizado presentan contenido de nutrientes para uso agrícola, como el Nitrógeno total (N), Fósforo (P_2O_5), Potasio (K_2O), Calcio (CaO), Magnesio (Mg), Cromo (Cr), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Sodio (Na), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Boro (B), así también el lodo residual B estabilizado presentan, antes de la siembra experimental de diferentes tipos de semillas, contenidos permisibles de metales pesados según las normas ambientales reglamentarias.

En conclusión, el uso de la concentración de valores fertilizantes contenidos en el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, denominado muestras de lodo residual B, muestras de lodo residual B que han sido utilizados en forma de sustrato en el acondicionamiento del suelo presentan valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental.

Las muestras de lodos residuales A y B recogidos de la estación de depuración San Antonio de Carapongo, después de ser estabilizados el lodo de depuración B presentan concentraciones de valores fertilizantes, así también metales pesados que contienen valores de concentración permisibles según las normas ambientales reglamentarias y no presentan riesgos de contaminación para el suelo.

Asimismo, presentan valores fertilizantes con relaciones de concentración de nutrientes para uso agrícola. En consecuencia, los resultados obtenidos en este trabajo confirman que el lodo de depuración B ha sido estabilizado y puede ser utilizado en el esparcido agrícola del suelo en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental.

Los resultados obtenidos en este trabajo presentan valores de concentración permisibles de metales pesados en el lodo residual B estabilizado, resultados después de haber sido estabilizado el lodo residual B, como el As (10.3 mg/kg), Cd (1.77mg/kg), Cr (11.49mg/kg), Cu (90.1mg/kg), Pb (34.97mg/kg), Hg (<0.1mg/kg), Ni (18.89mg/kg), y Zn (567.5mg/kg) respectivamente. Así también, presentan valores fertilizantes con relaciones de concentración de nutrientes

para uso agrícola. Resultados que han permitido confirmar que el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, denominado lodo residual B, ha sido estabilizado con el propósito de darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo y se pueda utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura, nutrientes agrícolas contenidos en el lodo residual B estabilizado que las plantas requieren para su crecimiento y favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta.

Igualmente, los resultados de la estabilización del lodo de depuración B que se muestran en la tabla IV.21 para ratios de concentración de estabilización en relación al comportamiento de la estabilización, considerando el uso de sustancia alcalina con respecto a la valorización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, muestras residuales denominadas A y B, de los parámetros de muestras de lodos A y B analizados en el laboratorio, y de las concentraciones permisibles, según normas ambientales, de elementos pesados en el lodo residual han permitido confirmar que el lodo residual B ha sido estabilizado y puede ser utilizado en el esparcido agrícola para el acondicionamiento del suelo, y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

La conclusión general a este trabajo realizado es la concentración de componentes valiosos del lodo de depuración B estabilizado, valores fertilizantes con concentraciones de nutrientes agrícolas, y asimismo el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, denominados A y B, pueden ser una fuente de nutrientes para uso agrícola y favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta. Siendo el lodo residual B estabilizado apropiada para el esparcido agrícola, el lodo residual B estabilizado se utilizó como sustrato para la siembra de semillas, en el acondicionamiento del suelo para mejorar su productividad y fertilidad del suelo. Asimismo, según resultados obtenidos en este trabajo realizado han permitido confirmar que el lodo de depuración B estabilizado contienen componentes valiosos, como nutrientes, materia orgánica y carbono orgánico en beneficio de la agricultura para el sistema suelo-planta y del medio ambiente.

Sin embargo, los elementos tóxicos en el lodo de depuración B como los contenidos de metales pesados no es favorable y según las normas ambientales

reglamentarias deben contener una cantidad permisible. En consecuencia, se concluye que el lodo de depuración B debe estar estabilizado para que pueda ser utilizado en el acondicionamiento del suelo, esparcido agrícola del lodo residual B, y comprobar que está exento de riesgos de contaminación y ser ambientalmente segura. Por lo tanto, según los resultados obtenidos en este trabajo realizado para los lodos de depuración A y B han permitido confirmar en este trabajo que el lodo de depuración B ha sido estabilizado y presentan valores permisibles según las normas ambientales reglamentarias (los valores de concentración, que han sido obtenidos en el presente trabajo, para elementos pesados en relación a muestras del lodo analizados después de su estabilización tienen valores de concentración permisibles, según normas ambientales, y pueden ser utilizados para el esparcido agrícola del lodo residual B) y permiten darle al lodo de depuración B estabilizado una destinación final de valorización agrícola mediante el acondicionamiento en forma de sustrato para beneficio de actividades agrícolas y del medio ambiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos para ratios de concentración de estabilización de los lodos A y B en relación al comportamiento durante el proceso de estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales, estabilización de lodos A y B. Asimismo, de los parámetros de las muestras de lodos analizados (metodología de ensayo y resultados), de parámetros de toxicidad química para lodos de PTAR, de los resultados obtenidos durante las pruebas de estabilización del lodo de depuración, así también según valores permisibles especificados en las normas ambientales reglamentarias para lodos de PTAR, que también fijan límites con respecto al contenido de elementos contaminantes con la finalidad de evitar su toxicidad y acumulación en el sistema suelo-planta. En consecuencia, según los datos experimentales que han sido obtenidos en las pruebas realizadas se puede confirmar que el lodo B ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura, nutrientes contenidos en el lodo B estabilizado, elementos inorgánicos que las plantas requieren para su crecimiento y puedan favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta.

Los resultados para el lodo de depuración B, ratios de concentración de estabilización para el lodo estabilizado, con valores de 0.60 a 0.21 para las pruebas experimentales de estabilización del lodo B, siendo los resultados obtenidos permisibles según las normas ambientales reglamentarias.

Se utiliza el lodo de depuración B estabilizado en el esparcido agrícola del suelo, para la siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*), así también para la siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus Vulgaris*), se observan una buena germinación, crecimiento y desarrollo muy favorables de las plantas, de las diferentes semillas sembradas utilizando como sustrato el lodo de depuración B estabilizado.

Luego, el esparcido agrícola del lodo de depuración B estabilizado tiene un efecto positivo en la siembra de las semillas, minimiza los riesgos ambientales y optimiza el proceso de estabilización para obtener un producto final con un valor agregado que justifique su valorización agrícola, cuyo resultado sea un producto final estable, favorecer la fertilidad del suelo, y de calidad como fertilizante.

Por lo tanto, la valorización agrícola del lodo residual B estabilizado que ha sido generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, puede ser considerado como las mejores opciones ambientales con el propósito de ser utilizado mediante su esparcido agrícola para el acondicionamiento del suelo y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y del medio ambiente. Asimismo, las leyes de la velocidad (modelos matemáticos definidas por Fick, Fourier y Newton), para el flujo de cierta cantidad física transportada que será proporcional al gradiente de otra propiedad física, se pueden relacionar con respecto a un sistema intragranular y extragranular del lodo residual y/o el medio exterior, y observar la variación de equilibrio que pueda existir en el sistema considerado.

Actualmente existe un incremento cada vez mayor de producción de lodos residuales que son producidos en estaciones de depuración relacionadas con operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales, durante el tratamiento de aguas residuales domésticas, que necesitan ser tratados y gestionados para darles una destinación final de valorización agrícola.

Asimismo, el propósito de la presente investigación realizada es optimizar los métodos para la gestión del lodo de depuración de aguas residuales domésticas, y la enorme importancia de construir nuevas estaciones de depuración de aguas residuales con la finalidad de minimizar la contaminación ambiental causada por el vertido de aguas residuales sin tratamiento.

Mediante el uso del lodo residual B, utilizado en forma de sustrato, adicionado al suelo mejora sus propiedades físicas y químicas proporcionándole las relaciones de concentración de potencial de hidrógeno requeridos, aproximadamente neutral, presentando nutrientes para uso agrícola, como el Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Zinc, Cobre, Sodio, Hierro, Manganeseo, Boro. Luego el lodo B estabilizado obtenido en este trabajo, es un producto importante para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo y pueda beneficiar de sus valores fertilizantes a la agricultura, y al medio ambiente.

En consecuencia, el esparcido agrícola constituye uno de los principales sectores de valorización agrícola del lodo de depuración B estabilizado, y es relevante darle al lodo B una destinación final de valorización agrícola y utilizarlo en el esparcido agrícola para el acondicionamiento del suelo. Luego es importante y necesario la construcción de nuevas estaciones de depuración de aguas residuales, realizar gestiones con la finalidad de conservar los ecosistemas lagunares, costeros, y los impactos negativos sobre la biodiversidad causados por los vertidos a los ríos y mares de aguas residuales sin tratamiento, y por los lodos de depuración que han sido producidos en plantas relacionadas con operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales sin ninguna destinación final para su valorización agrícola.

Por lo tanto, es necesario considerar la importancia de darle una destinación final de valorización agrícola al lodo de depuración B estabilizado, de tal manera minimizar la contaminación de suelos, aguas y de los Impactos humanos en los ecosistemas lagunares y costeros.

Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento causan impactos negativos en el ecosistema y los impactos negativos se podrían minimizar mejorando los procesos industriales y considerando optimizar las operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales, con el propósito de obtener el

agua depurada y el lodo de depuración, lodos de depuración que deben ser conducidos para un tratamiento y gestionados para darles una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola del lodo B estabilizado en el acondicionamiento del suelo.

El impacto negativo sobre los ecosistemas lagunares y costeros ha aumentado de forma espectacular desde la revolución industrial y el aumento de la población humana. La apertura de las minas en la cuenca hidrográfica sin verdaderas medidas de descontaminación ha contribuido a una contaminación con metales pesados, que hasta la fecha persiste localmente en los sedimentos. Los vertidos de aguas residuales sin ningún proceso de transformación aportan muchas sustancias contaminantes a la laguna, a los ríos y al mar. Luego, es importante la edificación de nuevas estaciones de depuración relacionados con operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales con el propósito de minimizar impactos negativos causados por aguas residuales sin ningún proceso de transformación así también por los lodos generados sin una destinación de valorización agrícola.

La relación carbono/nitrógeno define la velocidad de mineralización. Cuanto más bajo sea, más rápida será la mineralización. Lo cual implica que los lodos de depuración B estabilizados se puedan utilizar como fertilizantes orgánicos nitrogenados.

Los resultados del tratamiento de la estabilización del lodo de depuración B, que también implica la mineralización de la materia orgánica con una relación de carbono/nitrógeno baja, favorecen la valorización agrícola de lodo B.

En consecuencia, de acuerdo a los resultados obtenidos, la conclusión general del presente trabajo considerando el contenido de nutrientes del lodo de depuración B estabilizado, la estabilización de la materia orgánica del lodo B, y los contaminantes permisibles del lodo de depuración B, han permitido confirmar que el lodo B ha sido estabilizado y cumplen con los valores especificados en las normas ambientales reglamentarias.

Por lo tanto, el lodo B estabilizado es apropiado para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo con la finalidad de mejorar su fertilidad y

productividad, para favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta, en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

En el subcapítulo 4.3 se continúa con la presentación de los resultados obtenidos en este trabajo, durante las pruebas experimentales, en el proceso de valorización con respecto al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, y en consecuencia se pueda obtener un producto estabilizado y darle una destinación final de valorización agrícola al lodo residual producido en estaciones de depuración relacionados con operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales.

4.3. Resultados

4.3.1. Pruebas realizadas con respecto al lodo residual

En la Figura IV.5 puede verse la PTAR relacionado a operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales, se produce el subproducto durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, en este lugar han sido colectados las muestras de lodos residuales para luego ser conducidos al proceso de evaluación con el propósito de darle estabilización y luego se le pueda dar una destinación final de valorización agrícola.

Los ensayos efectuados para el grupo de ensayo IIX y Ily han sido efectuados mediante adición de sustancia alcalina con el propósito de obtener ratios de concentración de estabilización para la valorización del subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, ratios de concentración de estabilización obtenidos en el presente trabajo de investigación durante el proceso de operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento paralela sobre superficies planas.



Figura IV.5. PTAR, en Lurigancho-Chosica, lugar donde se desarrollan las operaciones unitarias para procesos de transformación de aguas residuales produciendo el subproducto residual durante el proceso efectuado. En este lugar han sido colectados las muestras del subproducto producido para su evaluación.

Se indican en la Tabla IV.11 los diferentes ensayos que han sido efectuados durante el proceso de operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento sobre una superficie horizontal con respecto al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales. Puede verse en la tabla IV.11 considerando la columna denominada grupo de ensayo, que los grupos de ensayo representados con igual denominación numérica (I, II, o III) pertenecen a subproductos del proceso de tratamiento de aguas residuales que han sido colectados en el mismo lugar de salida del proceso de tratamiento de aguas residuales. La columna, denominada envase de ensayo, representa la identificación del envase de la muestra que ha sido empleada durante el proceso de secado y estabilización. La siguiente columna corresponde a la concentración de sustancia alcalina agregada. Luego en la última columna se dan una identificación para la denominación de ensayos efectuados.

Tabla IV.11. *Ensayos efectuados durante el proceso de operación unitaria de secado por convección de un fluido en movimiento.*

Grupo de ensayo	Envase del ensayo	Sustancia alcalina	Denominación del ensayo
It	a	no contiene	eust.sn2
Iu	b y b*	contiene	eust.cn4
IIV	c	contiene	eust.cn5
IIf	d	contiene	eust.cn9
IIx	e	contiene	eust.cn12
IIy	e	contiene	eust.cn11
IIIz	f	no contiene	eust.sn16

La relación de concentración para la masa de sustancia residual seca, SS, y la concentración de masa de sustancia residual volátil (SRV, MV o SV), datos experimentales que han sido obtenidos en el presente trabajo de investigación de acuerdo a procesos normalizados (ASAE 1996).

Ferrer et al. (2018), explican en referencia a los procesos de transformación durante los tratamientos biológicos de aguas residuales, para la generación del agua depurada y el lodo de depuración, afirman que durante los procesos de transformación de aguas residuales, las aguas residuales contaminados aportan durante el proceso energía y carbono para el crecimiento de microorganismos y luego se pueda producir una biomasa o lodo de depuración, procesos importantes que se desarrollan en estaciones de depuración relacionados con operaciones unitarias efectuados para los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Así también Ferrer et al. (2018), hacen referencia con respecto a las relaciones de concentración de sustancias contaminantes, presentes en aguas residuales, que pueden influir con efectos negativos para el proceso de depuración de aguas residuales. Por lo tanto, es necesario optimizar los procesos unitarios desarrollados durante los tratamientos de aguas residuales.

4.3.2. Relaciones de concentración de sustancia residual seca, SS.

Tabla IV.12. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración para la sustancia residual seca, efectuados en el grupo de ensayo I.

$$\sigma^2 = 0,019 \% \quad \sigma = \pm 0,13 \%$$

Grupo de ensayo I		S _i (g)	SS(g)	SS (%)	SS _{media} (%)
Ensayo a	Prueba I	64.50	15.94	24.7	24.7±0.14
	Prueba II	66.05	16.39	24.8	
Ensayo b	Prueba I	39.36	12.32	31.3	31.38±0.14
	Prueba II	51.89	16.38	31.6	
	Prueba III	49.45	15.42	31.2	
Ensayo b'	Prueba I	30.12	9.37	31.1	31.03±0.14
	Prueba II	46.10	14.34	31.1	
	Prueba III	41.58	12.83	30.9	

Puede verse en la Tabla IV.12 las relaciones de concentración de masa de sustancia residual seca del lodo, presentes en el grupo de ensayo I. En la tabla mostrada puede verse que la relación de concentración de sustancia residual seca sin agregar sustancia alcalina presenta un valor medio de 25%. Si se considera agregar la concentración de 45% de sustancia alcalina con respecto a 10% de humedad de sustancia residual seca, concentración de materia residual seca, da como resultado la siguiente concentración de sustancia residual seca:

$$MS = \frac{24,763 + 0,45 \cdot 24,763 \cdot 0,9}{100 + 0,45 \cdot 24,763} = 31,30\%$$

Puede verse que este valor tiene la misma relación de concentración para los ensayos efectuados mediante concentración de sustancia alcalina con relaciones de concentración aproximadamente alrededor de 31%.

Tabla IV.13. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración para la sustancia residual seca, efectuados en el grupo de ensayo II

$$\sigma^2 = 0,019 \% \quad \sigma = \pm 0,13 \%$$

Grupo de ensayo II		S _i (g)	SS(g)	SS (%)	SS _{media} (%)
Ensayo c	Prueba I	32.15	9.07	28.20	28.17±0.14
	Prueba II	42.46	11.97	28.19	
	Prueba III	18.03	5.07	28.12	
Ensayo d	Prueba I	40.46	11.61	28.70	28.56±0.14
	Prueba II	46.91	13.33	28.42	

Se indica en la Tabla IV13 que el subproducto producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, ha sido utilizada durante las pruebas efectuadas en el grupo de ensayo II, presentan una mayor relación de concentración en relación a la humedad. Luego el incremento de la concentración de humedad es consecuencia de una concentración inferior de sustancia alcalina agregada.

4.3.3. Relaciones de concentración de sustancia residual volátil (SRV o SV)

Tabla IV.14. Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración de la sustancia residual volátil, efectuados en el grupo de ensayo I

$$\sigma^2 = 1,52 \% \text{ al considerar el envase de ensayo d, y si no es el caso } \sigma^2 = 0,03\%$$

$$\sigma = \pm 1,23 \% \text{ al considerar el envase de ensayo d, y si no es el caso } \sigma = \pm 0,20 \%$$

Grupo de ensayo I		SR _i (g)	SR(g)	SRV (%)	SRV _{media} (%)
Ensayo a	Prueba I	15.57	7.26	53.37	53.34
	Prueba II	16.21	7.57	53.30	
Ensayo b	Prueba I	12.18	6.87	43.60	43.49
	Prueba II	12.79	7.20	43.70	
	Prueba III	14.94	8.49	43.17	
Ensayo b'	Prueba I	9.11	5.19	42.96	43.04
	Prueba II	13.09	7.47	42.94	
	Prueba III	10.64	6.04	43.23	

Puede verse en la Tabla IV.14 que la relación de concentración para la masa de sustancia residual volátil que no contiene sustancia alcalina presenta un incremento de 10% en relación a la concentración para la masa de sustancia residual volátil con concentración de sustancia alcalina. Luego puede verse que los dos envases de ensayo que han sido utilizados con sustancia alcalina presentan similar concentración de sustancia residual volátil.

Tabla IV.15. *Ensayos en relación al proceso de operación unitaria de secado con el propósito de obtener la concentración de sustancia residual volátil, efectuados en el grupo de ensayo II*

$\sigma^2 = 1,52 \%$ al considerar el envase de ensayo d, y si no es el caso $\sigma^2 = 0,03\%$

$\sigma = \pm 1,23 \%$ al considerar el envase de ensayo d, y si no es el caso $\sigma = \pm 0,20 \%$

Grupo de ensayo II		SR _i (g)	SR(g)	SRV (%)	SRV _{media} (%)
Ensayo c	Prueba I	9.98	6.02	44.01	44.11
Ensayo d	Prueba I	12.95	7.88	39.15	41.27
	Prueba II	11.25	6.37	43.38	

Se indica en la Tabla IV.15 que el ensayo (c) presenta una relación de concentración de sustancia residual volátil similar en relación a los ensayos efectuados b y b' que pueden verse en la tabla IV.14. Luego, si se considera que el ensayo b' debe tener una concentración similar al ensayo b, la prueba I con respecto al ensayo d presenta una concentración inferior, variación que podría ser como consecuencia de un error durante el proceso unitario de secado por convección de un fluido en movimiento sobre una superficie horizontal.

4.3.4. Comportamiento durante el proceso efectuado para la estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales

4.3.4.1. Lodo A

Tabla IV.16. *Lodo sin estabilizar-Secado. Contenido de materia seca*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
SS (%)	13.09	22.12	28.10	33.13	38.12

Tabla IV.17. *Lodo sin estabilizar-Calcinación. Contenido de materia no volátil*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
MnV(%)	33.58	33.52	33.72	33.67	33.18

Tabla IV.18. *Ratios de concentración de estabilización*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
SS (%)	13.09	22.02	28.11	33.13	38.01
Ratios de concentración de estabilización	0.664	0.665	0.662	0.663	0.668

4.3.4.2. Lodo B

Tabla IV.19. *Lodo estabilizado-Secado. Contenido de materia seca*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
SS (%)	15.12	23.97	29.82	36.24	39.61

Tabla IV.20. Lodo estabilizado-*Calcinación. Contenido de materia no volátil*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
MnV(%)	39.6	59.24	69.14	74.7	78.6

Tabla IV.21. *Ratios de concentración de estabilización*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
SS (%)	15.12	23.97	29.82	36.24	39.61
Ratios de concentración de estabilización	0.60	0.41	0.31	0.25	0.21

4.3.4.3. Lodo A**Tabla IV.22.** Lodo sin estabilizar. *Contenido de materia orgánica, MO, y carbono orgánico total, COT*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
MO (%)	65	65,1	65,5	65,3	65,3
COT (%)	37,7	37,8	38	37,9	37,9

4.3.4.4. Lodo B**Tabla IV.23.** Lodo estabilizado. *Contenido de materia orgánica, MO, y carbono orgánico total, COT*

Prueba	Base	100 g	200 g	300 g	400 g
MO (%)	60,3	40,6	30,7	25,3	21,4
COT (%)	35	23,6	17,8	14,7	12,4

En las Figuras IV.6, IV.7 y IV.8 se muestran las pruebas realizadas, para el proceso relacionado con la estabilización del subproducto producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, muestra de lodo residual que ha sido denominado B, durante el tratamiento para los lodos considerados A y B.

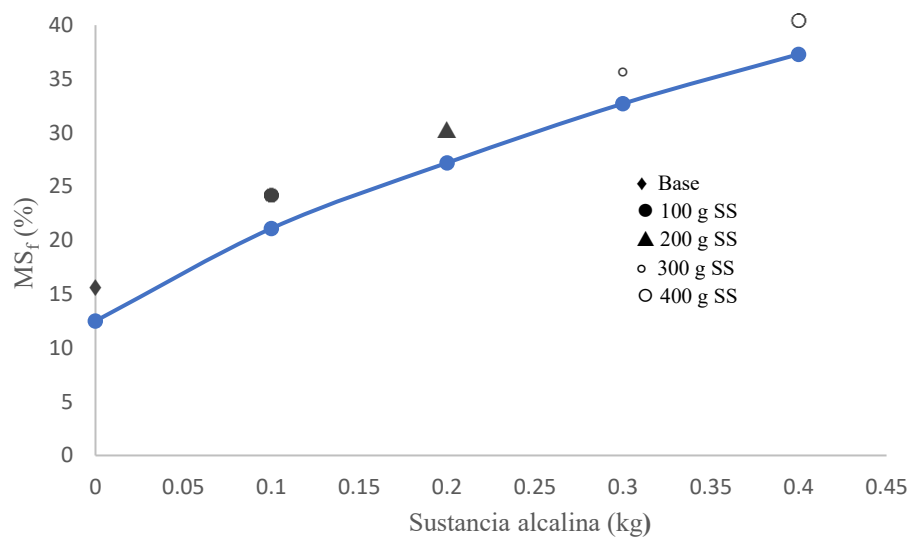


Figura IV.6. Relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayo que corresponde al lodo A

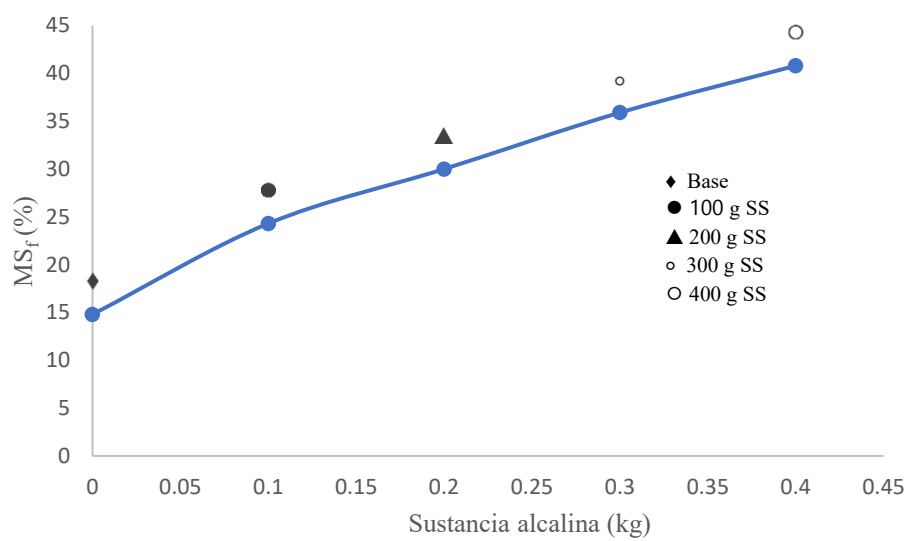


Figura IV.7. Relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayo que corresponde al lodo B

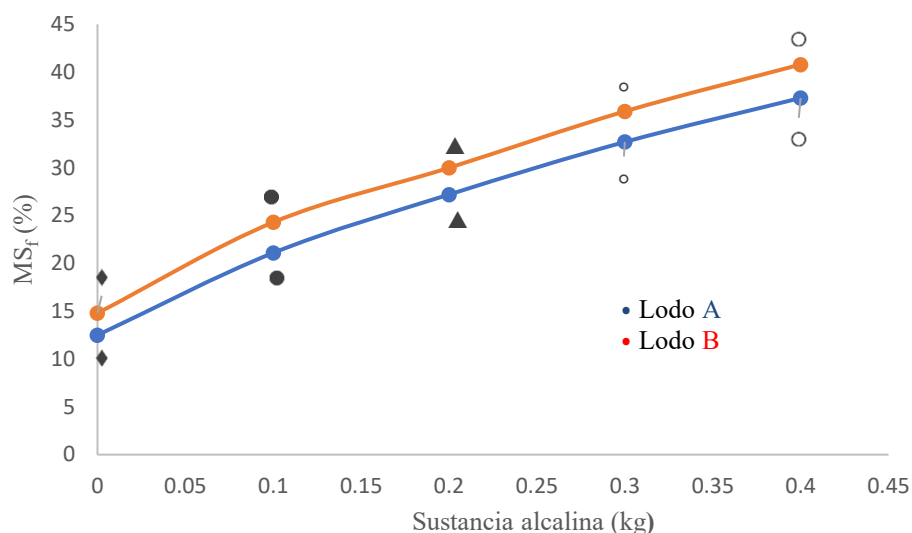


Figura IV.8. Comparación de relaciones de concentración de sustancia residual seca en función de la variación de sustancia alcalina, ensayos correspondientes para muestras de lodos residuales denominados A y B

Pueden verse en las figuras IV.9 y IV.10 la variación de las curvas para la cinética de secado convectivo correspondientes al subproducto producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales en relación a los lodos A y B, y el efecto obtenido con las adiciones crecientes de masa agregada, durante el proceso de operación unitaria de secado del lodo residual por convección del fluido en movimiento y su estabilización.

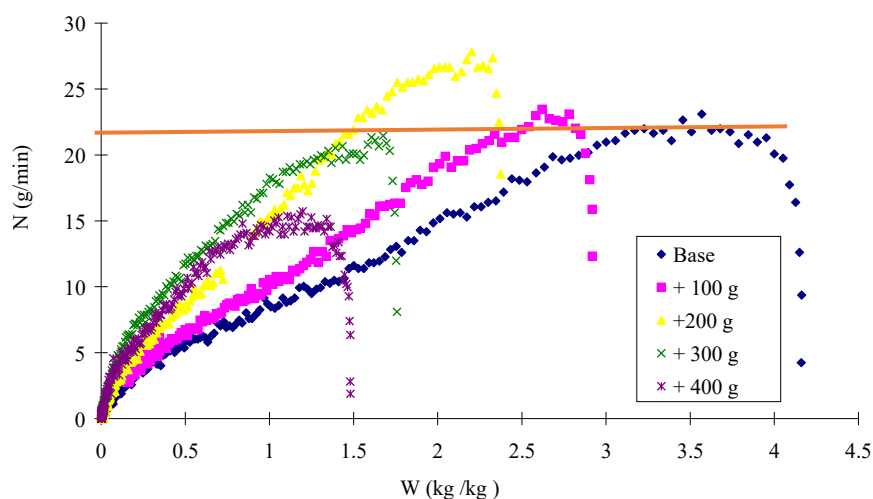


Figura IV.9. Variación de la velocidad de secado del lodo de depuración con respecto a la relación de concentración de humedad del Lodo A

Puede verse en la figura IV.9 un plano horizontal imaginario, tomado como referencia, donde la mayor velocidad de secado del lodo A es, ≈ 20 g/min. Para todos los lodos no se observa una zona o flujo másico de líquido evaporado constante, pero puede verse cuando se inicia el proceso para la operación unitaria de secado por convección, estado inicial de secado, una zona de precalentamiento permite tener una velocidad máxima seguida de un largo periodo de decrecimiento de la velocidad de secado del lodo, estado final de secado. Por lo tanto, para el lodo A, no existe un efecto positivo de la adición creciente de masa agregada, retromezclado.

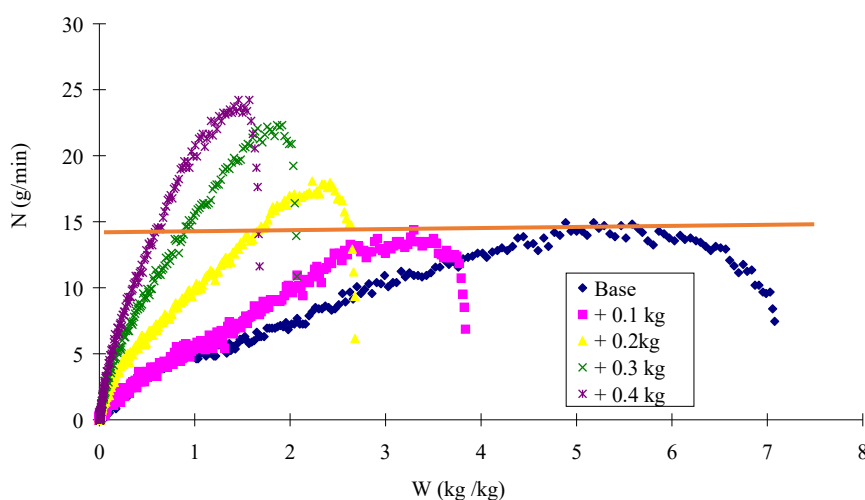


Figura IV.10. Velocidad de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo B

Se muestra en la Figura IV 10, la variación de las curvas de secado con respecto al subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales, para la muestra de lodo residual que ha sido denominada B, puede verse un incremento para el flujo másico en relación al incremento de la relación de concentración de masa agregada. Luego existe un efecto positivo del retromezclado, y podría ser debido como consecuencia del efecto sobre el área superficial de la muestra de lodo, ofreciendo una mayor área superficial para los procesos de transporte del flujo másico así también del transporte del flujo térmico. La velocidad máxima aumenta al agregar masas crecientes, después el flujo másico transportado durante el proceso de secado disminuye.

La comparación considerando la cinética de secado del lodo se debería hacer sobre la base del flujo de secado.

Así también puede verse en la figura IV.10 un incremento máximo del flujo másico durante el proceso de la operación unitaria de secado por convección para las adiciones más importantes de masa seca. Existen dos razones posibles:

1. Aumento de transferencias extragranulares debido a las modificaciones de la superficie de intercambio.
2. Aumento de transferencias intragranulares debido a las modificaciones de las texturas internas.

De acuerdo a las figuras IV.11 y IV.12 pueden verse el flujo másico transportado en el proceso de la operación unitaria de secado del lodo residual producido durante el proceso de tratamiento de aguas residuales, muestras de lodo residual denominados A y B, asimismo el efecto obtenido con las adiciones crecientes de masa agregada, durante el secado convectivo y la estabilización del lodo residual B.

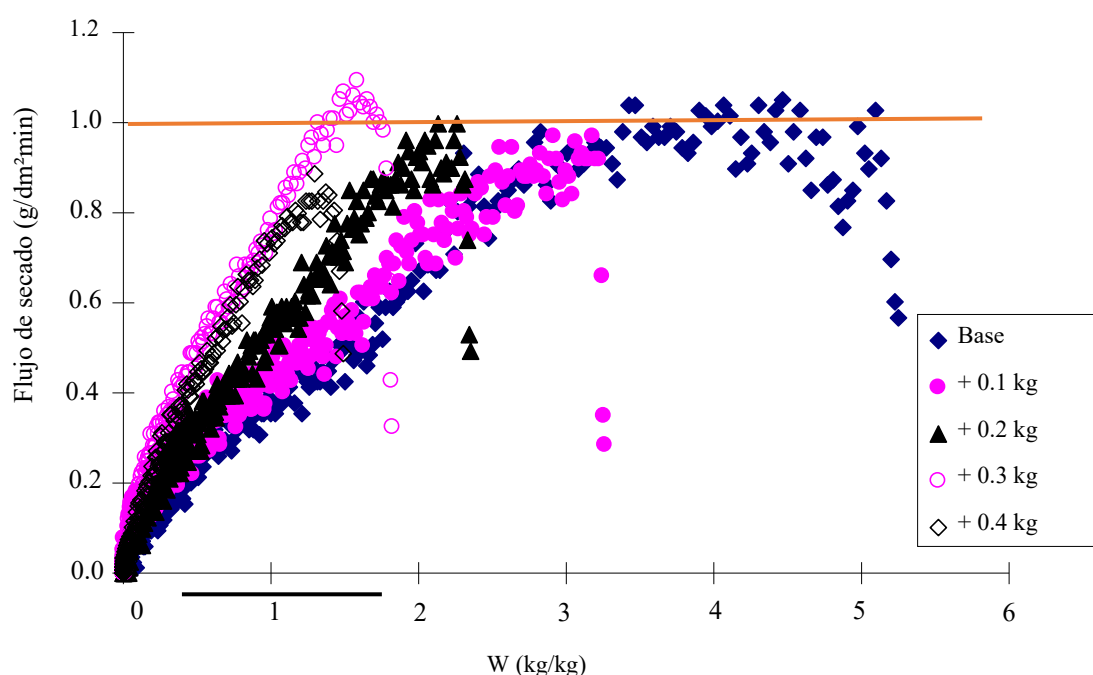


Figura IV.11. Flujo de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo B.

Puede verse en la Figura IV.11, para el lodo residual B, el flujo de secado convectivo del lodo de depuración obtenido al dividir la velocidad de secado por la superficie de intercambio inicial, flujo de secado del lodo de depuración.

Se observa que el flujo máximo es globalmente el mismo para todas las pruebas realizadas durante el secado y la estabilización del lodo de depuración, entre 0.8 y 1 g/dm² min.

Cuando se espera tener contenidos de humedad inferiores a 1 y a 2 kg/kg, se observa diferencias entre las curvas cuando el nivel de retromezclado es elevado. La velocidad de secado es más elevada para las adiciones de masas secas superiores a 200 g.

En esta zona se puede hacer la hipótesis que las limitaciones intragranulares son dominantes y parece disminuir con la adición de masas secas.

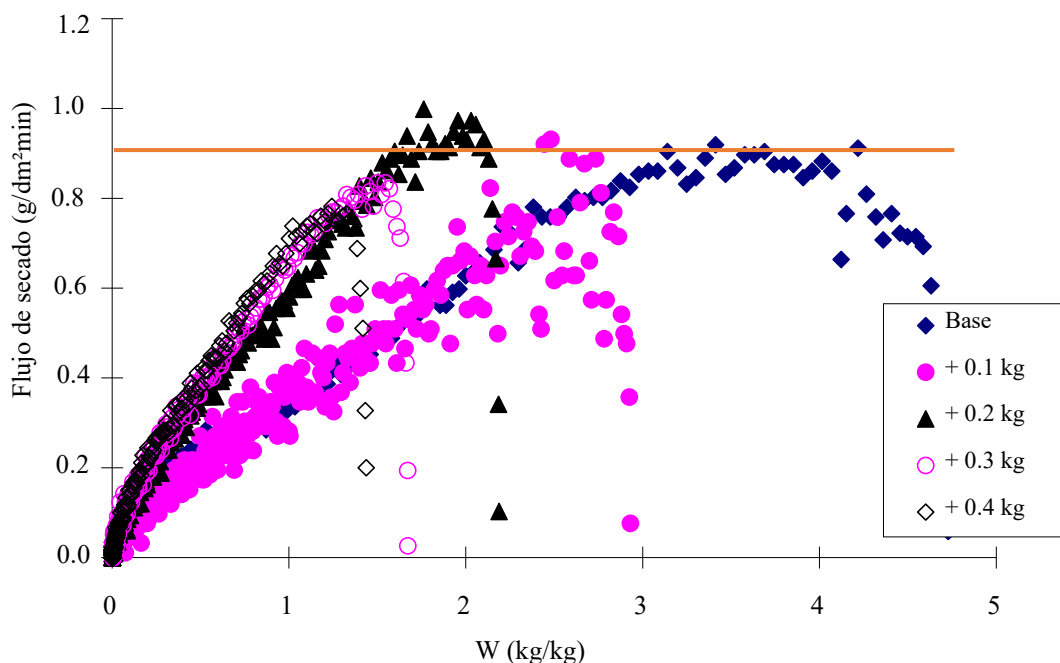


Figura IV.12. Flujo de secado del lodo de depuración en función de la humedad en base seca. Lodo A.

Puede verse en la Figura IV.12, para el lodo residual A, el flujo de secado del lodo de depuración obtenido al dividir la velocidad de secado por la superficie de intercambio inicial, flujo de secado del lodo de depuración.

Se observa que no existe un efecto positivo del retromezclado, si no existe este efecto positivo sobre los tiempos de secado en el caso del lodo residual A, sigue habiendo un efecto positivo sobre el flujo de secado. Esto está relacionado a la baja evolución de la superficie desarrollada por estos lodos.

Un ligero aumento del flujo apenas influye en el tiempo de secado del lodo. Sin embargo, la situación es diferente para el lodo B que han visto su tiempo de secado disminuir. Luego, el efecto de las pruebas con la adición de masa seca agregada depende del lodo. El retromezclado puede mejorar el comportamiento del secado del lodo de depuración para la texturación del lodo evitando el hundimiento del lodo, y para aumentar la superficie de intercambio.

Los objetivos de la estabilización del lodo de depuración es minimizar los organismos patógenos de acuerdo con los niveles permitidos en las normas ambientales, degradar los sólidos volátiles y obtener un producto estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

Luego, para la valorización de los lodos de depuración de aguas residuales domésticas se deben considerar los parámetros especificados en las normas ambientales, fijándose límites en cuanto a concentración de metales pesados con la finalidad de evitar su toxicidad y acumulación en el sistema suelo-planta. El tratamiento aplicado para estabilizar la materia orgánica, MO, ha sido agregar sustancia alcalina al lodo de depuración producidos durante el tratamiento de aguas residuales.

En la Tabla IV.23 la materia orgánica, MO, se mantiene dentro de su valor permisible para el lodo B de depuración de aguas residuales, según las normas ambientales el lodo para ser considerado estabilizado debe tener valores de ratios de concentración de estabilización $\leq 60\%$. Puede verse en la Tabla IV.21 los resultados para la estabilización del lodo B, con relaciones de concentración de estabilización para el lodo B que han permitido confirmar que el lodo de depuración ha sido estabilizado y se le puede dar una destinación final de valorización agrícola.

La Tabla IV.23 muestra que durante el tratamiento de la estabilización del lodo B, el contenido de materia orgánica del lodo de depuración ha ido disminuyendo

a un valor de 21.4% obtenido en la prueba 4 durante la estabilización. Confirmando que en el lodo hubo una mayor degradación de los sólidos volátiles, según resultados del tratamiento realizado se obtiene un mayor efecto de la estabilización del lodo sobre la actividad microbiana, es decir mayor degradación de materia orgánica por parte de la sustancia alcalina.

Para los valores del porcentaje de materia orgánica total antes y después del tratamiento de estabilización del lodo, para el contenido de materia orgánica total se observa que el lodo luego de su estabilización presentó valores permisibles de materia orgánica en las pruebas de estabilización, agregando sustancia alcalina crecientes. Se considera el resultado óptimo al lodo de depuración de la primera prueba, contiene 40,6% de materia orgánica, presenta un mayor contenido de materia orgánica en relación a las otras pruebas que tienen un menor contenido de materia orgánica.

Puede verse en la Tabla IV.23, que los contenidos de carbono orgánico total durante las pruebas de estabilización del lodo se mantienen en el rango del valor permisible por las normas ambientales para lodos de depuración. El contenido de carbono orgánico ha ido disminuyendo durante el tratamiento, lo cual es atribuible a la adición de sustancia alcalina que tiene influencia en la estabilización del lodo para la minimización de los organismos patógenos contenidos en el lodo de depuración.

El menor valor de carbono orgánico total para la estabilización del lodo de depuración es 12,4%, en esta prueba se consumió mayor cantidad de carbono orgánico debido a la mayor cantidad de sustancia alcalina agregada y también al mayor efecto sobre la actividad microbiana del lodo durante la prueba.

Los lodos de depuración en las pruebas realizadas presentan un contenido de carbono orgánico dentro del rango permisible de 12 y 24 % (Tabla IV.23).

El carbono orgánico total presente en el lodo durante las pruebas se encuentra dentro de los valores permisibles, pero se considera la primera prueba con un valor de 23,6% como el óptimo por contener el mayor valor de este parámetro con respecto a las otras pruebas realizadas.

Luego, de acuerdo a los resultados obtenidos en el comportamiento de la estabilización del lodo A y B, han permitido confirmar que el lodo de depuración B ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo y aprovechar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

En la Tabla IV.24 se muestran los parámetros referenciales del guano de isla compuesto, fertilizante orgánico biodegradable.

Tabla IV.24. Datos referenciales del guano de isla compuesto

Composición referencial	
Materia orgánica: 55%	Concentración (%)
Nitrógeno total (N)	8.86
Fósforo asimilable (P ₂ O ₅)	9
Potasio asimilable (K ₂ O)	4.40
Calcio (CaO)	14.16
Magnesio (MgO)	1.69
Azufre total (S)	3.72
Silicio (Si)	0.38
Hierro (Fe)	0.026
Manganeso (Mn)	0.025
Zinc (Zn)	0.006
Cobre (Cu)	0.0026
Boro (B)	0.0036
pH (unid pH):	6.43

.Nota: Prodiagro S.A, Control Unión Perú SAC.

En la Tabla IV.25 se muestran los nutrientes del guano de las islas, es un abono orgánico natural, ideal para el buen crecimiento y producción de productos agrícolas. Contiene los siguientes nutrientes:

Macroelementos: Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Elementos Secundarios: calcio, magnesio, azufre.

Micronutrientes: hierro, zinc, cobre, manganeso, boro.

Los microorganismos presentes utilizan el guano de las islas como sustrato de alimentación. Los microorganismos realizan las reacciones bioquímicas de oxidación, transformando la materia orgánica (productos complejos) en productos

inorgánicos más simples que es la forma como las plantas utilizan los nutrientes, el proceso realizado se denomina mineralización de la materia orgánica.

Tabla IV.25. Nutrientes y la composición del guano de las islas

NUTRIENTES	CONTENIDO (concentración)
Macroelementos	
Nitrógeno N	8-14 %
Fósforo P ₂ O ₅	10-12 %
Potasio K ₂ O	2-3 %
Elementos Secundarios	
Calcio CaO	8 %
Magnesio MgO	0.5%
Azufre S	1.5%
Microelementos	
Hierro Fe	320 p.p.m, 0,032%
Zinc Zn	20 p.p.m 0,0002%
Cobre Cu	240 p.p.m 0,024%
Manganeso Mn	200 p.p.m 0,020%
Boro B	160 p.p.m 0,016%
También contiene	
Flora microbiana	Hongos y bacterias benéficas.

Nota: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), Perú, AGRO RURAL, Av. República de Chile 350, Jesús María, PE 15072, Sub dirección de insumos y abonos.

Se indican en las Tablas IV.26 y IV.27 los resultados de la determinación de los parámetros de las muestras de lodos de depuración de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas PTAR, las pruebas experimentales se realizaron utilizando la siguiente metodología de ensayo:

Tabla IV.26. I. Metodología de ensayo

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Fósforo total	EPA Methot 200.7, Rev.4.4.EMC Version. Determination of Metals and trace Elements in Water and wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry-1994	0.3 ^(a)	P mg/kg
pH	EPA SW-846, Method 9045 D (Rev 4) 2004. Soil and Waste pH		unid pH
Metales:Aluminum (Al), Antimony (Sb), Arsenic (As), Barium (Ba), Boron (B), Beryllium (Be), Cadmium (Cd), Calcium (Ca), Chromium (Cr), Cobalt (Co), Copper (Cu), Iron (Fe), Lead (Pb), Lithium (Li), Magnesium (Mg), Manganese (Mn), Mercury (Hg), Molybdenum (Mo), Nickel (Ni), Potassium (K), Selenium (Se), Silica (SiO ₂), Silver (Ag), Sodium (Na), Strontium (Sr), Thallium (Tl), Estaño, Titanium (Ti), Vanadium (V), Zinc (Zn), Thorium (Th), Uranium (U), Tungsten (W)	EPA 3050-B (1996) Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils// SW-846 Method EPA 6010D, Rev. 5, 2018.Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES).		mg/kg
Nitrógeno total de Kjeldahl (kjeldahl Total Nitrogen)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Norg-C, 23rd Ed. 2017. Semi-Micro-kjeldahl Method.	0.05	N%

L.C.: *límite de cuantificación.*

(a) *Expresado como límite de detección del método.*

Nota: Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Tabla IV.27. II. Resultados

Ensayo	Unidades	Resultados
Fósforo total	P mg/kg	9137.0
Fósforo total	P ₂ O ₅ %	8.37
pH	unid pH	6.54
Nitrógeno total de Kjeldahl (Kjeldahl Total Nitrogen)	N %	4.97

Resultados de lodo reportados en base seca.

Medición de pH realizada a 25°C.

Nota: Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Ensayo	L.D.M. (mg/kg)	Resultados (mg/kg)	Resultados (%)
Metales			
Plata (Ag)	0.08	0.72	0.00007
Aluminio (Al)	1.2	3346.1	0.3
Arsénico (As)	0.1	10.3	0.001
Boro (B)	0.2	41.5	0.004
Bario (Ba)	0.2	126.6	0.01
Berilio (Be)	0.03	<0.03	
Calcio (Ca)	3.1	29482.5	2.9
Calcio (CaO)		41252.1	4.1
Cadmio (Cd)	0.05	1.77	0.0002
Cerio (Ce)	0.2	6.8	0.0007
Cobalto (Co)	0.04	3.12	0.0003
Cromo (Cr)	0.05	11.49	0.001
Cobre (Cu)	0.1	90.1	0.009
Hierro (Fe)	0.2	4470.4	0.4
Mercurio (Hg)	0.1	<0.1	
Potasio (K)	3.8	2105.5	0.2
Potasio (K ₂ O)		10145.6	1.01
Litio (Li)	0.3	5.9	0.0006
Magnesio (Mg)	4.1	3044.8	0.3
Manganeso (Mn)	0.05	587.51	0.06
Molibdeno (Mo)	0.2	3.0	0.0003
Sodio (Na)	2.2	1206.8	0.1
Níquel (Ni)	0.07	18.89	0.002
Plomo (Pb)	0.05	34.97	0.003
Antimonio (Sb)	0.2	0.5	0.00005
Selenio (Se)	0.3	4.2	0.0004
Estaño (Sn)	0.1	9.8	0.001
Estroncio (Sr)	0.1	171.8	0.02
Torio (Th)	0.2	<0.2	
Titanio (Ti)	0.03	77.27	0.008
Talio (Tl)	0.3	<0.3	
Uranio (U)	0.3	<0.3	
Vanadio (V)	0.06	12.51	0.001
Wolframio (W)/Tungsteno	0.2	5.5	0.0006
Zinc (Zn)	0.3	567.5	0.06

L.D.M: límite de detección del método.

Resultados de lodo reportados en base seca.

(...): Dato no calculado.

Nota: Elaboración propia y Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Nitrógeno Kjeldahl (%): La determinación del Nitrógeno Kjeldahl se refiere al amoníaco, los nitritos, los nitratos, la urea y al nitrógeno orgánico.

Asimismo, los lodos de depuración de aguas residuales deben cumplir con los siguientes parámetros de toxicidad química:

Tabla IV.28. *Parámetros de toxicidad química para lodos de PTAR*

	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Níquel	Zinc
mg/kg ST Materia Seca	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

Nota: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, D.S. 015-2017-Vivienda.

En caso que la concentración exceda uno de los valores indicados en la Tabla IV.28, el lodo no estará estabilizado y no puede ser utilizado para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo.

Así también según los niveles permisibles especificados en las normas ambientales reglamentarias para lodos de depuración generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales indican las condiciones mínimas para la estabilización o reducción del potencial de atracción de vectores, lodos con contenido de materia orgánica susceptible de descomposición. Luego, los lodos estarán estabilizados cuando la relación de sólidos volátiles (SV) a sólidos totales (ST) es menor o igual que 60% (0,6).

De acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis realizados en el laboratorio de ensayo para el lodo de depuración, Tabla IV.27, muestran valores menores a las concentraciones indicadas en la Tabla IV.28 de los parámetros de toxicidad para lodos de PTAR.

Los resultados obtenidos en el laboratorio, de los metales analizados en el lodo de depuración de aguas residuales domésticas son los siguientes: As (10.3 mg/kg), Cd (1.77mg/kg), Cr (11.49mg/kg), Cu (90.1mg/kg), Pb (34.97mg/kg), Hg (<0.1mg/kg), Ni (18.89mg/kg), y Zn (567.5mg/kg) respectivamente. Resultados que han permitido confirmar que el lodo de depuración de aguas residuales domésticas ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo y aprovechar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura, nutrientes contenidos en el lodo de depuración que las plantas requieren para su crecimiento y favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta. Asimismo, la calidad de los lodos lo limita la presencia de metales pesados.

Igualmente, los resultados de la estabilización del lodo de depuración, presentados en las tablas de resultados experimentales del comportamiento durante el proceso de estabilización del subproducto de tratamiento de aguas residuales (Tablas IV.18 y IV.21), de los parámetros de muestras de lodos analizados en el laboratorio, metodología de ensayo (Tablas IV.26 y IV.27), y de los parámetros de toxicidad química para lodos de PTAR (Tabla IV.28) han permitido confirmar que el lodo de depuración ha sido estabilizado y puede ser utilizado en el esparcido agrícola para el acondicionamiento del suelo, y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

4.3.5. Siembra experimental utilizando el lodo de depuración estabilizado

Después de la estabilización del lodo de depuración B de aguas residuales se realiza la siembra experimental de diferentes semillas para la aplicación del lodo de depuración B estabilizado, en el esparcido agrícola, y luego se realiza la observación de la germinación y el crecimiento de los diferentes tipos de semillas consideradas en este trabajo.

Se utiliza para el proceso de la siembra experimental el lodo de depuración B estabilizado en la siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*), Figuras IV.13 a IV.16, así también para la siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*), que se muestran en las Figuras IV.17 a IV.31.

Se observó una buena germinación, crecimiento y desarrollo muy favorables de las diferentes variedades de semillas sembradas utilizando como sustrato el lodo de depuración B estabilizado, de aguas residuales domésticas.

Igualmente, el esparcido agrícola del lodo estabilizado garantiza la minimización de riesgos ambientales y la optimización del proceso de la siembra de semillas para que se pueda obtener un producto final con un valor agregado que justifique su valorización agrícola, y el resultado sea un producto final estable, que tenga un beneficio para la fertilidad del suelo, y de calidad como fertilizante en el esparcido agrícola para el acondicionamiento del suelo. Por lo tanto, la valorización agrícola del lodo de depuración B de aguas residuales domésticas, constituye una de las mejores opciones ambientales para ser utilizado en el

esparcido agrícola y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y en la minimización de la contaminación ambiental. La siembra experimental se realizó en el jardín de mi domicilio, distrito de San Juan de Lurigancho, Lima.



Figura IV.13. Siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*).



Figura IV.14. Siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*).

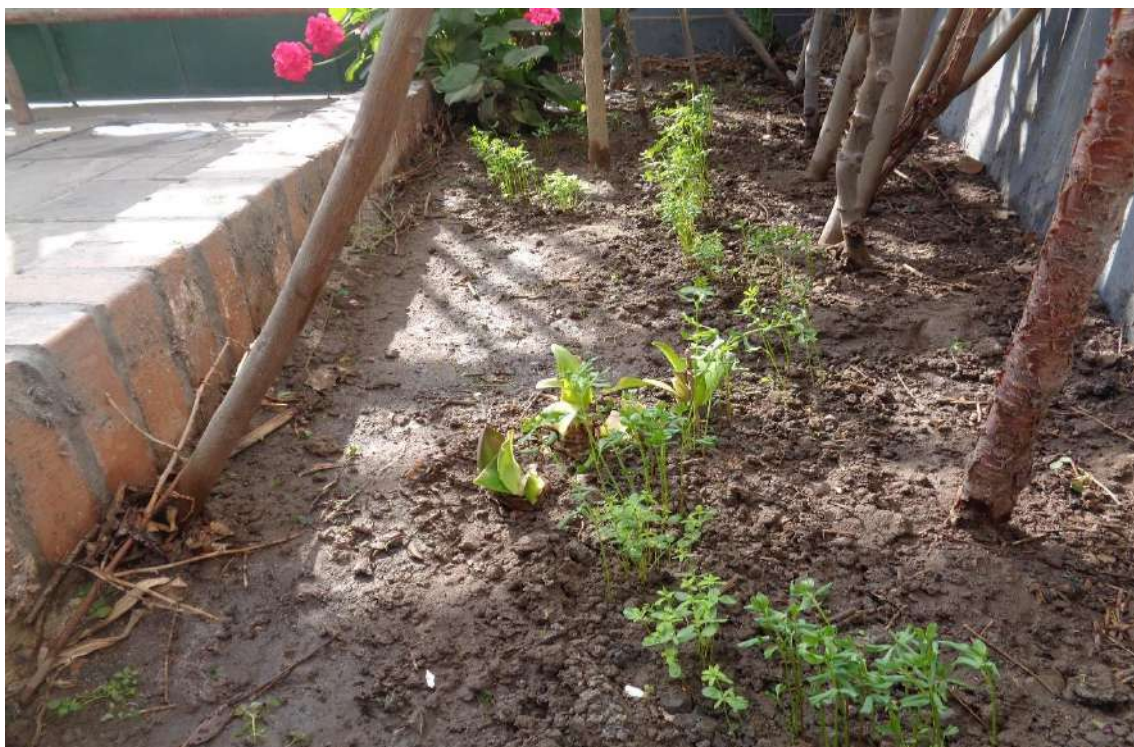


Figura IV.15. Siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*).



Figura IV.16. Siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*).



Figura IV.17. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.18. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.19. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.20. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.21. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.22: Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.23. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.24. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.25. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.26. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.27. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.28. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.29. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.30. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).



Figura IV.31. Siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus vulgaris*).

En diferentes lugares del Perú, existen otros métodos similares de gestión de residuos relacionados con la estabilización y valorización del lodo de depuración que también garantizan la minimización de riesgos ambientales como consecuencia de su valorización agrícola y de su uso para utilizar sus valores fertilizantes en la agricultura.

Asimismo, en el proyecto Agroecológico “**Ecohuella**” (2022) del distrito de Calca, región Cusco, Figuras IV.32 a IV.34, los responsables del proyecto realizan actividades de proyección social para el uso de fertilizantes naturales, obtenidos mediante procesos de compostaje, con el fin de producir productos agrícolas orgánicos de calidad, sugeridos para mantener una buena salud. Realizan el compostaje con residuos vegetales, proceso biológico en el cual los residuos de origen vegetal son reducidos a través de microorganismos a un material estabilizado denominado compost, con el objetivo de transformar los residuos vegetales a materiales útiles sin la presencia de organismos patógenos, actividades realizadas con la finalidad de obtener un producto final con un valor

agregado que justifica el proceso realizado, y utilizarlos como fertilizante para beneficio de la agricultura.

El riego de la siembra es por el sistema de goteo utilizando agua de fuentes subterráneas, sugerido para obtener una mejor producción agrícola.

El riego por el sistema de goteo y/o aspersión, utilizando agua de fuentes subterráneas está difundida a nivel nacional. En los andes peruanos es muy utilizado el riego por aspersión (Figuras IV.35 y IV.36). En las Figuras IV.37 a IV.39 se muestran la fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavín, Ancash 2022, así también el riego por aspersión utilizado para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), Mashcas bajo, Chavin 2022. En otras ciudades del Perú también se desarrollan otros métodos para la valorización de residuos, con objetivos similares a la estabilización del lodo de depuración de aguas residuales domésticas, y complementando para la valorización del lodo residual se utiliza agua de fuentes subterráneas para el riego por goteo y/o aspersión, así obtener mejores productos y minimizar la contaminación ambiental, los impactos negativos sobre la biodiversidad y la población.



Figura IV.32. Proyecto Agroecológico “*Ecohuella*” (2022), distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea.



Figura IV.33. Proyecto Agroecológico “**Ecohuella**” (2022), distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea.



Figura IV.34. Proyecto Agroecológico “**Ecohuella**” (2022), distrito de Calca, región Cusco. El riego es por el sistema de goteo utilizando agua de fuente subterránea.



Figura IV.35. Riego por aspersión para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), Mashcas bajo, Chavín, Ancash 2022. El agua utilizada es de fuente subterránea.



Figura IV.36. Riego por aspersión para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*), Mashcas bajo, Chavín, Ancash 2022. El agua utilizada es de fuente subterránea.



Figura IV.37. Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavín, Ancash, 2022. Para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*).



Figura IV.38. Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavín, Ancash, 2022. Para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*).



Figura IV.39. Fuente de agua subterránea, centro poblado de Mashcas alto, Chavín, Ancash, 2022. Agua utilizada para el riego por aspersión en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*).

En consecuencia, el esparcido agrícola del lodo residual B estabilizado constituye uno de los principales sectores de valorización del lodo de depuración de aguas residuales domésticas, y es relevante darle al lodo de depuración una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo. Luego es necesario realizar gestiones para la construcción de nuevas estaciones de depuración de aguas residuales con la finalidad de conservar los ecosistemas lagunares, costeros, y los impactos negativos sobre la biodiversidad.

La relación carbono/nitrógeno define el grado de mineralización. Cuanto más bajo sea, más rápida será la mineralización.

La mineralización es la conversión de formas orgánicas a formas inorgánicas por intermedio de microorganismos. La mineralización del nitrógeno orgánico del suelo es el proceso microbiano por el cual las formas orgánicas de nitrógeno en los suelos son convertidas a formas inorgánicas (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-).

El valor de la relación carbono/nitrógeno baja indica que el grado de la mineralización es buena, y estimula la proliferación de microorganismos que

mineralizan la materia orgánica. La relación carbono/nitrógeno muestra el contenido de nitrógeno disponible para las plantas, valores altos implican que la materia orgánica se descompone lentamente, debido a que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno por lo que no puede ser utilizado por los vegetales.

La relación carbono/nitrógeno expresa las unidades de carbono por unidad de nitrógeno que contiene el lodo de depuración. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos, y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis de nutrientes, por lo que una buena relación de estos elementos favorecerá un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos.

Cuanto menor sea el valor de la relación carbono/nitrógeno, mayor será el grado de mineralización (liberación de nitrógeno orgánico, mediante su transformación en amonio) de la materia orgánica. Por lo tanto, la calidad edáfica del lodo de depuración será superior.

En la parte final del proceso de estabilización del lodo de depuración se prefiere tener una relación carbono/nitrógeno baja (Arrea et al. 2013).

La relación carbono/nitrógeno obtenido entre los valores de carbono orgánico total y nitrógeno total, proporciona información acerca de la estabilidad de lodo, en cuanto a su aplicación en suelos. Los lodos bien estabilizados suelen presentar relaciones carbono/nitrógeno alrededor de 10 y se podrían utilizar como abonos orgánicos nitrogenados. Por el contrario, los poco estabilizados presentan relaciones carbono/nitrógeno entre 15 a 20 y pueden ocasionar problemas de inmovilización del nitrógeno del suelo. Los valores para las relaciones de concentración de carbono/nitrógeno que se han obtenido en el estudio realizado en este trabajo oscilan entre 3 y 7, aunque la media está alrededor de 10.

La relación carbono/nitrógeno si es elevada disminuye la actividad biológica, así también los lodos tienen altos contenidos de nitrógeno con relaciones carbono/nitrógeno entre 5 y 11 (Marín, 2019).

El aporte de nitrógeno desde el suelo se realiza mediante microorganismos del suelo que utilizan la materia orgánica como fuente de energía, lo cual causa la mineralización del nitrógeno. Tal mineralización es fuente de nitrógeno para varios cultivos.

El nitrógeno se encuentra en distintas formas en el suelo, aunque es absorbido por las plantas y microorganismos como nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). El proceso de entrada de nitrógeno al suelo consiste en capturar nitrógeno del aire en forma de N_2 y transformarlo en (NO_3^-) o (NH_4^+).

El nitrógeno inorgánico se encuentra en los suelos principalmente como nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+).

En cuanto al contenido de materia orgánica, es más importante la velocidad y el equilibrio entre procesos de mineralización y humificación que está condicionado por la actividad microbiana en el suelo que el contenido total de esta. Para conocer la velocidad de proliferación de microorganismos y la rapidez con que la materia orgánica se mineraliza, se utiliza la relación entre el carbono orgánico y nitrógeno total (Fuentes, 1999).

El valor bajo de la relación carbono/nitrógeno expresa que el grado de la mineralización es buena, y estimula la proliferación de microorganismos que mineralizan la materia orgánica. Luego, se sugiere tener una relación carbono/nitrógeno baja.

Puede verse en las Figuras IV.40 y IV.41 dos variedades de especies de plantas en condiciones diferentes, el árbol de Huarango (*Acacia macracantha*) adherido a una superficie sólida (siendo el sustrato utilizado las rocas) y la orquídea (*Hesperoxiphion herrerae*) adherida en otra superficie (siendo el sustrato utilizado el suelo), en un sistema en equilibrio con la naturaleza relacionados con las leyes de la velocidad, que favorecen su buen desarrollo en sustratos muy distintos (las rocas y el suelo respectivamente). Asimismo, el sustrato es una base sobre la cual vive un organismo sésil. El suelo es el sustrato dominante del ambiente terrestre, el suelo sostiene a las plantas, les suministra minerales y agua, con estos materiales se realiza la fotosíntesis y la producción de moléculas orgánicas, de las que depende la vida humana y animal. El ecosistema debe conservarse y evitar su contaminación para no generar ningún impacto negativo en el medio ambiente. Para lo cual es necesario que se puedan solucionar las interacciones ecológicas debido a los cambios en el sistema físico y/o en el sistema biótico, y puedan favorecer a la agricultura en el sistema suelo-planta, así también a la minimización de la contaminación ambiental.



Figura IV.40. Chasquitambo, distrito de Colquioc, provincia Bolognesi. Ancash. En un sistema en equilibrio con la naturaleza se desarrolla favorablemente el Huarango (*Acacia macracantha*) sobre un cerro rocoso, modelado por la fuerza de los vientos predominantes.



Figura IV.41. Complejo arqueológico Pikillacta, región Cusco. En un sistema en equilibrio con la naturaleza se desarrolla favorablemente la Orquídea (*Hesperoxiphion herrerae*).

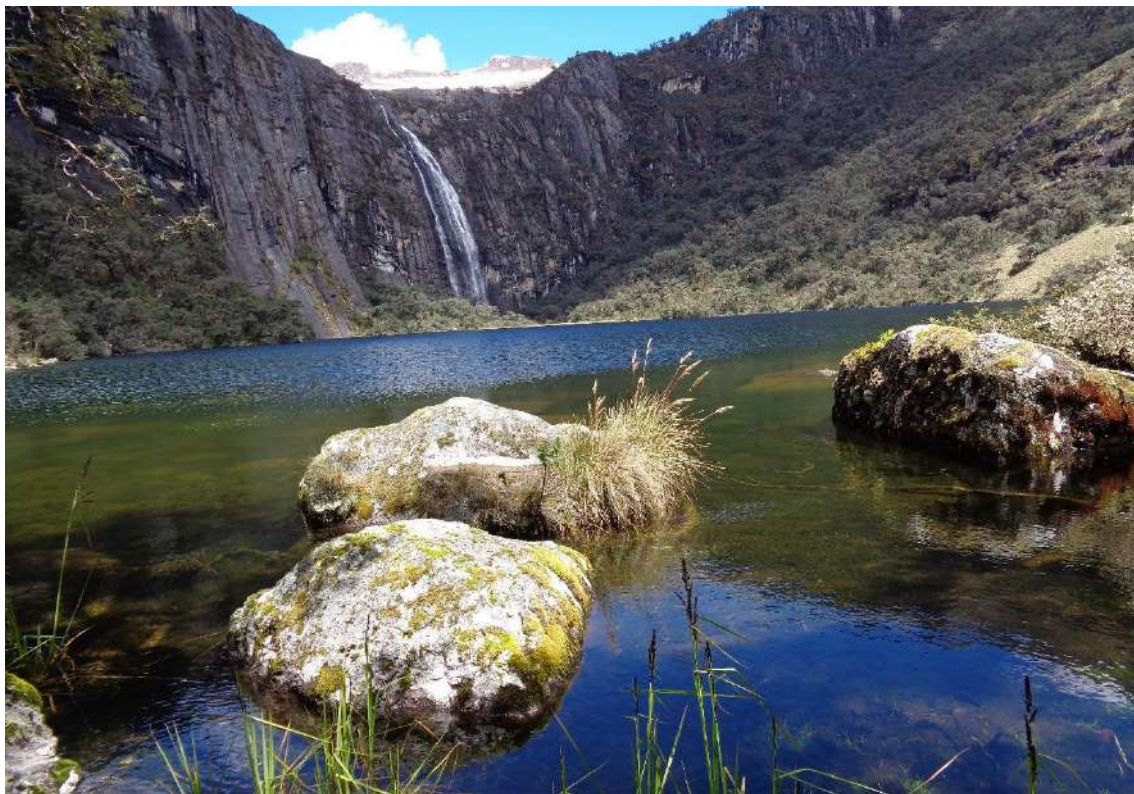


Figura IV.42. Laguna Hatun potrero, en Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.



Figura IV.43. Laguna Hatun potrero, en Carhuascancha, Huántar, Ancash. Se observó que el transporte molecular, para el flujo de cierta cantidad física transportada, se encuentra en estado de equilibrio con su alrededor.

Asimismo, se muestran en las Figuras IV.40, IV.41, IV.42, IV.43 y de igual forma en las siguientes Figuras IV.44 a IV.50 que en un sistema intragranular y extragranular de los lodos de depuración A y B, y en la naturaleza también se pueden verificar las leyes de la velocidad (modelos matemáticos definidos por Fick, Fourier y Newton). Leyes de la velocidad que pueden estar en equilibrio durante el estudio del proceso de la operación unitaria del secado convectivo de los lodos de depuración A y B en un sistema determinado, sistema formado por lodos residuales A y B y/o la naturaleza, y puedan causar efectos negativos durante la operación unitaria del proceso de secado convectivo de los lodos de depuración A y B, en la estabilización y valorización agrícola del lodo de depuración B y así también en el ecosistema.

En las Figuras IV.44 a IV.50 se muestran los lugares que se observaron durante la visita, actividades experimentales relacionados al tema desarrollado en este trabajo, que se realizó del 21 octubre al 01 noviembre de 2023 a la REFINERÍA de la Isla CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO (Figuras IV.44 a IV.48).

Así también, la visita que se realizó a la UNIVERSIDAD DE CURAÇAO, 111 Jan Noorduynweg, Willemstad, Isla de CURAÇAO (Figuras IV. 49 y IV. 50). Lugares donde las leyes de la velocidad no han estado en equilibrio con la naturaleza, como efecto de ese desequilibrio ambiental se observó entre el 21 de octubre al 01 de noviembre de 2023 en la Isla de CURAÇAO y en la isla de BONAIRE, lluvias continuas durante el periodo de tiempo observado.

Por lo tanto en este trabajo de investigación realizado para darles una destinación final de valorización agrícola a los lodos de depuración A y B se relacionan con las leyes de la velocidad y el equilibrio que existe con la naturaleza, equilibrio que se presentan en un sistema formado por los lodos residuales A y B y/o un sistema formado por la naturaleza, las leyes de la velocidad y el equilibrio con la naturaleza se observaron para las principales variables externas (la temperatura, la velocidad superficial y la humedad del aire) en el proceso de la operación unitaria del secado convectivo de los lodos de depuración A y B, y también se observan en la naturaleza y sus efectos en el medio ambiente.



Figura IV.44. Vista de la refinería de CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.45. Vista de la refinería de CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.46. Vista de la refinería de CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.47. Vista de la refinería de CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.48. Vista de la refinería de CURAÇAO, refinería de petróleo en WILLEMSTAD, capital de CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.49. Vista de la UNIVERSIDAD de CURAÇAO, 111 Jan Noorduyweg, WILLEMSTAD, CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.



Figura IV.50. Vista de la UNIVERSIDAD de CURAÇAO, 111 Jan Noorduyweg, WILLEMSTAD, CURAÇAO. Lugares donde las leyes de la velocidad no estaban en equilibrio con la naturaleza.

Según los resultados obtenidos para el tratamiento de la estabilización del lodo de depuración B de aguas residuales domésticas, que también implica la mineralización de la materia orgánica con una relación de carbono/nitrógeno baja, esta relación nos da el contenido de nitrógeno disponible para las plantas, indicándonos que el grado de mineralización es buena, y estimula la proliferación de microorganismos que mineralizan la materia orgánica. En consecuencia, de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación han permitido confirmar que el lodo de depuración B ha sido estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola para el esparcido agrícola, de tal forma utilizarlo en el acondicionamiento del suelo y aprovechar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental, así también están relacionados con las leyes de la velocidad, durante el proceso de la operación unitaria del secado convectivo, entre los lodos residuales A y B y el equilibrio que se pueda dar con la naturaleza. Leyes de la velocidad que

pueden estar en equilibrio durante el proceso de la operación unitaria del secado por convección de un fluido en movimiento paralelo sobre una superficie de intercambio, de los lodos de depuración A y B, para el flujo de cierta cantidad física transportada en un sistema determinado, sistema formado por lodos residuales A y B y/o la naturaleza.

La vida de todo organismo vivo está unida con el ambiente, medio externo. El metabolismo es la absorción de materiales del ambiente y la generación de materiales hacia el ambiente. La reproducción produce el aumento de materia viva en el ambiente, lo que implica a tomar acciones con respecto a los cambios que ocurren en el ambiente. La evolución es el desarrollo de adaptaciones en respuesta a los cambios en el ambiente, cuando lo permita las condiciones ambientales, que las leyes de la velocidad estén en equilibrio con la naturaleza y con los lodos residuales A y B.

Las actividades de los seres vivos pueden tener influencia y alterar el ambiente. Se estima que el oxígeno, que representa un quinto de la atmosfera, está presente en la atmosfera debido a los procesos de fotosíntesis de los protistas y de las plantas, luego los factores físicos (clima, medio fluido, sustrato, temperatura, la luz, etc.) y bióticos están relacionados entre sí. La retención de los iones calcio y otros iones en la superficie facilita tener relaciones de concentración de potencial de hidrógeno, pH, del suelo cerca de la neutralidad y que la fertilidad del suelo sea elevada.

La luz es uno de los factores más importantes que influyen en la vida de los organismos vivos. Gran parte de la energía del sol llega a la tierra en forma de luz y al transformarse en calor aporta en regular la naturaleza del bioma. La luz es necesaria para la fotosíntesis y todos los animales dependen en cuanto a su alimentación del proceso de la fotosíntesis de las plantas y los protistas.

La vida depende de nutrientes inorgánicos de los elementos carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y fósforo, también de pequeñas cantidades de otros elementos minerales en forma de iones presentes en animales y plantas. El calcio, potasio, sodio, cloro, fosfato y bicarbonato están presentes en los animales en cantidades grandes. Las plantas necesitan cantidades grandes de

nitrato (NO_3^-) con la finalidad de producir los aminoácidos y luego, a partir de ellos, las proteínas.

Los seres vivos a medida que metabolizan o se descomponen después de muertos, retornan los elementos esenciales al medio. La vida continúa debido a la utilización y reutilización de los nutrientes inorgánicos, como parte de ciclos sucesivos de transformaciones de materiales.

Así también la modificación humana del ciclo del oxígeno y del ciclo del nitrógeno puede afectar al sistema del medio ambiente y la salud humana. El componente esencial de la vida son las proteínas, que contienen nitrógeno. La atmósfera contiene 79% de nitrógeno, el problema consiste en fijar este elemento en compuestos utilizables en la síntesis de proteínas. Ciertas bacterias que crecen en las raíces de las leguminosas (frijoles, trébol, soja, alfalfa, etc.) pueden fijar el nitrógeno libre de la atmósfera en moléculas orgánicas para uso propio de la planta. Las leguminosas son especies que ayudan a la fertilidad del suelo, debido a que el nitrógeno después se integra al suelo.

La disponibilidad puede afectar la velocidad de los procesos del ecosistema. Las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, el incremento del parque automotor, los procesos industriales, lodos de depuración generados durante los tratamientos de aguas residuales que no reciben tratamiento de estabilización para darle una destinación de valorización agrícola, el uso de fertilizantes nitrogenados artificiales y la liberación de nitrógeno en las aguas residuales alteran el ciclo del nitrógeno, la modificación del ciclo del nitrógeno puede afectar al ecosistema que causaría impactos negativos en el medio ambiente.

Por lo tanto es necesario darle una destinación final de valorización agrícola al lodo de depuración B generado en la estación de depuración de aguas residuales San Antonio de Carapongo en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental, y con el uso del lodo residual B estabilizado (se agrega el lodo residual B estabilizado al suelo para utilizar sus valores fertilizantes con la finalidad de mantener la productividad) se pueda restituir los minerales extraídos durante la práctica de la agricultura intensiva con el fin de mantener los ciclos naturales de los nutrientes inorgánicos asegurando el bienestar de las generaciones futuras de organismos vivos.

Cuando se utiliza el lodo de depuración B estabilizado como fertilizante, se acelera y uniformiza una etapa natural del ciclo de los minerales extraídos, nutrientes inorgánicos. Los compuestos que contienen átomos de fósforo y potasio varían de una mezcla a otra, y por convención, la concentración de estos elementos se expresa en forma de óxido P_2O_5 y K_2O , respectivamente, expresiones que se indican en los resultados obtenidos en este trabajo.

Para que sea posible el desarrollo de los ciclos naturales mencionados es necesario la presencia del agua. Todo organismo vivo está rodeado por un medio fluido, aire o agua, siendo el agua el primer constituyente de todos los seres vivos. Se considera al agua como el medio de la vida, el agua es una sustancia muy importante que debe ser conservada para el mantenimiento de la vida y la evolución de todo organismo vivo. De acuerdo al trabajo realizado, una manera para la conservación del agua es mediante los tratamientos biológicos de aguas residuales, procesos realizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, obteniéndose como producto el agua depurada que puede ser utilizada para el riego de áreas verdes públicas y también como agua de proceso para la industria, de esa manera se pueda utilizar exclusivamente el agua potable en beneficio del consumo de la población.

El subproducto generado del tratamiento de las aguas residuales es el lodo de depuración, que debe ser estabilizado para darle una destinación final de valorización agrícola que es el objetivo de este trabajo realizado.

CONCLUSIONES

- Los resultados de la estabilización presentan valores permisibles con ratios de concentración de estabilización, ≤ 0.6 , para el lodo residual B. Asimismo, según los parámetros de toxicidad química para lodos residuales, presentan valores permisibles especificados en las normas ambientales para lodos de depuración. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo han permitido confirmar que el lodo B ha sido estabilizado. Los resultados obtenidos para el lodo residual B, después de ser estabilizado, muestran concentraciones permisibles de metales pesados según normas ambientales y no presentan riesgos de contaminación para el suelo.

Luego, se le puede dar una destinación final de valorización agrícola al lodo residual B. El lodo B ha sido estabilizado y será un producto apropiado para el esparcido agrícola en el acondicionamiento del suelo para mejorar su fertilidad y productividad.

- En este trabajo se han obtenido relaciones de concentraciones para componentes del lodo B estabilizado, valores fertilizantes con concentraciones de nutrientes agrícolas, los lodos A y B pueden ser una fuente de nutrientes para uso agrícola y favorecer la nutrición mineral en el sistema suelo-planta. Siendo el lodo B estabilizado apropiado para el esparcido agrícola, se utilizó como sustrato para la siembra de semillas, en el acondicionamiento del suelo para mejorar su productividad y fertilidad. Asimismo, según resultados obtenidos en este trabajo han permitido confirmar que el lodo B estabilizado contienen componentes valiosos, como nutrientes agrícolas, materia orgánica y carbono orgánico en beneficio de la agricultura para el sistema suelo-planta y del medio ambiente.

En consecuencia, se concluye que el lodo B debe estar estabilizado para que pueda ser utilizado en el acondicionamiento del suelo, esparcido agrícola del lodo B, y comprobar que está exento de riesgos de contaminación y ser ambientalmente segura. Por lo tanto, según los resultados obtenidos en este

trabajo para los lodos A y B han permitido confirmar que el lodo B ha sido estabilizado, presentan concentraciones permisibles de metales pesados según las normas ambientales, y permiten darle al lodo B estabilizado una destinación final de valorización agrícola para ser utilizado en el acondicionamiento del suelo en beneficio de la agricultura y del medio ambiente.

Los resultados obtenidos en este trabajo para el lodo B estabilizado muestran concentraciones de nutrientes para uso agrícola, como el Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Cromo, Zinc, Cobre, Sodio, Hierro, Manganeso, Boro, así también el lodo B estabilizado tienen, utilizado en la siembra experimental de diferentes tipos de semillas, concentraciones permisibles de metales pesados según las normas ambientales.

En consecuencia, el esparcido agrícola al suelo del lodo B estabilizado, utilizado como sustrato para cultivos agrícolas, en el acondicionamiento del suelo aportan valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y de la minimización de la contaminación ambiental.

- Se utilizó el lodo B estabilizado en el esparcido agrícola del suelo, para la siembra de semillas de Lino (*Linum usitatissimum*) y Lenteja (*Lens culinaris*), así también para la siembra de semillas de Maíz Morado (*Zea mays*), Maíz Amarillo (*Zea mays*), Soya (*Glycine max*), Numia (*Phaseolus vulgaris*), y Frijol Canario (*Phaseolus Vulgaris*), observándose una buena germinación, crecimiento y desarrollo muy favorables de las diferentes semillas sembradas utilizando como sustrato el lodo B estabilizado.

Luego, el esparcido agrícola del lodo B estabilizado tiene un efecto positivo en la siembra de semillas, minimiza los riesgos ambientales y favorece la fertilidad del suelo. Por consiguiente, la valorización agrícola del lodo B estabilizado, es una de las mejores opciones ambientales para ser utilizado en el esparcido agrícola, acondicionamiento del suelo, y utilizar sus valores fertilizantes en beneficio de la agricultura y del medio ambiente. Asimismo, las leyes de la velocidad (modelos matemáticos definidas por Fick, Fourier y Newton), flujo de cierta cantidad física transportada, se pueden aplicar y verificar que están en equilibrio con la naturaleza y ningún impacto significativo debido a la contaminación ambiental han sido observados.

- Las características problemáticas presentes en los lodos A y B, como el contenido de la fracción orgánica del lodo, la temperatura, la velocidad superficial y la humedad del aire influyen durante el proceso de la operación unitaria del secado convectivo y la estabilización del lodo B necesarios para su valorización agrícola en el acondicionamiento del suelo. Por lo tanto, la operación de secado agregando masas crecientes de sustancia alcalina es fundamental para la estabilización del lodo B.

Asimismo, el secado convectivo de los lodos A y B nos permitió obtener ratios de concentración de estabilización para los lodos de depuración A y B, y darle al lodo B estabilizado una destinación final de valorización agrícola.

La influencia de las condiciones externas de operación durante el proceso de secado convectivo y la estabilización del lodo B, necesarios para su valorización agrícola, puede ser cuantificada aplicando una regresión multilineal entre el flujo constante de secado convectivo del lodo B, periodo de flujo másico constante, y las variables de operación. La temperatura del aire es la que más influye en la concentración del flujo constante de secado convectivo del lodo B durante el periodo de flujo másico constante, seguida de la velocidad superficial del aire y la humedad del aire. Las variables presentes durante el proceso de la operación unitaria del secado convectivo de los lodos A y B afectan a la velocidad de secado y la valorización agrícola del lodo B en el periodo de flujo másico de secado constante, en este periodo se elimina la mayor cantidad de humedad del lodo B. Luego se puede afirmar que la velocidad de secado convectivo del lodo B varía en proporción directa con la velocidad superficial y la temperatura del aire.

RECOMENDACIONES

- Los vertidos de aguas residuales sin tratamiento originan impactos negativos sobre el ecosistema, se podrían minimizar mejorando los procesos industriales y mediante tratamientos de aguas residuales, y al lodo de depuración generado, lodos A y B, darles una destinación final de valorización agrícola para beneficio de la agricultura y del medio ambiente. Así también es importante la construcción de estaciones de depuración de aguas residuales con la finalidad de minimizar la contaminación ambiental.

- La identificación de una solución adecuada para la destinación final de los lodos A y B generado en el tratamiento de aguas residuales domésticas es un tema estratégico. La cantidad de lodos producidos aumentó en los últimos años, y puede ser considerado como un sustrato importante para su uso y valorización agrícola del lodo B.

- El horizonte que se avizora en el futuro debido a que el hombre tiene una dependencia de los recursos renovables, es necesario que hagamos todo lo posible para evitar la disminución de la eficiencia del proceso de transformación de la energía solar en materiales renovables. El suelo y su fertilidad deben ser conservados (para tal fin se pueden utilizar lodos residuales B estabilizados). El agua, sustancia inorgánica, debe conservarse y evitar su contaminación (impactos negativos causadas por el vertido de aguas residuales sin tratamiento). Para estas actividades tienen que participar profesionales, que puedan solucionar las relaciones ecológicas a las variaciones en el sistema físico y/o en el sistema biótico. Así también serán necesarios la participación de hombres de industria para utilizar los conocimientos obtenidos de la ciencia ecológica, y difundir la importancia de la valorización agrícola de lodos de depuración A y B. El hombre utilizara el ambiente, pero sin destruirlo.

La existencia de un desequilibrio ecológico tiene el efecto de alterar el bienestar físico y espiritual y compromete la vida de las generaciones futuras. Además, arriesga el futuro de otros seres vivos que integran con el hombre el planeta.

Por lo tanto, para minimizar la contaminación causada por el vertido de aguas residuales sin tratamiento, es necesario la construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales con el propósito de minimizar la contaminación ambiental y darles una destinación final de valorización agrícola a los lodos de depuración generados durante los tratamientos de aguas residuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aguirre Ode, Fernando (1970) *Termodinámica del equilibrio*. Editores Interamericana. Valparaíso, Chile.

Aguado Alonso, José., Calles Martin, José Antonio., Cañizares Cañizares, Pablo., López Pérez, Baldomero., Rodríguez Somolimos, Francisco., Santos López, Aurora., Serrano Granados, David Pedro (1999). *Ingeniería de la industria alimentaria*, Vol. I, Editorial Síntesis, S.A, Madrid-España, pp. 119-165, 173-190.

AIDE (2011). Declaración medio ambiental, Tabla de materias, asociación intercomunal de estaciones de depuración de aguas residuales, Liege. Belgica.

ASAE, ASAE Standard (1996) D245.5 *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan.

Apesa (2000) "*Eléments bibliographiques*," *Actes du Colloque les Boues. Quels enjeux ? Quelles Solutions ?* Pau, France, 23-24 Février, 2000.

Arrea G., Calvo N., García D., y Hernando J. (s.f.) (2013) "Relación carbono/nitrógeno en un suelo".
disponible en <[af2.wikispaces.com/file/view/Relación C.N.doc](http://af2.wikispaces.com/file/view/Relación+C.N.doc)>.

Agence Nationale pour la récupération et l'élimination des déchets. *La valorisation agricole des boues de stations d'épurations urbaines*, Les transformeurs, Bernard Lajouanie Service de l'information et de la communication, ed., (1988).

Antonini, G (2000). *Les procédés de valorisation thermique des boues*, Actes du colloque les Boues. Quels enjeux? Quelles solutions? Pau, France, 23-24 février, 2000.

APHA, AWWA, et WPCF (1985) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association: Washington DC.

Badger, Walter L., Banchemo, Julius T (1986). *Introducción a la Ingeniería Química*, libros Mc Graw Hill, México S.A de C.V.

Balzhiser, Richard E., Samuels, Michael R., Eliassen, John D (1985). *Termodinámica Química para Ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A. Impreso en México. Traducción y adaptación: Juan L. Hernandez Sanchez.

Ben-Aïm, R (2000) "*Qu'est-ce qu'une boue ? D'où viennent les boues ?*" Actes du colloque les Boues. Quels enjeux ? Quelles solutions ? Pau, France, 23-24 Février, 2000.

Benitez, J (2009). *Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations*. Wiley Interscience.

Bongiovanni, J.-M (1998) *Traitement des boues résiduelles par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique*, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Bogdanis, E (2001) *Modélisation des transports de chaleur et de matière lors du séchage d'un milieu élastique ou viscoélastique. Résolution par des méthodes aux éléments finis.*, Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour.

Brennan J.G, J.R., Butters, N.D., Cowell, N.D., Lilley, A.E.V (1998), *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*, 3ra edición, editorial Acribia S.A, Zaragoza-España, pp 673-684, 377-411.

Brinker, C. J., et Scherer, G (1990) *Sol-Gel Science. The physics and chemistry of sol-gel processing*, Academic Press, Inc. San Diego.

Brown, T.L., Le May, H., Eugene Jr., B.E. Bursten (2004). "*Química: La Ciencia Central*". Novena Edition. Editorial Prentice Hall Hispanoamérica, S.A., México.

Bunge, M. (1980). *Epistemología, curso de actualización*. Siglo XXI Editores

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. S., et Teller, E (1940) *"On a theory of the van der Waals adsorption of gases,"* J. Am. Chem. Soc., 62, 1723-1732.

Brunauer, S., Emmet, P. H., et Teller, E (1938) *"Adsorption of gases in multimolecular layers,"* J. Am. Chem. Soc., 60, 309-319.

Canziani, C., Spinosa, L. (2019). *Lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.* ScienceDirect, 94, 3-30.

Cerne, M., Palčić, I., Pasković, I., Major, N., Romic, M., Filipović, V., Dianalgrc, M., Percin, A., Goreta Ban, S., Zorko, B., Vodenik, B., Glavic Cindro, D., Milacic, R., JohnHeath, D., Ban, B. (2019). *El efecto de la estabilización en la utilización de lodos de aguas residuales municipales como enmienda del suelo.* Science Direct, 94, 1 Julio 2019, 27-38.

Coulson JM, Richardson JF, Backhurst JR, Marker JH (1999). *Chemical Engineering. Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer.* Sixth edition ed: Butterworth- Heinemann.

Coumans, W. J (2000) *"Models for drying kinetics based on drying curves of slabs,"* Chem. Eng. Process., 39, 53-68.

Cruz Quijada, Luz Graciela (2015). Tesis doctoral: *Optimización de la aplicación de lodos de depuración de aguas residuales al abonado o mejora de suelos.* Universidad Politécnica de Madrid, España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación.

Crine, M, (2004), *Aspectos Energéticos de las Operaciones Físicas Unitarias: El Secado.* Professeur à L'ULG, Liege, Belgica: Cours Chim 0056 -1.

Chambe, M (2000) *"La thermolyse appliquée aux boues,"* Actes du Colloque les Boues. Quels Enjeux ? Quelles Solutions ? Pau, France, 23-24 Février, 2000.

Chung, D. S., et Pfoest, H. B (1967) *"Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products,"* Trans. ASAE, 10, 552-575.

Climate System Analysis Group-CSAG (2017). University of Cape Town, Universidad del cabo, Sudáfrica Environmental & Geographical Science Bldg, South Ln, Rondebosch, Cape Town, 7700, Sudáfrica.

The Climate System Analysis Group at the University of Cape Town is a unique research group within Africa.

D.S. N° 003-2010-MINAM; D.S. N° 015-2017-Vivienda para lodos de PTAR; Resolución ministerial N° 128-2017-Vivienda.

NORMA: D.S. N° 003-2010-MINAM

Descripción: Definición de los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales.

NORMA: Resolución ministerial N° 128-2017-VIVIENDA

Descripción: Condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final.

De Wit, Rutger (2008) *“El buen y el mal uso de los espacios marítimos: El ejemplo del mar Mediterráneo”*. Las Universidades de Montpellier 1 y 2, Francia, el polo universitario europeo de Montpellier y del Languedoc-Roussillon.

Ministerio de Educación Nacional, Enseñanza Superior e Investigación. Universidad Europea de Verano.

Director de investigación CNRS. Universidad de Montpellier II, Francia. Universidad de verano 2008 à Sète. Montpellier, Francia.

Estación mediterránea del medio ambiente costero (SMEL) de Sète.

Conferencia:

La investigación francesa en el medio ambiente costero, el ejemplo del proyecto PNEC lagunas del mar Mediterráneo. Las lagunas costeras-un entorno sensible a la naturaleza y la acción humana.

Degrémont (1989) *Mémento technique de l'eau*, Lavoisier. Technique et documentation : Paris, Francia.

Domínguez, Xorge Alejandro (1966) *Teoría, Ejercicios y Problemas de Química*, 279 páginas. Series cultural, publicaciones cultural S.A. Primera edición, México.

Profesor de Química y jefe del Departamento de Química en la Escuela de Ciencias del Instituto Tecnológico y de Estudios superiores en Monterrey, México.

Ferrasse, J.-H., Arlabosse, P., et Lecomte, D (2002) "*Heat, momentum, and mass transfer measurements in indirect agitated sludge dryer,*" Drying Technol., 20, 749-769.

Ferrer Polo, José., Seco Torrecillas, Aurora., Robles Martínez, Angel (2018). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*, tercera edición. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia, España.

Foust Alan S., Wenzel Leonard A., Clump Curtis W., Maus Louis. Andersen L, Bryce (1970). *Principios de Operaciones Unitarias*, Cuarta impresión, CECSA.

Fuentes, J. L. (1999). *El suelo y los fertilizantes*. Quinta ed. Madrid, España. Mundi-prensa.352 p.

Geankopolis, C. J (1993) *Transport processes and unit operations*, Prentice Hall: Englewood Cliffs, New Jersey.

Geankopolis, J (1982) texto: *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, Ed. CECSA, Mexico.

Gross, T. S. C., "*Thermal drying of sewage sludge,*" J. IWEM, 7, 255-261 (1993).

González Granados, Inmaculada Concepción (2015). Tesis doctoral: *Generación, Caracterización y Tratamiento de lodos de EDAR*. Universidad de Córdoba, España. Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química.

Halsey, G (1948) "*Physical adsorption on non-uniform surfaces,*" J. Chem. Phys., 16, 931.

Harkins, W., et Jura, G (1944) "*Surfaces of solids. XIII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the areas occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid,*" J. Am. Chem. Soc., 66, 1366.

Henderson, S. M (1952) "*A basic concept of equilibrium moisture*," Agric. Eng., 33, 29-32.

Hernandez Herrera, Jose Maria (2004). Tesis doctoral: *Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efecto en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero (sorghum vulgare pers.)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Facultad de agronomía, subdirección de estudios de postgrado.

Himmelblau David M., (1977). *Principios y cálculos básicos de la Ingeniería Química*, primera edición, compañía editorial continental S.A, México, páginas 286-318.

Holman J.P, (1998). *Transferencia de calor*, octava edición, McGraw-Hill, España, pp. 1-13, 423-431.

Hougen O.A., Watson, K.M., Ragatz, R.A (1964). *Principios de los procesos químicos, parte II Termodinámica*, editorial Reverte S.A, México, pp. 22-52.

Ibarz,A., V.Barbosa-Canovas, G (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. (pp.65-83, 583-602). Ediciones Mundi-Prensa. España.

Incropera, Frank P., De Witt, David P (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. School of Mechanical Engineering Purdue University. Cuarta edición, Prentice Hall, impreso en México, 1999.

Janssens, O., Sevar Entsorgungsanlagen, Communication personnelle (1998).

Kern Donald Q. (1986). *Procesos de transferencia de calor*, decimonovena impresión, McGraw-Hill, Book Company INC. New York, compañía editorial continental, S.A, de C.V, Calz. De Tlalpan, num. 4620, Mexico 22, D.F, pp. 13-153, 397, 646, 698, 701.

Ketelaars, A. A. J., Jomaa, W., Puiggali, J. R., et Coumans, W. J (1992) *Drying shrinkage and stresses*. Dans: Elsevier Science Publishers:1992.

Kerlinger, Fred, (2002). *Investigación del comportamiento*, México: McGraw-Hill/Interamericana. 2002., 810 p.: 25 cm. Edición; 4a ed.

Kreith Frank., Manglik Raj M., Bohn Mark S (2012). *Transferencia de Calor*, Col. Cruz Manca, Santa fe, México: séptima edición, Cengage Learning Editores, SA de CV, impreso en México, pp. 2-51, 70-150, 230-282, 540-614.

Krischer, O., et Kast, W (1978) *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Springer: Berlin, Alemania.

Kuhn, I (1967) "*Generalized potential theory of adsorption*," J. Colloid Sci., 23, 563.

Langmuir, I (1918). "*The adsorption of gases on plane surfaces of glass*," J. Am. Chem. Soc., 40, 1361-1402.

Las EPS y su desarrollo 2013, Datos 2012, Gerencia de Supervisión y Fiscalización, SUNASS. Las EPS y su desarrollo 2012, Gerencia de Supervisión y Fiscalización, SUNASS Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población Departamental, por años calendario y Edades Simples 1995-2025, Boletín especial No 22, INEI, noviembre 2010.

Lecloux, A.J (1981). *Texture of catalysts. Dans: Catalysis: Science and Technology*. vol.2, Anderson, J.R et Boudart, M., eds.: Springer: Berlin: pp.171.

León,G (2018). *¿Llegaremos al "Día Cero" en Lima?*. Revista del CIP-CD Lima 2018: El Ingeniero de Lima, (84),34-36.

Levenspiel O (1993). *Flujo de Fluidos e intercambio de Calor*, Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas-México. Editorial reverté S.A.

Lewis, W. K (1921) "*The rate of drying of solid materials*," The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13, 427-438.

Lotito, V., Mininni, G., et Spinosa, L (1990). "*Models of sewage sludge conditioning*," Wat. Sc. Tech., 22, 163-172.

Luikov, A. V (1996) *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, Pergamon Press, Oxford.

Luikov, A. V (1975). "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillaryporous bodies," Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1-14.

McCabe Warren, Smith Julian C. (1972). *Operaciones básicas de Ingeniería Química*, volumen II, Editorial Reverte, S.A, McGraw-Hill, pp. 340-347, 650-658, 997-1004.

Maskan, M., et Göğus, F (1997) "The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste," J. Food Eng., 33, 227-237.

Marín,D. (2019) *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del Municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante órgano-mineral* (Universidad de América).

Meneses Solis T, Cabrera Carranza C. (2022) *Importancia de la estabilización de lodos residuales para su valorización agrícola en el acondicionamiento del suelo*. En revista del instituto de investigación FIGMMG. Vol.25, N°49, 2022. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, UNMSM, Lima, Perú.

Miranda, M. (2014). Relima, *Octavo encuentro técnico Interamericano de alto nivel*, Trujillo. Perú.

Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Ministerio del Ambiente. (MINAM, 2010). Definición de los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas o municipales, Resolución ministerial N° 128-2017-VIVIENDA.

Municipalidad de Santiago de Surco. Vences, A. (2016). *Planta de tratamiento y recuperación de las aguas del río Surco*.

Murcia Navarro Francisco José (2013). Tesis doctoral: *Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola*. Universidad de Murcia, España. Departamento de química agrícola, geología y edafología.

Ocon, Joaquín., Tojo, Gabriel (1982). *Problemas de Ingeniería Química*, tomos I-II, pp 68-150, 240-310, 3ra edición, Madrid, España.

Oswin, G. R (1946) "*The kinetics of package life*," Int. Chem. Ind., 65, 419.

Organismo de evaluación y fiscalización ambiental (OEFA, 2014). *Aguas residuales*.

Pérez Zúñiga, María Elena (2016). Tesis: *Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb)*. Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Ecuador. Carrera de Ingeniería Ambiental.

Perré, P., et Degiovanni, A (1990) "*Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et haute température*," Int. J. Heat Mass Transfer, 33, 2463-2478.

Perré, P., et Turner, I (1999) "*A 3D version of Transpore : A comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*," Int. J. Heat Mass Transfer, 42, 4501-4521.

Perry, Robert H (1973). *Manual del Ingeniero Químico*. Quinta edición (segunda edición en español). Volumen I, II, III. Mc Graw-Hill, Inc, U.S.A. Preparado por un grupo de especialistas: Robert H, Perry (consultor)., Cecil H, Chilton (asesor). Principal del Battelle Memorial Institute, impreso en la editorial tipográfica de México, S.A. de C.V, calle 3 número 9 Naucalpan. Edo, de México.

Perry, Robert H (1974). *Manual del Ingeniero Químico*. Quinta edición (segunda edición en español). Volumen I, II, III. Editorial Mc Graw-Hill, Inc, impreso en México.

Perry, Robert H., Cecil H, Chilton (1973). *Chemical Engineers' Handbook*. Fifth Edition, Copyright 1973, 1963 by Mc Graw-Hill, Inc.

Perry, Robert H (1980). *Manual del Ingeniero Químico*. Tomos I, II, III. Editado por la unión tipográfica. Editorial hispano americana de México, D.F. Av Universidad 767, impreso en los talleres de programas educativos, S.A. Calz. Chabacano 65.A, México, DF.

Perry, Robert H (1982). *Manual del Ingeniero Químico*. Quinta edición (segunda edición en español). Editorial Volumen I, II, III, IV. Editorial Mc Graw-Hill latinoamericano, S.A. Bogotá, Colombia

Perry, Robert H (1992). *Manual del Ingeniero Químico*, sexta edición, editorial Mc Graw Hill, education.

Petrucci, R.H., Harwood, W.S., y Herring, F.G (2002). *Química General*. Octava Edición. Editorial Prentice Hall, Madrid.

Prodiagro S.A. Control Unión Perú SAC. Member of Control, World Group. CU 816678. Aprobado para agricultura orgánica, Input: EU2092/91 Certified by Control Unión Certifications.

Proyecto Agroecológico "Ecohuella" (2022). Visita realizada en el lugar del proyecto, abril 2022, Escuela Campesina Agroecológica, comunidad campesina de **Soclo**, Provincia y Distrito de **Calca**, región **Cusco**. Responsable del proyecto: Yesica Nina Cusiyupanqui.

Ratti, C (1994) "*Shrinkage during drying of foodstuffs*," J. Food Eng., 23, 101-105

Reyes Lázaro, Wilson (2008). Tesis doctoral: *Mejoramiento de suelos arenosos del sector Santo Domingo del valle Santa Catalina mediante el uso de lodo residual municipal estabilizado*. Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Postgrado, Programa de Doctorado en Medio Ambiente.

Rorat,A., Courtois, P., Vanden bulcke,F., Lemiere,S.(2019). *Aspectos sanitarios y ambientales de la gestión de lodos de depuradora*. ScienceDirect. 2019, pages 155-180.

Rolf, E., et Halde (1979) "*Sewage sludge characterization by vacuum drying*," Filtr. Separat., May/June, 238-242.

Ruiz, María Cristina (1995). *Lixiviación de sulfuros*. Universidad de Concepción. Facultad de ingeniería, iit. Concepción. Chile.

Seader. J.D., Henley, E., y Roper, D.K. (2010). *Separation Process Principles*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

Semishin V (1967). *Prácticas de Química General, Inorgánica*. Editorial MIR, Moscú. Traducido del ruso por K. Steinberg. Impreso en la URSS

Sibony,J. (1997). *Tratar y Valorizar los Lodos*. Infinités Communication : Rennemoulin, Francia, Colección OTV.

Smith, J.M. (1973). *Ingeniería de la Cinética Química*. Quinta impresión en español. Edición autorizada por: McGraw-Hill Book Company, Inc. Compañía Editorial Continental, S.A. Calz. De Tlalpan núm. 4620, México 22, D.F.

Smith, S. E (1947) "*Sorption of water vapor by proteins and high polymers*," J. Am. Chem. Soc., 69, 646.

Sharma, Shri K., Mulvaney, Steven., J.;Rizvi, Syed S.H. (2007). *Ingeniería de alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México, Limusa Wiley.

Sherwood, T. K. (1929) "*The drying of solids-I*," Ind. Eng. Chem., 21, 12-16.

Sherwood, T. K (1936) "*The air drying of solids*," Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 32, 150-168.

Servicio de agua potable y alcantarillado de Lima. (SEDAPAL 2014) Tratamiento de aguas residuales.

Estudio de Opciones de Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales en Lima metropolitana, Ing. Julio Cesar Moscoso Cavallini, University of Stugart, Lima Water-Lima. Portal institucional de SEDAPAL.

Sibony, J. (1997). *Traiter et Valoriser les Boues*. Francia: Collection OTV

Superintendencia nacional de servicios de saneamiento (SUNASS 2015) Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicio de saneamiento. SUNASS, setiembre 2015.

Smollen, M (1990) *"Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction,"* Wat. Sc. Tech., 22, 153-161.

Surh, P (2002) *"Incineration combinée des boues d'épuration et des ordures ménagères : une filière qui séduit,"* L'eau, l'industrie et les nuisances, 209, 34-36.

Suzuki, M., et Maeda, S (1968) *"On the mechanism of drying of granular beds, mass transfer from discontinuous source,"* J. Chem. Eng. Jpn., 1, 26-31.

Tellings Claude y Goffinet Alain (2011). *Política Ambiental*.

Treybal Robert E. (1981). *Operaciones de Transferencia de Masa*, segunda edición, McGraw-Hill 1981, impreso en México., pp 23-665, 623-783.

Tsang, K. R., et Vesilind, P. A (1990) *"Moisture distribution in sludges,"* Wat. Sc. Tech., 22, 135-142.

Vanderschuren, J (2000) *"Les principes fondamentaux du séchage,"* Le séchage : État de la question, SRBII, Comité valorisation & Technologie des Solides, 30 mars 2000.

Vesilind, P. A., et Martel, C. J (1989) *"Freezing of water and wastewater sludges,"* J. Environ. Eng. -ASCE, 116, 854-861.

Walkley, A., I.A. Black (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents*. Soil Sci. 63:251-263.

Whitaker, S (1977) *Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying*. Dans: Advances in Drying, HPC: New York; Vol.1, pp.23 -61.

ANEXOS

Anexo I: Propiedades del aire húmedo

Presión de vapor saturado (Pa)

Si $T_a > 45^\circ\text{C}$

$$P_e^{sat} = \exp\left(23.1964 - \frac{3816.44}{T_a + 227.05}\right)$$

Si $0 < T_a < 45^\circ\text{C}$

$$P_e^{sat} = \exp\left(23.3265 - \frac{3802.7}{T_a + 273.18} - \left(\frac{472.68}{T_a + 273.18}\right)^2\right)$$

Volumen húmedo (m^3/kg aire seco)

$$v_{hum} = \frac{(461.5 \cdot Y + 287.1) \cdot (T_a + 273.15)}{P_{atm}}$$

Densidad (kg/m^3)

$$\rho_a = \left(\frac{P_e}{461.5} + \frac{P_{atm} - P_e}{287.1}\right) \cdot \frac{1}{T_a}$$

Temperatura húmeda o temperatura del bulbo húmedo ($^\circ\text{C}$)

$$T_h = \frac{1810.8 \cdot (P_e^{sat}(T_h) - P_e) - T_a \cdot (P_{atm} - P_e^{sat}(T_h))}{2 \cdot P_e^{sat}(T_h) - P_e - P_{atm}}$$

El cálculo es iterativo porque requiere conocer la presión de vapor saturado a la temperatura húmeda.

Referencia

Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., *Secado. Desde procesos físicos hasta procesos industriales*, Técnica y Documentación. - Lavoisier: Paris (1995).

Anexo II: Determinación de las condiciones de operación

Cálculo de la velocidad superficial del aire

El valor de referencia de caudal D es fijado en litros normales por minuto. Al dividir D previamente transformado en m³ normales por segundo por el volumen húmedo del aire en condiciones normales (0°C y 101325 Pa) v_{hum}^N , obtenemos el caudal másico de aire en kg de aire seco por segundo. La medición de la temperatura y la humedad relativa del aire después de la humidificación y el calentamiento del aire, permite determinar el contenido absoluto de agua del aire, así como su densidad. Por lo tanto, es suficiente con multiplicar el caudal másico de aire seco por 1+Y para obtener el caudal másico total y luego dividir por la densidad para determinar el caudal volumétrico en m³/s. Obtenemos la velocidad superficial del aire v en m/s dividiendo por la sección transversal de la conducción (en m²).

$$v = \frac{D \cdot (1 + Y)}{1000 \cdot 60 \cdot v_{hum}^N \cdot \rho_a(T, HR) \cdot Seccion\ conducción}$$

Determinación de la referencia de producción de humedad del generador de vapor

La velocidad superficial que deseamos obtener fija el caudal del volumen de aire. Conociendo la temperatura y la humedad que deseamos alcanzar, podemos calcular la densidad del aire y determinar el caudal masico 'aire + vapor de agua' correspondiente. A partir de este valor, la humedad absoluta y la humedad ambiental, se puede determinar los caudales de aire seco (este aire contiene el índice de humedad ambiental) y el vapor de agua necesarios y fijar los valores correctos en litros normales por minuto para el aire seco y en porcentaje de producción máxima (5 kg/hora) para el generador de vapor.

Anexo III: Ecuaciones para el cálculo de las magnitudes que intervienen en los números adimensionales

Este anexo contiene las diferentes ecuaciones necesarias para calcular los números de Reynolds, Prandtl, Schmidt, Nusselt y Sherwood.

Conductividad térmica del aire λ (W/m°C). (Nadeau y Puiggali, 1995)

$$\begin{aligned} A &= 8.027769 \cdot 10^{-8}x^4 - 1.8619279 \cdot 10^{-7}x^3 + 1.5128385 \cdot 10^{-7}x^2 - 5.2651721 \cdot 10^{-8}x + 3.5596815 \cdot 10^{-9}; \\ B &= -4.3387318 \cdot 10^{-5}x^4 + 1.0078804 \cdot 10^{-4}x^3 - 8.1845585 \cdot 10^{-5}x^2 + 2.7477907 \cdot 10^{-5}x - 1.4563789 \cdot 10^{-6}; \\ C &= 8.1396944 \cdot 10^{-3}x^4 - 1.4189051 \cdot 10^{-2}x^3 + 1.2433925 \cdot 10^{-2}x^2 - 3.4134568 \cdot 10^{-3}x - 6.77457 \cdot 10^{-4}; \\ D &= -2.3355372 \cdot 10^{-2}x^4 - 0.23109092x^3 + 0.11216864x^2 + 2.3143653 \cdot 10^{-2}x + 1.9017419; \\ E &= -90.995865x^4 + 296.75143x^3 - 497.31824x^2 + 93.451324x + 572.28264; \end{aligned}$$

$$\lambda = (AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E) \cdot 4.182 \cdot 10^{-5}$$

donde x es la fracción molar de vapor [-] y T es la temperatura del aire en °C.

Viscosidad del aire μ (Pa.s). (Nadeau y Puiggali, 1995)

$$\begin{aligned} A &= 3.9543448 \cdot 10^{-8}x^4 + 6.4272008 \cdot 10^{-8}x^3 - 1.5426258 \cdot 10^{-8}x^2 - 9.6937347 \cdot 10^{-9}x + 5.4182597 \cdot 10^{-10}; \\ B &= 1.0590597 \cdot 10^{-5}x^4 - 1.5096114 \cdot 10^{-5}x^3 - 3.7079313 \cdot 10^{-6}x^2 + 3.6750292 \cdot 10^{-6}x - 4.0088101 \cdot 10^{-6}; \\ C &= -2.7684891 \cdot 10^{-3}x^4 + 4.36749111 \cdot 10^{-3}x^3 + 1.2388106 \cdot 10^{-3}x^2 + 1.5312679 \cdot 10^{-3}x - 4.3016441 \cdot 10^{-3}; \\ D &= 0.57387209x^4 - 1.708572x^3 + 1.0763351x^2 - 1.3033422x + 4.9683638; \\ E &= -46.32412x^4 + 310.72525x^3 - 1036.1348x^2 - 60.243416x + 1716.8794; \end{aligned}$$

$$\mu = (AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E) \cdot 1 \cdot 10^{-8}$$

donde x es la fracción molar de vapor [-] y T es la temperatura del aire en °C.

Calor específico $C_{p,a}$ (J/kg°C). (Mujumdar, 1995)

$$C_{p,a} = 1000(0.9774 + 0.1124 \cdot 10^{-3}(T + 273.15) + 0.19035 \cdot 10^{-7}(T + 273.15)^2 + Y(1.8830 - 1.6737 \cdot 10^{-4}(T + 273.15) + 8.4386 \cdot 10^{-7}(T + 273.15)^2 - 2.6966 \cdot 10^{-10}(T + 273.15)^3))$$

donde T es la temperatura del aire en °C e Y es la humedad absoluta del aire en kg/kg.

Densidad del aire (kg/m³)

Ver Anexo I.

Difusividad del vapor de agua en el aire D_{AB} (m²/s)

La difusividad del vapor de agua en el aire D_{AB} necesaria para calcular los números de Sherwood y de Schmidt fue estimada por la siguiente ecuación:

$$D_{AB} = D_0 \left(\frac{T + 273.15}{T_0} \right)^{1.75}$$

con T la temperatura del aire en °C, $D_0 = 22 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

La ecuación se basa de la dependencia clásica de la difusividad frente a la temperatura (Geankoplis, 1993).

Referencias

Geankoplis, C. J., *Transport processes and unit operations*, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey (1993).

Mujumdar, A. S., *Handbook of industrial drying*, Mujumdar, A. S., éd ; Marcel Dekker: New York (1995).

Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., *Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels*, Technique et Documentation. Lavoisier: Paris (1995).

Anexo IV: Figuras adicionales



ASSOCIATION INTERCOMMUNALE POUR LE DEMERGEMENT
ET L'EPURATION DES COMMUNES
DE LA REGION LIEGEOISE.

Station d'épuration de Retinne

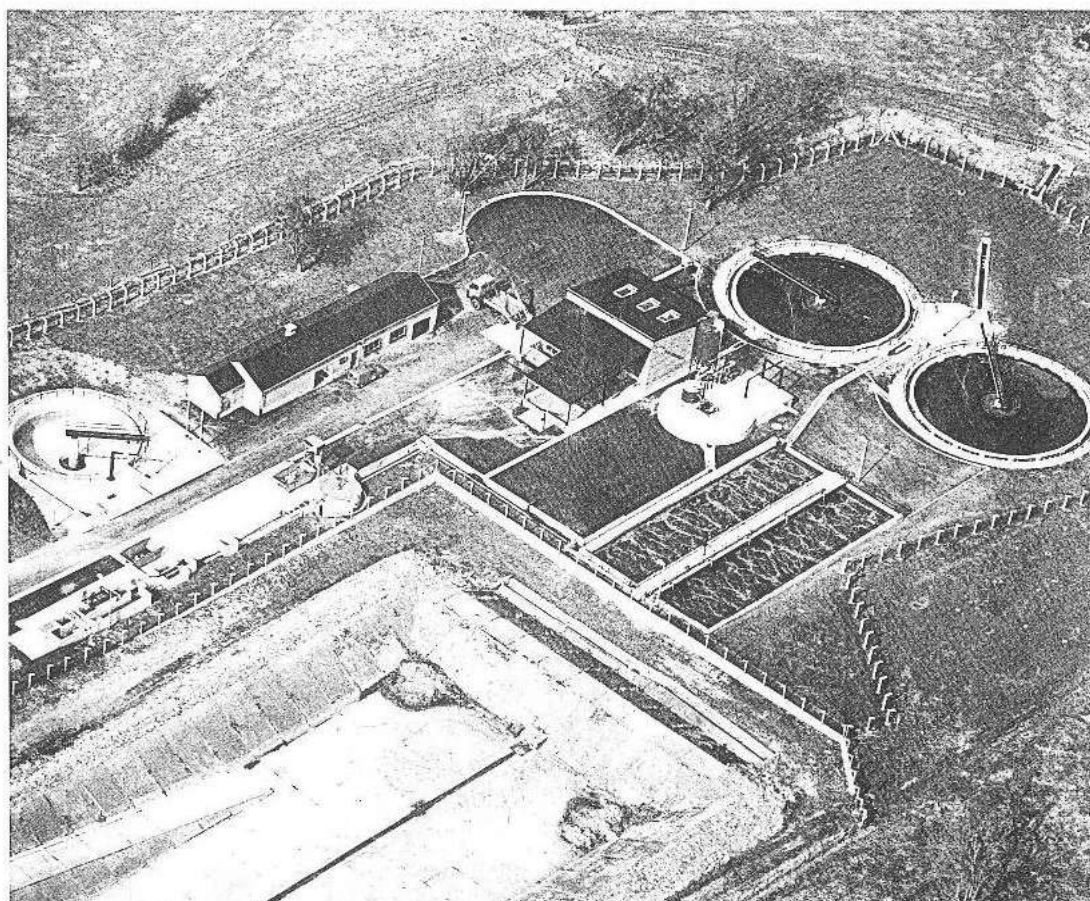


Figura IV. 1A. Vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica.
Nota: AIDE, Bélgica.

La station d'épuration de Retinne, dont le projet a été entièrement dressé par les services techniques de l'A.I.D.E., doit traiter les eaux usées d'une population équivalente de 9.000 habitants.

Avant la construction de la station d'épuration, ces eaux usées étaient une cause de pollution très importante du ruisseau de la Julienne dont le cours serpente dans des terres agricoles et des zones à vocation touristique.

La ruisseau était transformé dans sa partie amont en un véritable égout à ciel ouvert et l'on constatait dans sa partie aval, malgré une certaine autépuration de ses eaux, une mortalité importante de poissons dans une pisciculture qu'il alimentait.

C'est pourquoi l'A.I.D.E. a élaboré en novembre 1978 les études préliminaires d'assainissement du bassin

hydrographique du ruisseau de la Julienne qui furent suivies notamment des études d'avant-projet et de projet de la station d'épuration de Retinne.

Le 1^{er} juillet 1982 le dossier était mis en adjudication et la commande des travaux confiée le 18 mai 1983 à la Firme DEGREMONT-BENELUX de Herstal.

Les travaux se sont terminés en date du 28 novembre 1985 au montant de 117.388.000 fr. T.V.A. incluse. La subside a été assurée intégralement par la Région Wallonne.

Depuis cette date l'A.I.D.E. assure l'exploitation des installations.

La station d'épuration de Retinne a une capacité de 9.000 E.H.

Elle comprend principalement :

- un dégrillage;
- une installation de limitation et de mesure de débit;
- un bassin d'emménagement;
- un dessablage-dégraissage;
- un traitement biologique par boues activées;
- l'épaississement et la déshydratation des boues.

Les eaux à traiter

- Charge nominale, E.H.: 9.000
- Débit admis au dégrillage, m³/h: 900
- Débit admis sur le biologique, m³/h: 270
- Charge journalière en DBO₅, kg: 466

Les eaux traitées

- DBO₅, mg/l: ≤ 15
- Matières en suspension, mg/l: ≤ 30
- Matières sédimentables, ml/l: ≤ 0,5

Les boues produites

- Matières organiques, %: < 50
- Siccité, %: ≤ 20

Caractéristiques des ouvrages

Ligne de traitement des eaux :

- dégrilleur courbe — écartement entre barreaux 20 mm — avec système de nettoyage automatique;
- Limitation du débit acceptée à la station, avec envoi dans un bassin d'emménagement des eaux de premières pluies, qui sont recyclées vers les installations d'épuration dès

que le débit d'entrée le permet;

- Dessableur-dégraisseur, type tronconique, avec aération par diffuseurs moyennes bulles, extraction des sables par air-lift et déversement, après égouttage, dans un container;
- Aération dans deux bassins équipés chacun de 5 rampes relevables sur lesquelles sont montés des disques poreux alimentés en air par 3 surpresseurs à vitesse variable ce qui permet de régler l'apport d'oxygène en fonction des besoins;
- Décantation finale dans deux ouvrages de 16 m de diamètre équipés chacun d'un pont racleur radial à entraînement périphérique.

Ligne de traitement des boues :

- Deux pompes de 90 m³/h permettant :
 - soit de recycler les boues extraites des clarificateurs, dans le canal d'alimentation des bassins d'aération,
 - soit de les évacuer vers un épaisseur, diamètre 8 m, après avoir été conditionnées à la chaux, dosée au départ d'un silo de 15 m³ de capacité;
- Les boues épaissies sont reprises par une pompe à débit variable - 3 à 10 m³/h - pour être, après addition de polyélectrolyte, déshydratées mécaniquement sur un filtre à bandes ayant une capacité horaire de 280 kg/h en M.S.

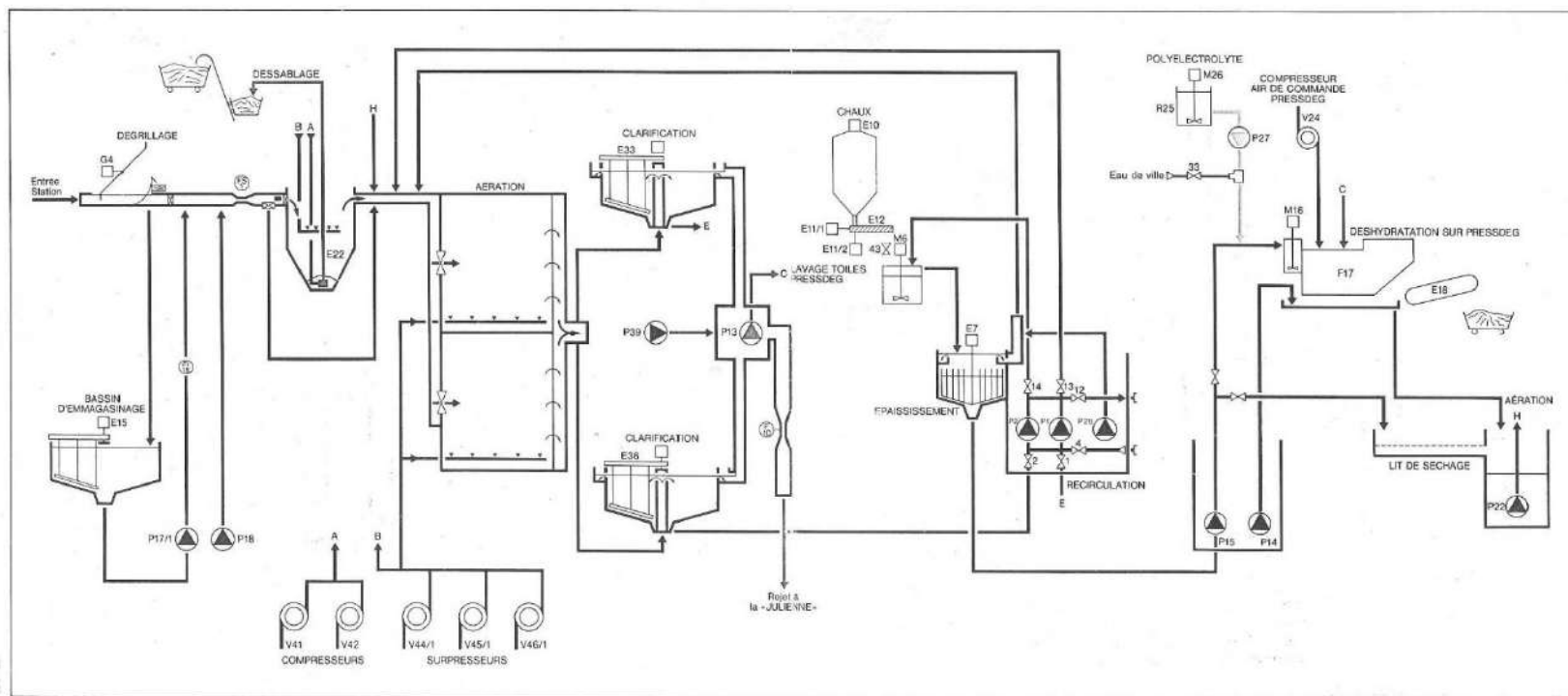
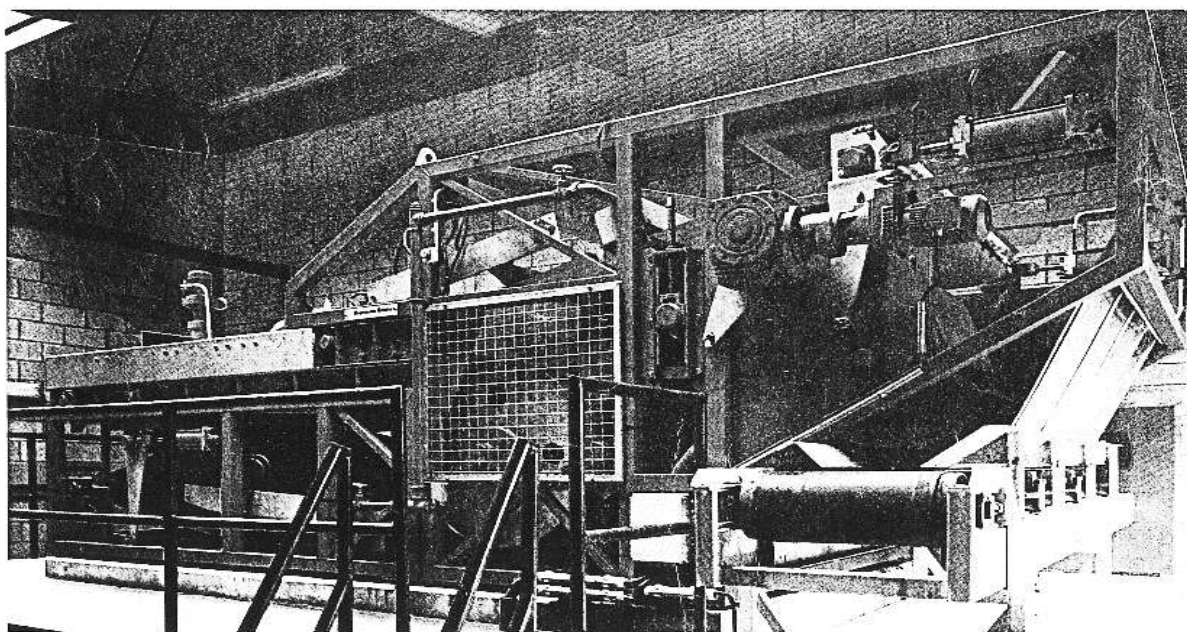
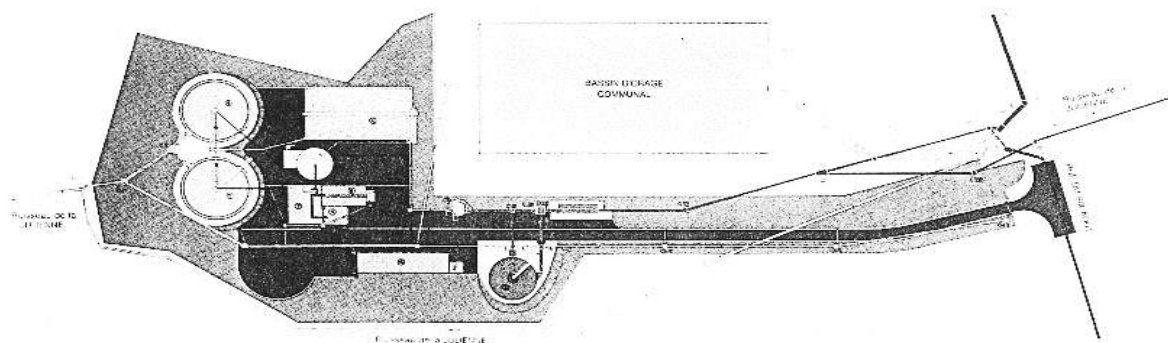


Figura IV. 2A. Representación esquemática del proceso de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica. Nota: AIDE, Bélgica.

Plan terrier d'ensemble



Filtre à bandes presseuses


www.aide.com

Association intercommunale pour le démergement
et l'épuration des communes
de la région liégeoise.

Rue de la Digue, 25
4210 Tilleur (Saint Nicolas)
Tél. : (041) 33 78 60

Figura IV. 3A. Plano general y vista de la estación de depuración de aguas residuales de Retinne, Bélgica.
Nota: AIDE, Bélgica.



Figura IV.4A. Esquema del proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR.
 Nota: Innova ambiental, Solvi.

La culminación de este trabajo realizado ha sido más difícil que llegar al cráter del volcán Misti en Arequipa-Perú, para realizar una actividad experimental relacionada al tema desarrollado.