

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE USO DE LOS LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN FRANCISCO DE ORELLANA, PROVINCIA DE ORELLANA, EN LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONSTRUCCIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
TECNÓLOGOS EN AGUA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**BYRON EDISON GUERRERO TOAZA**

byron.guerrero@epn.edu.ec

**DAYANA MARICELA REGALADO CRUZ**

dayana.regalado@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO STALIN GUERRA SALCEDO, MSC.**

santiago.guerra@epn.edu.ec

**CODIRECTOR(A): ING. MARÍA BELEN ALDAS SANDOVAL, MSC.**

maria.aldas@epn.edu.ec

**Quito, enero 2021**

# CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por él Sr. Byron Edison Guerrero Toaza y la Srta. Dayana Maricela Regalado Cruz como requerimiento parcial a la obtención del título de Tecnólogos en Agua y Saneamiento Ambiental, bajo nuestra supervisión:



---

**Santiago Stalin Guerra Salcedo**

DIRECTOR DEL PROYECTO

---

**María Belén Aldas Sandoval**

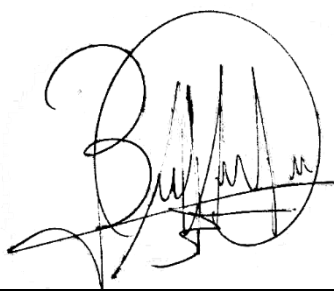
CODIRECTORA DEL PROYECTO

## DECLARACIÓN

Nosotros Guerrero Toaza Byron Edison con CI: 2200058036 y Regalado Cruz Dayana Maricela con CI: 1716963671 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



---

**Byron Edison Guerrero Toaza**



---

**Dayana Maricela Regalado Cruz**

# DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a:

Mis padres María Toaza Pupiales y Rafael Guerrero Pérez, quienes siempre han sido ese pilar fundamental en mis decisiones, quienes me han entregado su amor incondicional y siempre han permanecido a mi lado en los momentos difíciles para alcanzar mis metas, aquellos que han sabido ser un ejemplo de superación para no desfallecer y seguir adelante.

A mi hermano Gustavo Guerrero, que ha sido muy importante a lo largo de toda mi carrera universitaria, por permanecer a mi lado con su apoyo constante y servirme de ejemplo de tenacidad en los momentos agobiantes y por impulsarme a continuar con mis logros.

A todos mis profesores que me impartieron su conocimiento en este largo camino y su constante dedicación a la formación de nuevos profesionales.

Por último, a mis amigos que se fueron uniendo en esta constante lucha a lo largo de toda mi carrera universitaria.

**BYRON GUERRERO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a todos quienes conforman la Municipalidad de Francisco de Orellana, quienes permitieron la realización de la tesis en su establecimiento, en especial al alcalde Ricardo Ramírez, a los ingenieros Fredy Vásconez y Gustavo Montero del área de agua potable y alcantarillado.

También agradezco profundamente a quienes apoyaron este proyecto, al ingeniero Hugo Peralta que estuvo desde su inicio en colaboración de lo que estuvo a su alcance para el desarrollo practico, así como a Susana Cobos y Oscar Álava, quienes nos acogieron como familia y nos abrieron sus puertas para lograr este proyecto.

Un infinito agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Escuela de Formación de Tecnólogos, a las autoridades y a los docentes, quienes aportaron el conocimiento para mi formación profesional.

Finalmente agradezco a nuestro director de tesis Ing. Santiago Guerra Salcedo y nuestra codirectora Ing. María Belén Aldas, quienes permanecieron colaborando desde el principio hasta el final e hicieron posible el desarrollo de la presente tesis.

**BYRON GUERRERO**

# DEDICATORIA

A Dios

A la Naturaleza

A mi madre, por su amor, por ser mi pilar y ejemplo de guerrera en la vida.

A mi hermano, por su apoyo incondicional y ejemplo de perseverancia.

**DAYANA REGALADO**

# **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre Gloria Cruz, por haberme apoyado en todo momento a pesar de la distancia, transmitirme fortaleza y aliento para alcanzar mis metas.

A mi hermano Alex Regalado, por la paciencia, ayuda y motivación a lo largo de mi etapa universitaria.

A mi compañero de tesis Edison Guerrero, por su amistad y quien me ha llevado a compartir esta bonita experiencia.

Al Municipio de Francisco de Orellana, por ayunaros a la realización de este proyecto, a los ingenieros Fredy Vásconez y Gustavo Montero del área de agua potable y alcantarillado quienes nos compartieron su conocimiento y tiempo.

Al ingeniero Hugo Peralta por su amabilidad y predisposición en ayudarnos con la realización de la parte práctica.

También quiero expresar mi mayor agradecimiento a Susana Cobos y Oscar Álava, por su bondad, humildad, alegría y cariño al recibirnos en su hogar.

A la Escuela Politécnica Nacional y quienes la conforman por aportar el conocimiento y forjar profesionales entregados a la carrera.

Al director de tesis ingeniero Santiago Guerra Salcedo y codirectora ingeniera María Belén Aldas, por su valioso tiempo, paciencia y enseñanzas.

Finalmente doy gracias a quienes siempre me han enseñado algo nuevo cada día.

***DAYANA REGALADO***

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción .....	1
1.1	Justificación .....	3
1.2	Objetivo general.....	4
1.3	Objetivos específicos .....	4
1.4	Fundamentos teóricos .....	4
1.4.1	Aguas residuales y su tratamiento.....	5
1.4.2	Tratamiento de lodos.....	5
1.4.3	Tipos de lodos.....	5
1.4.4	Deshidratación .....	7
1.4.5	Metales pesados presentes en lodos de aguas residuales.....	7
1.4.6	Lixiviación.....	10
1.4.7	Fabricación de adoquines .....	11
1.4.8	Agregados utilizados en la fabricación de elementos de construcción.....	15
1.4.9	Normativa nacional e internacional.....	17
2	Metodología.....	19
2.1	Visita técnica de campo .....	19
2.2	Muestreo de lodos .....	23
2.3	Análisis de parámetros de laboratorio .....	25
2.4	Elaboración y clasificación de los adoquines .....	27
2.5	Ensayos de compresión.....	33
2.6	Análisis de lixiviados .....	36
3	Resultados y Discusión.....	38
3.1	Calidad de los lodos analizados en laboratorio .....	39
3.2	Comparación de resultados con la normativa internacional .....	41
3.3	Fabricación de adoquines con los lodos producidos en la PTAR del cantón Francisco de Orellana.....	43



3.4	Evaluación de la calidad del producto desarrollado basado en la Norma INEN 1488 y 3040 para ensayos de compresión y la guía metodológica de la EPA-1315 para análisis de lixiviados.....	46
4	Conclusiones y Recomendaciones .....	54
4.1	Conclusiones .....	54
4.2	Recomendaciones .....	55
5	Referencias Bibliográficas.....	56
	ANEXOs .....	62
	Anexo 1:.....	i
	Mapa ubicación geográfica de la cabecera cantonal francisco de orellana y PTAR Orellana .	i
	Anexo 2:.....	iv
	análisis de lodos gadmfo ptar orellana .....	iv
	Anexo 3:.....	vii
	análisis de lodos gadpo ptar orellana .....	vii
	Anexo 4:.....	x
	ensayos de compresión .....	x
	Anexo 5:.....	xiii
	análisis de lixiviados .....	xiii
	Anexo 6:.....	xviii
	cotización de precios.....	xviii
	Anexo 7:.....	xxv
	formulas.....	xxv

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación cabecera cantonal Francisco de Orellana (Coca) .....	1
<b>Figura 2</b> Ubicación geográfica de la PTAR Orellana.....	2
<b>Figura 3</b> Esquema general de un sistema de tratamiento de lodos .....	6
<b>Figura 4</b> Estación de bombeo de agua residual.....	19
<b>Figura 5</b> Bombas sumergibles de impulsión .....	19
<b>Figura 6</b> PTAR Orellana .....	20
<b>Figura 7</b> Lechos de secado .....	21
<b>Figura 8</b> Lodos, Lechos de secado.....	21
<b>Figura 9</b> Desarenador .....	22
<b>Figura 10</b> Arenas, Desarenador .....	22
<b>Figura 11</b> Laboratorio LAB-GADPO .....	23
<b>Figura 12</b> Muestras de lodo seco y húmedo provenientes de los lechos de secado y desarenador.....	24
<b>Figura 13</b> Entrega de muestras al laboratorio del GADPO .....	25
<b>Figura 14</b> Análisis de lodos, PTAR. Municipio Francisco de Orellana 2018.....	26
<b>Figura 15</b> Análisis de lodos, PTAR. Municipio Francisco de Orellana 2020.....	27
<b>Figura 16</b> Medición en Kg de materiales, chispa, cemento y lodo para la elaboración del mortero .....	27
<b>Figura 17</b> Materiales utilizados, cemento, chispa, lodo.....	28
<b>Figura 18</b> Homogenización de los componentes .....	30
<b>Figura 19</b> Transporte de material hacia el equipo de compactación.....	30
<b>Figura 20</b> Equipo de compactación y moldeado .....	31
<b>Figura 21</b> adoquín rectangular 20X10X6	<b>Figura 22</b> adoquín hexagonal 24X22X8
.....	.....
.....	31
<b>Figura 23</b> Curado de los productos finales .....	32
<b>Figura 24</b> Clasificación de los adoquines de acuerdo al porcentaje de lodo utilizado .....	33
<b>Figura 25</b> capa de cemento para igualar imperfecciones del adoquín .....	34
<b>Figura 26</b> Equipo de compresión.....	35
<b>Figura 27</b> Ensayo de compresión, visualización de la ruptura del elemento .....	35
<b>Figura 28</b> muestras en solución acuosa (agua destilada).....	36
<b>Figura 29</b> Toma de muestras de lixiviados .....	37

<b>Figura 30</b> Muestras de lixiviados de los 4 productos con mejor potencial de fabricación .....	37
<b>Figura 31</b> Resultados de análisis realizados en la muestra de lodo húmedo y seco.....	40
<b>Figura 32</b> resultados de muestra de lodo, realizado por el departamento de Agua y Alcantarillado, Municipio Francisco de Orellana .....	41
<b>Figura 33</b> Geometría y dimensiones.....	43
<b>Figura 34</b> Clasificación de adoquines.....	46
<b>Figura 35</b> Tipo de uso y resistencia para adoquines .....	47
<b>Figura 36</b> Daños en la estructura del adoquín en fase de fabricación .....	48
<b>Figura 37</b> Resistencia a la compresión, adoquín hexagonal de 24X22X8 .....	49
<b>Figura 38</b> Resistencia a la compresión, adoquín rectangular de 20X10X6 .....	49
<b>Figura 39</b> Mapa, ubicación geográfica de la Cabecera cantonal Francisco de Orellana .....	ii
<b>Figura 40</b> Mapa, ubicación física de PTAR del cantón Francisco de Orellana.....	iii
<b>Figura 41</b> Informe de ensayos de lodos de la PTAR Orellana .....	v
<b>Figura 42</b> Informe de ensayos de lodos de la PTAR Municipio Francisco de Orellana .....	vi
<b>Figura 43</b> Informe de análisis de lodos húmedos PTAR Orellana.....	viii
<b>Figura 44</b> Informe de análisis de lodos secos PTAR Orellana .....	ix
<b>Figura 45</b> Informe de ensayo de compresión a adoquines hexagonales para circulación vehicular .....	xi
<b>Figura 46</b> Informe de ensayo de compresión a adoquines rectangulares para circulación peatonal.....	xii
<b>Figura 47</b> Informe de ensayo de lixiviados, adoquín 20% seco peatonal.....	xiv
<b>Figura 48</b> Informe de ensayo de lixiviados, adoquín 20% húmedo peatonal .....	xv
<b>Figura 49</b> Informe de ensayo de lixiviados, adoquín 20% seco vehicular .....	xvi
<b>Figura 50</b> Informe de ensayo de lixiviados, adoquín 50% seco vehicular .....	xvii
<b>Figura 51</b> Cotización de adoquines por m <sup>2</sup> .....	xix
<b>Figura 52</b> Cotización de cemento armadura IP puzolánico.....	xx
<b>Figura 53</b> Pliego tarifario por m <sup>3</sup> de agua en Quito .....	xxi
<b>Figura 54</b> Pliego tarifario por m <sup>3</sup> de agua en Santa Rosa .....	xxii
<b>Figura 55</b> Pliego tarifario por m <sup>3</sup> de agua en Orellana .....	xxiii
<b>Figura 56</b> Pliego tarifario eléctrico a nivel nacional.....	xxiv
<b>Figura 57</b> Formula para el cálculo de emisiones de GEI, emisiones base .....	xxvi

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Descripción de metales pesados .....	8
<b>Tabla 2</b> Resistencia a la compresión de acuerdo a cada tipo de roca.....	16
<b>Tabla 3</b> Equipos y métodos utilizados para análisis de lodos.....	25
<b>Tabla 4</b> Descripción de la cantidad en kg de materiales utilizados para la fabricación de adoquines con lodo húmedo .....	28
<b>Tabla 5</b> Descripción de la cantidad en kg de materiales utilizados para la fabricación de adoquines con lodo seco .....	29
<b>Tabla 6</b> Clasificación de normas .....	38
<b>Tabla 7</b> Límites máximos permisibles .....	42
<b>Tabla 8</b> Clasificación de adoquines .....	44
<b>Tabla 9</b> Promedio de resultados de compresión .....	48
<b>Tabla 10</b> Análisis de lixiviados de los productos finales .....	50
<b>Tabla 11</b> valores de inversión por adoquín como producto final .....	52
<b>Tabla 12</b> Comparación de precios por m <sup>2</sup> de adoquines.....	53

## RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad evaluar la viabilidad del uso de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón Francisco de Orellana en la elaboración de adoquines de construcción, ya que varias plantas de tratamiento de aguas residuales solo tienen como método de aprovechamiento de los lodos en uso agrícola. Los lodos pretenden ser utilizados en el campo de la construcción como un nuevo método viable, además, se pretende minimizar el impacto que genera al ambiente, al reducir volúmenes de lodo que se encuentran en contacto directo con el suelo.

Se realizaron visitas de campo con las cuales se comprende el funcionamiento de la PTAR de Orellana, así mismo se realizó la inspección para determinar los puntos de muestreo y del volumen de material necesario para la fabricación de adoquines, usando como materia prima el lodo residual producto de la planta. Los lodos fueron analizados en el laboratorio del Consejo Provincial de Orellana (GADPO). Después los lodos fueron utilizados en la elaboración de adoquines de construcción con colaboración de la microempresa DekoPiso. Los adoquines una vez fabricados, pasaron a una etapa de curado durante 28 días, para luego realizar los ensayos de compresión en la ciudad de Quito, en el laboratorio de LEMSUR, donde se realizaron las rupturas del adoquín, obteniendo así la resistencia que puede soportar el material elaborado. Por último los adoquines fueron preparados para los análisis de lixiviados al sumergirse en agua destilada y ser mantenidos por un periodo de 30 días, posteriormente se tomó muestras del líquido lixiviado y llevados a ser analizados en el laboratorio AqLab, ubicado en la provincia de Orellana.

Finalmente se elaboró una evaluación de los adoquines, donde se obtuvieron productos que cumplen con los requisitos mecánicos y ambientales, con lo cual se prevé una reproducción de los adoquines a futuro. La evaluación comprende la viabilidad para fabricar productos de concreto con materia prima de lodo residual generada en plantas de tratamiento de aguas residuales, no solo para la provincia de Orellana, si no como un proyecto de aprovechamiento que sirve de guía para expandirse en otros medios que generen lodos residuales de difícil tratamiento y disposición.

**PALABRAS CLAVE:** Lodos residuales, fabricación de adoquines, ensayos de compresión, análisis de lixiviados.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project was to evaluate the viability of using sludge from the Francisco de Orellana canton in wastewater treatment plant of the elaboration of construction paving stones, since several wastewater treatment plants only have as a method of taking advantage of sludge in agricultural use. The mud is intended to be used in the construction field as a new viable method; in addition, it is intended to minimize the impact it generates on the environment, by reducing the volumes of mud that are in direct contact with the ground.

Field visits were carried out with which the operation of the Orellana WWTP was understood, as well as an inspection to determine the sampling points and the volume of material necessary for the manufacture of paving stones, using the residual product sludge. of the plant. The sludge was analyzed in the laboratory of the Provincial Council of Orellana (GADPO). After the sludge, they were used in the elaboration of construction paving stones with the collaboration of the micro-company DekoPiso. Once the paving stones were manufactured, they went through a curing stage for 28 days, to then carry out compression tests in the city of Quito, in LEMSUR laboratory, where the paving stone breaks broke, thus obtaining the resistance that it can withstand. the finally, the cobblestones were prepared for leachate analysis by immersing them in distilled water and being subjected to a period of 30 days, then samples of the leached liquid were taken and taken to be analyzed in the AqLab laboratory, located in the province of Orellana.

Finally, an evaluation of the paving stones was prepared, where products that meet the mechanical and environmental requirements were obtained, with which a reproduction of the paving stones is expected in the future. The evaluation includes the viability to manufacture concrete products with raw materials from residual sludge generated in wastewater treatment plants, not only for the province of Orellana, but also as an exploitation project that serves as

a guide to expand into other means that generate residual sludge that is difficult to treat and dispose of.

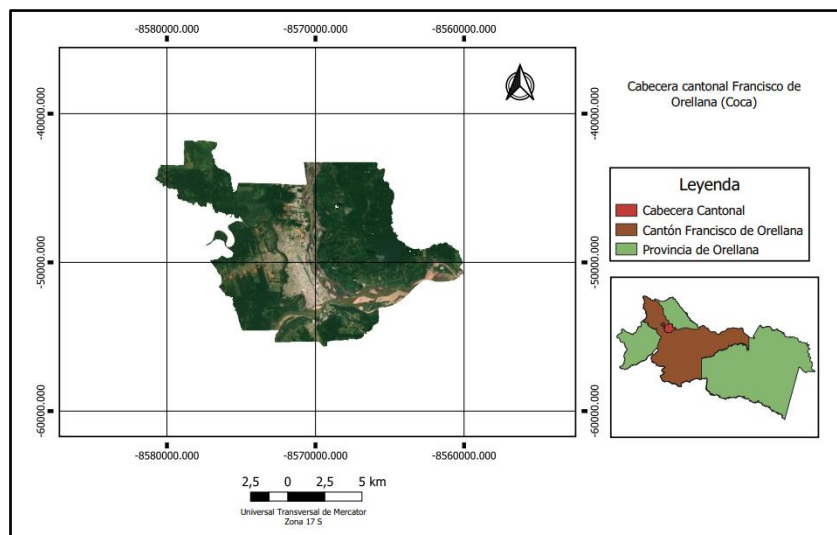
**KEYWORDS:** Residual sludge, paving stone manufacturing, compression testing, leachate analysis.

# 1 INTRODUCCIÓN

En las plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico o industrial se genera material sedimentable, también conocido como barro o lodo activado. Estos lodos son sustancias contaminantes que producen un problema al ambiente y generan alteraciones a la salud de los seres vivos (León, 2015).

Los lodos provenientes de los tratamientos de aguas residuales presentan concentraciones de metales pesados y patógenos, dando como consecuencia altos riesgos para la salud pública. Adicional a esto, el manejo y transporte de lodos a lugares seguros generan costos adicionales de operación que conllevan la búsqueda de métodos y técnicas alternativas que reduzcan los impactos socioeconómicos y socio ambientales (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

En este contexto, el Cantón Francisco de Orellana se encuentra ubicado en la Región Amazónica Ecuatoriana y pertenece a la provincia de Orellana. Abarca una extensión de 704.755 ha a una altitud que varía de 100 a 720 m.s.n.m, de acuerdo con el último censo realizado por el INEC en el 2010, cuenta con una población de 72.795 hab (GADMFO, 2014-2019). El cantón cuenta con la cabecera cantonal Puerto Francisco de Orellana, el cual limita con el cantón Joya de los Sachas al norte, al sur con la provincia de Pastaza, al este con el cantón Aguarico y al oeste con el cantón Loreto. La cabecera cantonal es más conocida como el Coca y está constituida por 29 barrios, las cuales constituyen la zona urbana del cantón (Alcaldía Francisco de Orellana, 2020). **(ver figura 1)**

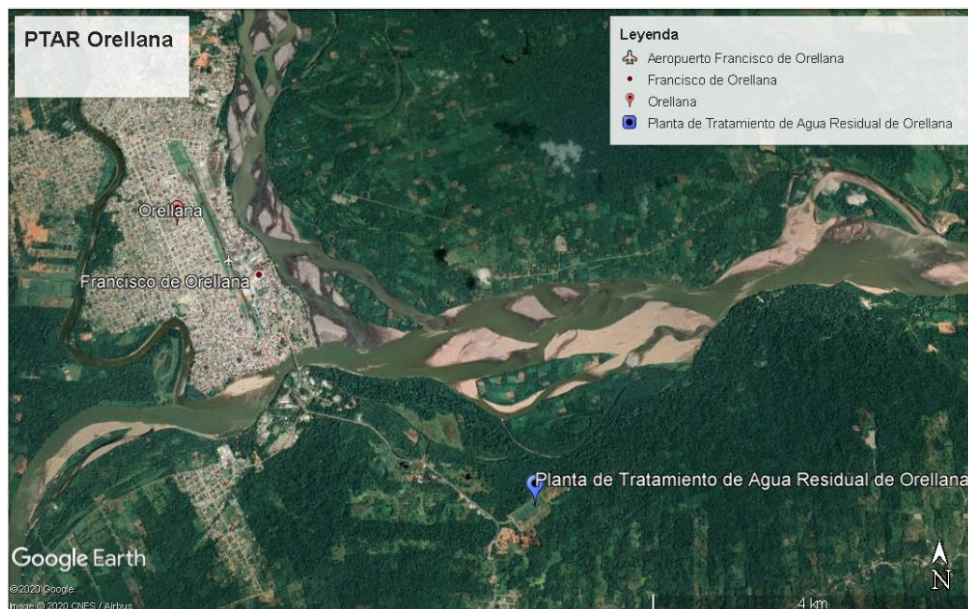


**Figura 1** Ubicación cabecera cantonal Francisco de Orellana (Coca)

Fuente: Propia



La cabecera cantonal tiene una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que opera con un caudal de 100 l/s desde el 2017 (Estratégico, 2018). El agua para tratarse es conducida por bombas de impulsión y es transportada desde la ciudad del Coca hasta llegar a la PTAR ubicada en el km 3 vía El Auca, como se indica en la **figura 2**. El agua residual que ingresa a la planta cumple con procesos de depuración primarios y secundarios, los lodos resultantes son trasladados a los lechos de secado para su deshidratación. Por otra parte, el líquido flotante se conduce hacia las lagunas artificiales donde son tratadas con hierbas o pasto alemán. Finalmente, el agua procesada es descargada en el Río Zamona, la cual desemboca en el Río Napo. Por otro lado, los lodos una vez deshidratados son utilizados para la agricultura y otra cantidad es trasladado al relleno sanitario (Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana, 2018).



**Figura 2** Ubicación geográfica de la PTAR Orellana

Fuente: (Google Earth, 2020)

Los lodos generados en la PTAR del cantón de Orellana presentan inconvenientes para su disposición final, y tienen un único tratamiento, que es el de secado a la intemperie, para luego ser enviados al relleno sanitario. Este problema no es en particular en la ciudad mencionada sino a escala mundial y particularmente en países en vía de desarrollo (UNESCO, 2017).

Otros problemas se presentan en la disposición final, donde surgen inconvenientes tanto en un mono relleno los cuales son espacios de terreno donde se depositan los lodos y se van cubriendo con tierra a medida q se van llenando, también se tienen problemas en el traslado a lugares seguros. La construcción de un mono relleno tiene dificultades para su ubicación, ya que requiere de grandes extensiones de tierra y a su vez con el tiempo se satura, por lo

cual se debe volver a buscar una nueva extensión de terreno. Por otro lado, el transporte hacia lugares seguros, implica grandes costos de operación, además de la distancia y el tiempo que lleva la transferencia hacia los rellenos sanitarios (Limón Macías, 2013).

Adicional a esto, para el Gobierno Autonomo Decentralizado Municipal Francisco de Orellana (2014-2019), los lodos presentan problemas para su uso en la elaboración de adoquines, debido a la ausencia de estudios factibles, los cuales demuestren el óptimo aprovechamiento de los lodos residuales con valores viables en cuanto a costo-beneficio (GADMFO, 2014-2019).

## **1.1 Justificación**

En varios países de Latinoamérica, se han realizado estudios que avalan el impacto que generan los lodos, uno de ellos es la Universidad del Valle en Colombia, en la cual se tomaron muestras de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y evaluaron el potencial en productos como bloques, ladrillos y adoquines, para la construcción. Esto dio como resultado un material con gran resistencia, impermeable, permitiendo que las sustancias lixiviales y metales pesados queden encapsulados y no entren en contacto con el agua, lo cual actualmente se aplica como reemplazo parcial de componentes para la fabricación de materiales constructivos (Salazar, 2003).

Los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales contienen contaminantes perjudiciales para la salud, por esto existe la necesidad de adoptar nuevas técnicas para el tratamiento y disposición de lodos residuales. Un estudio en Barcelona-España utilizó estos lodos en la prefabricación de adoquines. La Universidad Politecnica de Cataluña (2002), indica que los adoquines al ser elaborados con cemento, permiten englobar los contaminantes presentes en los lodos, así como estabilizar metales pesados, esto es gracias a que el proceso de hidratación del cemento eleva el pH entre 12-13, haciendo más fácil la inmovilización de los metales, para su absorción en la superficie del cemento hidratado, incluido en condiciones de lluvia o con escorrentías (Departamento de Ingeniería de la construcción, Universidad Politecnica de Cataluña, 2002).

Estas alternativas como la elaboración de adoquines con el uso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, permiten aprovechar grandes cantidades de lodo deshidratado en la fabricación de elementos utilizados en el ámbito de la construcción, reduciendo el riesgo de contaminación y afección a la salud por metales pesados y patógenos. Los contaminantes son estabilizados gracias a la construcción de adoquines que

pueden ser empleados en obras civiles y de esta manera reducir el impacto negativo con el ambiente (Granda, 2012).

Por estas razones el presente proyecto, pretendió evaluar la calidad de los lodos, y a su vez, examinar la alternativa de tratamiento de lodos residuales, mediante la elaboración de adoquines artesanales, tal que el producto desarrollado, sea de interés para que pueda ser comercializado en la zona. Para esta implementación fue de gran importancia establecer aspectos técnico-económicos, los cuales permitieron ofrecer una gestión adecuada de los residuos generados en la PTAR del cantón Francisco de Orellana, utilizando tecnologías y métodos de bajo costo, con la finalidad que la alternativa pueda ser considerada para una implementación futura, (Vázquez, 2016).

## **1.2 Objetivo general**

Evaluar la viabilidad de uso de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del Cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana en la elaboración de adoquines de construcción.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Caracterizar los lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Cantón Francisco de Orellana para ser utilizados como componente en la fabricación de adoquines.
- Analizar la normativa ecuatoriana e internacional vigente, para la disposición final y aprovechamiento de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), del cantón Francisco de Orellana.
- Elaborar los adoquines con diferentes porcentajes de lodo en seco y húmedo para su progresiva clasificación.
- Realizar ensayos de compresión para determinar su resistencia y viabilidad del uso en actividades de construcción.

## **1.4 Fundamentos teóricos**

### **1.4.1 Aguas residuales y su tratamiento**

Se consideran aguas residuales a todo líquido que ha sufrido un cambio en su composición, debido al uso del agua en fines domésticos o industriales (TULSMA, 2017). Las aguas negras son aquellas que contienen materia fecal, mientras que las aguas grises son todas las que se generan por el uso en cocinas, duchas, y otros fines (UNESCO, 2017).

El incremento poblacional de las ciudades genera un mayor volumen de aguas residuales, las cuales se deben tratar por diferentes procesos de saneamiento, con el objetivo de mejorar la calidad de estas (UNESCO, 2017). En las PTAR se realizan diferentes procesos unitarios: primarios, secundarios y terciarios, los cuales se dividen en tratamientos físicos, químicos y microbiológicos, donde los lodos son separados y pasan a ser tratados y estabilizados para posteriormente ser desalojados o tener una disposición final adecuada.

### **1.4.2 Tratamiento de lodos**

Los lodos producidos del tratamiento de agua residual requieren adoptar un método adecuado para su estabilización, cada método a aplicar siempre dependerá del tipo de agua, esto ayudará a optimizar el tratamiento, también, se debe considerar el volumen y calidad, así mismo el destino, la infraestructura del sitio y las condiciones económicas (García, 2006).

La estabilización de los lodos favorece en la disminución del volumen, eliminación de contaminantes orgánicos y la eliminación de patógenos.

### **1.4.3 Tipos de lodos**

En la planta de tratamiento de aguas residuales se producen diferentes tipos de lodos, los cuales son los siguientes:

#### **Lodo crudo**

Son aquellos lodos, provenientes del pretratamiento, donde aún no cuentan con una estabilización. Estos lodos tienen la capacidad de generar ácido en la digestión anaerobia, lo que genera malos olores (Comisión estatal de agua de Jalisco, 2013).

#### **Lodo primario**

Los lodos primarios son producidos después del cribado y desarenador, se entiende que son generados en el tanque sedimentador, por lo cual contienen mayor cantidad de materia orgánica con un 93 y 97 % de agua según la Comisión estatal de agua de Jalisco, (2013).

### Lodos activados

Los lodos activados son provenientes de la descomposición biológica en cada tratamiento unitario de las aguas residuales, comúnmente se caracteriza por la actuación de diversos microorganismos que requieren de oxígeno para poder desarrollarse y mantener la degradación de materia orgánica. Los lodos obtenidos son puestos en reposo en un tanque sedimentador, durante esta fase los lodos se encuentran en ausencia de materia orgánica, esto obliga a los microorganismos a activarse. Los lodos una vez sedimentados son devueltos al primer tanque biológico para que continúe el proceso de digestión aerobia (Comisión estatal de agua de Jalisco, 2013).

### Lodo secundario

Se entiende por lodo secundario a aquel producto de la descomposición de materia orgánica, que resulta del tratamiento biológico. Para mantener un proceso estable de degradación de la materia en los lodos, se necesita retirar los excedentes de fango, ya que contiene materia no hidrolizable (Vazquez, 2017).

### Lodo terciario

La producción de lodo terciario se da en procedimientos donde se utilizan floculantes para crear espesamiento y procedan a ser retirados del tratamiento para posteriormente ser estabilizados.

Para un mejor entendimiento sobre los pasos que debe atravesar los lodos, se presenta a continuación un esquema, en el cual se exprese de forma visual y fácil los procesos del tratamiento que se da a los lodos, **(ver figura 3)**.



**Figura 3** Esquema general de un sistema de tratamiento de lodos

Fuente: (Comisión estatal de agua de Jalisco, 2013)

#### 1.4.4 Deshidratación

Para la disminución de humedad o excesos de agua en los lodos es importante la deshidratación, lo que se alcanza a través de equipos como filtros prensa, filtro banda, decantadores centrífugos y lechos de secado. Adicional a esto es posible utilizar polímeros para el acondicionamiento de lodos, en especial cuando los lodos contienen mayor cantidad de agua. Los polímeros que se usan son polielectrolitos, los cuales desestabilizan las partículas de lodos haciendo que se formen flóculos más grandes y gracias a esta formación sea más fácil retirar el agua excedente (Alfayate Blanco, 2004).

**Lechos de secado:** los lechos de secado son un mecanismo autosustentable, con el cual se obtiene una humedad menor al 70%, este se caracteriza por tener varias secciones de secado. Existen dos tipos, lechos de secado con arena y lechos de secado con medio plástico. La diferencia entre estos dos métodos se basa principalmente en su eficiencia y mantenimiento, ya que los lechos de secado con arena necesitan realizar una cama de arena y la operación de desalojo se realiza manualmente, mientras que para los lechos de secado con medio plástico se realiza con un menor costo operacional, debido que no necesita un acondicionamiento de camas de arena específico, porque es adaptable a cualquier medio, así mismo su desalojo es mediante maquinaria (Comisión estatal de agua de Jalisco, 2013).

#### 1.4.5 Metales pesados presentes en lodos de aguas residuales

En las plantas de tratamiento, cierta cantidad de metales pesados son retirados gracias a los procesos de depuración, estos contaminantes son desalojados en los lodos, dentro de esto los metales que llegan hasta este proceso tienen diferentes procedencias, en su mayoría son metales usados en industrias para cromado, protección de corrosión, metalurgia, industria automotriz, catalizador de pinturas, construcción e industrias petroleras (Simon, 2008). Ciudades que cuentan con explotación petrolera, acarrearán de la mano industrias que generan contaminantes con alta presencia de metales pesados los cuales se encuentran catalogados por la EPA.

Los metales pesados presentes en lodos, con concentraciones altas, tienen la capacidad de provocar daños a la salud y el ambiente. Los principales metales contenidos en lodos residuales son determinados por la EPA, que en comparación con la norma SEMARNAT, indican similares descripciones. Con esto se identifican los siguientes metales pesados y sus características, los cuales son descritos a continuación, **(ver tabla 1)**.

**Tabla 1** Descripción de metales pesados

Fuente: (Gunnar, 1998)

N.º	METAL	DESCRIPCIÓN
1	Cadmio	Procedente como elemento secundario de la explotación de metales como cobre, cromo y zinc. Es perjudicial para la salud en grandes concentraciones y afecta principalmente al hígado y riñones. Es utilizado en la industria de pinturas y fabricación de baterías.
2	Cobre	Es uno de los metales más abundantes en los seres vivos, también es producto de la minería, donde genera una contaminación en cuencas hídricas. El cobre es un mineral que no cambia su composición física ni química, es por esto que se puede reciclar ilimitadamente, independiente de las veces que haya sido utilizada. Puede generar daños leves a la salud, su toxicidad rara vez ha generado la muerte, puede producir alteraciones al ser humano en el tracto gastrointestinal. Las principales aplicaciones son en el uso eléctrico, gracias a que es un excelente conductor, otro uso son en tuberías de cobre en la construcción y en un pequeño porcentaje se lo usa como precipitante del selenio.
3	Níquel	Mineral procedente de meteoritos, se encuentra combinado con otros elementos como el azufre, oxígeno, amonio, y otros. Su extracción es realizada mediante trituración y métodos electromagnéticos. Causa efectos negativos en los seres vivos como: alergias, rinitis, sinusitis, y alteraciones en las vías respiratorias. Es muy utilizado en la fabricación de aleaciones resistentes a la corrosión, como en la elaboración de utensilios de cocina y muy cotizado para la fabricación de las monedas.
4	Plomo	Mineral que se encuentra en composición como es la galena o sulfato de plomo, las grandes industrias obtienen el plomo mediante trituración y formación de pastas que luego son clasificadas por gravimetría flotación. Es considerado como principal causante de enfermedades

		respiratorias. Los usos son en fabricación de estructuras metálicas con recubrimientos anticorrosivos para la construcción, otros usos son en la industria automotriz para proteger de radiaciones, también es usado como oxido de plomo en baterías, por último, en la elaboración de catalizadores para la industria de pinturas.
5	Zinc	Es un elemento abundante en nuestra corteza terrestre, además que es un mineral aprovechado por los seres vivos para su metabolismo, es posible encontrar como carbonato y óxido silicato, muy a menudo esta junto a compuestos minerales como la galena (sulfuro de plomo). Experimentos realizados con ratones durante un año con ingesta de zinc disuelto en agua, han determinado que no genera daños graves a la salud, la consecuencia más alta por zinc es anemia, llegando a ser un elemento necesario en concentraciones estables para el metabolismo del ser humano. Su utilización está muy estrecha a la corrosión del hierro, por lo que se utiliza como una protección para metales expuestos a la intemperie, además es usado en recubrimientos para barcos.
6	Hierro	Es un mineral abundante y está presente en varios compuestos que se encuentran en la naturaleza, muchos de ellos son fundidos para obtener el hierro metálico. En un nivel de toxicidad se encuentra clasificado por inhalación, ya que, durante el transporte, producción y fundición, sus procesos emiten polvos de hierro, los cuales pueden introducirse al cuerpo mediante la respiración, provocando neumonías y en concentraciones altas puede llegar a ser coproductor de cáncer. Los principales usos se dan en la industria metalurgia, para la obtención de materiales resistentes y con mayor durabilidad, en otros usos como un componente para aumentar la densidad de los líquidos en la extracción petrolífera.



La toxicología de dichos metales a lo largo del tiempo, en pequeñas trazas resultan graves para la salud del ser humano, esto se puede dar mediante concentraciones altas de metales en los alimentos, debido a malas prácticas agrícolas, otra manera, es por medio de explotación industrial, ya sean minerías que contaminan los ríos, así como por el vertido de aguas industriales directas a fuentes hídricas, también es posible por emisiones de quemas de combustibles fósiles, ya que estos contienen metales como cadmio, cromo, cobre, plomo y otros (Estrucplan, 2009). Es por esto que los metales descritos demuestran un alto nivel de toxicidad para los seres vivos, por lo que son capaces de afectar la salud y el ambiente. Para conseguir un control y seguimiento, los metales no deben sobrepasar los límites permisibles establecidos en las normas.

#### **1.4.6 Lixiviación**

Este es un proceso donde entra en contacto un sólido con un líquido, por lo cual se genera un lixiviado, líquido percolado que acarrea los contaminantes que emite un sólido. Se toma en cuenta que el principal acarreador de lixiviados es el agua, por lo cual el agua lluvia en escorrentías puede llevar contaminantes emitidos por lodos de PTAR, así también materiales que se encuentren en contacto directo pueden generar lixiviados, donde pueden encontrarse mezclada materia orgánica e inorgánica y metales pesados. En otro aspecto, los lixiviados son diferentes de acuerdo a la procedencia de los sólidos, ya sean provenientes de actividades domésticas e industriales, un ámbito muy poco estudiado es del sector de la construcción (Instituto Mexicano de Transporte, 2018).

Los análisis de lixiviados (TCLP), ayudan a determinar la transferencia de contaminantes de un sólido a un líquido, el cual ha sido extraído de cualquier material que tiene contacto con una sustancia acuosa, en este caso agua, además, es primordial analizar la presencia de metales pesados para conocer su nivel de toxicidad (Instituto Mexicano de Transporte, 2018).

Existen cuatro métodos para realizar los ensayos de lixiviados, estas metodologías son dadas por la EPA, y se encuentran establecido como una guía, la cual sirve como base para implementar los métodos más adecuadas para los análisis, así que se entregan estudios y técnicas que indican los procedimientos a realizar para un tipo de ensayo, dejando a libre implementación de las instrucciones que adopten y crean conveniente instaurar en los análisis que realicen los laboratorios, para así conseguir su autoría propia en estos tipos de ensayos para lixiviados (United States Environmental Protection Agency, 2020). Siendo así, se tienen las siguientes guías metodológicas:

- Método 1313 Partición líquido-sólido en función del pH del extracto utilizando un lote paralelo.
- Método 1314 Partición líquido-sólido como una función de la relación líquido-sólido para constituyentes en materiales sólidos utilizando un procedimiento de columna de percolación de flujo ascendente.
- Método 1315 Tasa de transferencia masiva de constituyentes en granular monolítico o compactado, materiales que utilizan un procedimiento de lixiviación de tanque semi dinámico.
- Método 1316 Partición líquido-sólido como función de la relación líquido-sólido en sólido, materiales utilizando un procedimiento de lote paralelo.

**Método 1315**, es un método que aplica en una variedad de materiales creados por cemento y se encuentran en una sola pieza, también se aplica a materiales granulares que hayan sido compactados, como suelos y sedimentos. Siendo así ideal para análisis de lixiviados en materiales de construcción como adoquines, tejas, bloques, etc. Pero no es aplicable en la determinación de liberación de elementos orgánicos volátiles, a excepción del carbón orgánico total. La metodología indica el procedimiento en un contacto directo de la muestra monolítica con agua en un estanque, donde la muestra debe mantenerse introducida en el agua con un tiempo que puede ser variable de acuerdo a la determinación técnica del analista, sin embargo, como base se tiene un intervalo de 14 días, la extensión del tiempo indicaría una liberación de lixiviados a largo plazo (EPA, 2017).

### 1.4.7 Fabricación de adoquines

Los adoquines son elaborados con una mezcla de cemento y agua, por lo que presentan un producto terminado de estructura maciza. Para la elaboración de los adoquines de hormigón se debe seguir las especificaciones técnicas detalladas en la Norma INEN 1488, (INEN, 1986).

#### Cemento

Proviene de una mezcla compuesta por piedra, arcilla y arena ferrosa que se someten a altas temperaturas y después se mezcla con yeso para obtener dicho producto. El cemento Portland es el más utilizado pues cumple las especificaciones establecidas en la norma INEN 152 Cemento Portland Requisitos, (INEN, 1986).

## **Áridos**

Elementos importantes para la mezcla ya que ocupan del 70 al 80 % del volumen del concreto, son los responsables de la resistencia a la aplicación de cargas, disminuyen las retenciones por fraguado y además hace que el producto final sea de mejor calidad y durabilidad, (INEN, 1986).

Los áridos deben cumplir con la norma INEN 872 Áridos para hormigón. Estos requisitos son:

**Agregado fino:**

Arena natural, fabricada o una combinación entre ellas, se caracterizan por ser redondas, duras y de buena calidad. Además, debe estar libre de cantidades de impurezas orgánicas. Por medio del análisis granulométrico se determina que el árido fino no debe tener más de 45% pasante en cualquier tamiz, y además su módulo de finura no debe ser menor que 2,3 ni mayor que 3. Cabe destacar que se usa como llenante y se debe usar una cantidad adecuada ya que si falta o sobre pasa de arena esto afecta en la relación de agua-cemento, (INEN, 2011).

**Agregado grueso:**

Grava, grava triturada, piedra triturada o una combinación de estos. Estos agregados se caracterizan porque si no cumplen con los requisitos de dicha norma mencionada pueden ser utilizados siempre que el proveedor demuestre que el concreto elaborado con esos áridos de la misma fuente ha tenido un desempeño placentero y una resistencia deseada, (INEN, 2011).

## **Agua**

El agua es sumamente importante para la mezcla y curado. La función del agua consiste en hidratar al cemento haciendo que este desarrolle su capacidad ligante y se obtenga propiedades físicas y mecánicas del material. Para ello se debe usar agua potable en buen estado sin que se encuentren impurezas como materia orgánica, algas, lodo, aceites y entre otros, puesto que pueden ocasionar retardo en el fraguado y un deterioro gradual del hormigón. Los límites máximos permisibles para contenido inorgánicos son amplios, pero se puede proporcionar una guía sobre niveles permisibles de algunas impurezas. En aguas naturales se presentan iones como: calcio, bicarbonato, nitrato, magnesio, potasio, sodio y carbonato no deben ser mayor de 2 g/l ppm; los cloruros no deben exceder de 0,5 g/l; sulfatos no exceda de 1 g de óxido de azufre (SO<sup>3</sup>) /l, (Rivera López, 2013).

## **PROCESO DE ELABORACION**

### **Dosificación**

La dosificación depende del tipo de adoquín que se desea fabricar pues la cantidad de cemento y aditivos varían. Éstos deben garantizar adecuadas propiedades al producto final. La dosificación que se recomienda es de 1:3:1 (cemento arena: grava). Cabe destacar que la cantidad de agua para la aplicación del concreto no se encuentra especificada pues depende del grado de humedad de los otros materiales. Por lo tanto, el agua se recomienda agregar lentamente hasta obtener las características esperadas del concreto, (Cabezas Fierro, 2014).

### **Mezclado del material**

Una vez obtenido el concreto se procede a la mezcla de los materiales por medio manual o mecánico. La máquina mezcladora consta de un motor eléctrico, un tambor circular y una hélice encargada de mezclar los materiales deseados y gira a una velocidad de 20 rpm. Para la mezcla de materiales se empieza colocando el cemento y aditivos en seco hasta obtener una contextura de color uniforme, seguidamente se añade agua y se continua con la mezcla alrededor de 4 minutos con el fin de conseguir una pasta, (Cabezas Fierro, 2014).

### **Vibro-compactación**

Luego de obtener la pasta, no se debe dejar pasar mucho tiempo desde su finalización hasta la máquina de vibro compactación la cual se encuentra equipada con un molde de dimensiones del adoquín que se desea fabricar con su respectiva prensa, esto se debe realizar inmediatamente para evitar que dicha pasta se seque o presente inicios de fraguado. Los moldes que se utilizan deben estar limpios; debajo de estos moldes se coloca un tablero donde descansan los futuros adoquines. La vibro compresión es un proceso que consiste en la superposición de la pasta en los moldes metálicos de adoquines, para posteriormente comprimir a una determinada presión durante un tiempo de 14 segundos, cabe resaltar que el tiempo de vibración y compactación dependerá de la resistencia que se desea obtener del adoquín. Al finalizar el proceso se retira el exceso de material del molde con una escobilla manual y se continua con la compactación hasta obtener la altura deseada del adoquín. Finalmente, se desmoldan los adoquines con mucha precaución para no deformarlos, (Cabezas Fierro, 2014).

### **Secado al aire libre**

Luego de que los adoquines son desmoldados se transportan al área de secado libre. Este proceso dura entre 4 a 8 horas, también se recomienda levantar los adoquines del tablero al día siguiente de su fabricación, (Cabezas Fierro, 2014).

## **Fraguado**

Consiste en el endurecimiento del adoquín mediante la reacción química entre el cemento y el agua. Para ello se deben regar diariamente los adoquines con el propósito de conservar la humedad del concreto. Para que este proceso sea exitoso es necesario colocar los adoquines a una separación prudente para que se puedan empapar totalmente por todos sus lados. Por otra parte, el clima es un factor muy importante durante el proceso ya que se recomienda una temperatura de 20°C con el fin de evitar pérdidas de humedad por evaporación. Además, el tiempo de fraguado en los primeros 7 días desarrolla alrededor de un 80% de resistencia especificada para los 28 días, una vez culminado este tiempo se pueden realizar el ensayo de compresión. Cabe mencionar que si se desempeñó con un curado apropiado se podrá realizar lo mencionado anteriormente, de no ser así se obtienen bajas resistencias y manifestación de grietas en el concreto, (Cabezas Fierro, 2014).

## **Almacenamiento**

El producto final debe almacenarse en un lugar limpio y protegido de los factores ambientales, de lo contrario, se puede tapar con lonas o plástico. En cuanto los arrumes no deben sobrepasar los 1.50 metros para evitar que el material se derrumbe y facilitar una buena manipulación de estos. Los adoquines deben ser colocados encima de unos tableros de madera para evitar que obtenga humedad por capilaridad, (Cabezas Fierro, 2014).

## **METODOS DE FABRICACION**

Los adoquines en su mayoría son elaborados en máquinas semi - manuales que contienen diferentes moldes de metal; hoy por hoy en las fábricas ecuatorianas se están posicionando las máquinas automáticas para la facilidad y rapidez de obtener este producto, (Chaluiza Charro, 2012).

### **Método manual**

Se caracteriza por realizarse de manera manual o con herramientas básicas, como moldes artesanales ya sean de madera o metal y herramientas manuales, para esto requiere mucho de la fuerza humana. Los procesos de elaboración de adoquines son realizados sin mayor control lo cual el producto final no cumple con las normas de calidad. Este método se utiliza en zonas rurales, (Chaluiza Charro, 2012).

### **Método semiautomático**

Los procesos se deben realizar por los trabajadores y estos deben controlar la maquinaria. Para la dosificación los trabajadores deben colocar el material en la mezcladora, una máquina que es promovida por un motor eléctrico y la cual entrega una mezcla homogénea. El moldeo

también lo realizan los obreros ellos se encargan de trasladar el material con ayuda de palas desde la mezcladora hasta la máquina vibro-compactadora. El desmolde se realiza por un mecanismo de acción manual y el transporte de los adoquines también lo realizan los trabajadores los cuales se encargan de llevar hacia al área de secado. Cabe destacar que este método es más manejado en el país, (Chaluiza Charro, 2012).

### **Método automático**

En este método no se necesita la intervención de trabajadores para la elaboración de adoquines, más que solo para un control simple y verificación de que todo el proceso se realice correctamente. Estos procesos son controlados por computadoras. Desde la dosificación hasta obtener el producto final, (Chaluiza Charro, 2012).

## **1.4.8 Agregados utilizados en la fabricación de elementos de construcción**

Los materiales utilizados para la construcción conforman una parte fundamental en las características físicas e hidráulicas que se requieren para entregar un elemento con cualidades técnicas que aprueban su función en diversos usos. Los agregados conforman desde un 65% a un 85% para concreto hidráulico. El aumento de la construcción de edificaciones hace que se intensifique la obtención de agregados, ya sea por medio natural en minas o dragados de ríos, también puede ser por trituración y explotación, procesos trabajados por el ser humano. La principal obtención de los agregados proviene de la corteza superficial de la tierra (Gutierrez, 2003).

### **Agregados utilizados en la construcción**

Los materiales pasan por procesos de tamizados, hasta llegar a una medida especificada por las normas de la construcción para la aplicación de agregados finos, los áridos son muy utilizados gracias a que en sus propiedades químicas son comúnmente inertes. Sin embargo, en 1946 empezaron estudios en los cuales se han determinado ciertas reacciones con compuestos que contiene el cemento, en específico con el álcali, con el cual se crean reacciones llamadas álcalis-sílice, estos compuestos tienden a hidratarse y aumentar su tamaño, debido a la expansión que se genera dentro del concreto, este llega romperse y se agrietan llegando a deformarse (Gutierrez, 2003).

Las propiedades físicas de los materiales se entienden más por su tamaño, forma y porosidad, estos términos ayudan a seleccionar los materiales aptos para los diferentes usos

en concreto hidráulico. El tamaño es clasificado por medio de una serie de tamices, los cuales van pasando de un mayor orificio a un menor, dando como resultado la separación de diferentes dimensiones. En cuanto a su forma se toma en cuenta su procedencia, muchos materiales pétreos tienen origen en ríos, aquellos obtienen formas redondeadas y esféricas, ya que los golpes que genera el agua en sus aristas generan un desgaste haciéndolas más lisas y redondas, por otro lado, existen también formas planas con aristas más finas, ya que provienen de explotación en canteras. Por último, la porosidad se encuentra de la mano con la absorción de agua, esto es gracias a que los poros del material permiten mayor contenido de agua en sus orificios, lo que indica el aumento de humedad en los agregados (Gutierrez, 2003).

### Resistencia mecánica del agregado

La resistencia de los materiales, en específico de la piedra triturada, la cual es usado en la elaboración de diversos elementos de construcción, su resistencia del material se encuentra ligado a la compresión que es capaz de aguantar un elemento en diferentes usos (Gutierrez, 2003). La resistencia de acuerdo al tipo de roca se encuentra clasificados en la **tabla 2**.

**Tabla 2** Resistencia a la compresión de acuerdo a cada tipo de roca

Fuente: (Gutiérrez, 2003)

ROCA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN kg/cm <sup>2</sup>
Gabro	150 – 300
Granito	70 – 250
Basalto	100 – 300
Diabasa	60 – 130
Dolomita	150 – 250
Caliza	10 – 70
Arenisca	20
Lutita	20 – 90
Gnesis	40 – 70
Mármol	50 – 80
Cuarcita	30 – 50
Esquistos	70 – 200

Por su clasificación se tiene tres conceptos para identificar la resistencia de la grava, roca o piedra.

**La Tenacidad** del material es dirigido hacia los impactos que puede soportar dicho elemento, la fuerza junto a la velocidad que es impactado hasta su ruptura, indican el valor de resistencia que es capaz de soportar (Gutierrez, 2003).

**La adherencia** es el término usado para conocer la capacidad que tiene el agregado para unirse con el cemento en una pasta de concreto hidráulico, su plasticidad generada por la mezcla de los elementos permite aumentar la resistencia del producto final (Gutierrez, 2003).

**La dureza** de los materiales permite comprender la resistencia a la deformación que puede tener un elemento en el paso del tiempo, esto es conocido como el desgaste que sufre un material cuando tienen roce o fricción entre dos elementos de iguales o diferentes propiedades (Gutierrez, 2003).

### **Materias primas del Cemento Portland**

Existen cuatro principales elementos primas que se requiere para la formación del cemento y son cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Esos materiales se encuentran en su forma natural, para la creación del cemento estos minerales se agregan junto con otros materiales que las contienen, siendo la caliza la que aporta cal y la arcilla en la que se contiene alúmina y óxido de hierro, en muchos casos para la dosificación exacta hace falta agregar materiales de forma directa, tal como es el caso del óxido de hierro, esto se lo hace al momento que se encuentra en la etapa de trituración del Clinker, de igual manera en muchos caso se agrega cal hidratada con el objetivo de retardar el tiempo de fraguado que tiene la mezcla cementante (Gutierrez, 2003).

## **1.4.9 Normativa nacional e internacional**

En Ecuador no existe una normativa que controle la calidad de lodos, por esto se utilizaron las normas internacionales para el presente proyecto: Agencia de Protección Ambiental (EPA), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) LIBRO VI ANEXO II. Para la fabricación de adoquines de hormigón se sigue las especificaciones técnicas de la norma del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Y por último para el control de calidad de adoquines: INEN, EPA, SEMARNAT y TULSMA LIBRO VI ANEXO II. A continuación, se detalla las normas mencionadas anteriormente:

### **Normativa para la evaluación de lodos**



Los lodos son primordiales para la elaboración de adoquines, son la materia prima por lo que se debe realizar primeramente una selección y muestreo de lodos para ello se utiliza la norma **INEN-ISO 5667**; en cuanto al control de calidad para poder producir los adoquines se emplea las normas: **40 CFR 503.13 EPA** que examinará la contaminación por metales pesados que se encuentran en los biosólidos e identificar cuales representan un riesgo y exceden los niveles; **SEMARNAT 004-20023** trata de los sólidos y biosólidos, la cual estipula las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. **TULSMA LIBRO VI ANEXO II** es la norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados

### **Normativa para la fabricación de adoquines**

Para la elaboración de los adoquines es importante seguir las especificaciones técnicas que se describen en la norma **INEN 1488** ya sea para peatonales y vehiculares. Y normas relacionadas con los materiales para la fabricación de adoquín como: **INEN 152** establece las características y requisitos que debe cumplir el cemento portland, también **INEN 490** se aplica a los cementos hidráulicos compuestos; **INEN 872** determina los requisitos de granulometría y calidad para los áridos finos y gruesos para utilizarlos en el hormigón. En cuanto a los métodos de ensayos de adoquines **INEN 3040**

### **Normativa para el control de calidad de productos de concreto**

La norma para la determinación de compresión en adoquines es la **INEN 1488** la cual especifica la resistencia del adoquín que debe cumplir. Por otra parte, al tratarse de la fabricación de adoquines por lodos se hace un ensayo de lixiviación para la verificación de algún contaminante que se libere en escorrentías entre ellas se encuentra: **40 CFR 503.13 EPA** examina los contaminantes orgánicos que se encuentran en los biosólidos para identificar si existe un riesgo para la salud humana y el ambiente; **EPA 1315** es un método de lixiviación que analiza la tasa de liberación de inorgánicos en material granular compacto; **SEMARNAT 004-2002** establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos; y **TULSMA LIBRO VI ANEXO II** mencionada anteriormente.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Visita técnica de campo

Con la finalidad de elaborar los adoquines se realizaron reuniones previas con los técnicos responsables de la PTAR, se hicieron visitas tanto a las estaciones de bombeo como a la planta ubicada en el km 3 vía el Auca, la cual se encuentra fuera del casco perimetral de la ciudad; con el objetivo de relacionar el volumen de agua residual y la remoción de lodos. Del mismo modo para identificar los puntos de muestreo, se recorrió la planta por todos sus procesos y se identificaron los tratamientos en los cuales existen mayor producción de lodo.

Los puntos de bombeo son 9 en total, con lo que se alcanza a cubrir en su totalidad, la cabecera cantonal de Francisco de Orellana. Estos puntos de bombeo son estaciones donde el agua residual es recolectada para luego ser impulsada a través de bombas sumergibles, las cuales operan con periodos de 8 horas de trabajo, alternándose para facilitar el bombeo y el mantenimiento de las mismas, **(ver figuras 4 y 5)**.



**Figura 4** Estación de bombeo de agua residual



**Figura 5** Bombas sumergibles de impulsión

La PTAR del cantón Francisco de Orellana cuenta con una extensión total de 50 ha, de las cuales solo 10 ha son utilizadas actualmente, y se encuentra en expansión para 4 lagunas de estabilización adicionales, hectáreas que servirán para aumentar el caudal de tratamiento, **(ver figura 6)**.



**Figura 6** PTAR Orellana

Al realizar las entrevistas con los gerentes de planta y los técnicos operativos, se recopiló información pertinente sobre administración, operación y mantenimiento. Así mismo, se pudo conocer que no se realizan análisis de lodos; por tanto, el punto más relevante está en la calidad visual de estos. Cabe recalcar que en primera instancia los lodos a utilizarse serían lodos húmedos y secos, en vista de no existir presencia de lodos secos del mismo lecho de secado debido a que se ha realizado un desalojo de la planta hacia el relleno sanitario en meses anteriores y de acuerdo a la poca producción de lodos en la PTAR, se tomó en cuenta realizar un muestreo en los desarenadores, punto donde se da mayor generación de lodos y arenas, las cuales son tratadas de la misma manera que en los lechos de secados, **(ver figuras 7, 8, 9 y 10)**.



**Figura 7** Lechos de secado



**Figura 8** Lodos, Lechos de secado



**Figura 9** Desarenador



**Figura 10** Arenas, Desarenador

## 2.2 Muestreo de lodos

Una vez terminado el reconocimiento del sitio, y localizados los puntos de muestreo dentro de la PTAR, se procedió a realizar la toma de muestras. Antes de iniciar con la actividad, se solicitó los análisis por parte del Consejo Provincial de Orellana, acudiendo a los laboratorios del área de Control y Prevención Ambiental, (**ver figura 11**). Concluido el proceso de solicitud se determinaron los parámetros de acuerdo a lo establecido por la norma de la EPA, con esta referencia se consideró las siguientes mediciones; humedad, pH, carbón orgánico total, conductividad, TPH (hidrocarburos) y metales pesados: zinc, hierro, cobre y níquel.



**Figura 11** Laboratorio LAB-GADPO

Las muestras fueron tomadas de acuerdo a los métodos que recomienda la norma INEN ISO-5667\_13 en complementación con la norma Mexicana SEMARNAT 004 2002 considerando las indicaciones propuestas por la norma se realizó el muestreo localizado en dos procesos de tratamiento de la planta, como son; lechos de secado y en el desarenador. Al momento de la toma de muestras, se evidenció que los lodos generados por la planta tienen un tratamiento natural, al aprovechar la luz solar y el extenso espacio para agrupar los lodos dentro del terreno dispuesto para la PTAR.

Para obtener una mejor apreciación de los resultados se tomaron muestras compuestas de los 6 lechos de secado y de los dos desarenadores, así mismo para observar la diferencia por parte de la composición de los lodos se realizaron análisis en muestras con lodo húmedo pertenecientes al lecho de secado y lodos secos que pertenecen al desarenador. Los lodos

fueron tomados en la fecha 25 de septiembre de 2020, con una temperatura climatológica de 25 grados, soleado, en las presentes coordenadas: zona 18N, X282810.61; Y9945564.02 a una altura de 246,90 msnm, **(ver figura 12)**.



**Figura 12** Muestras de lodo seco y húmedo provenientes de los lechos de secado y desarenador

Las muestras fueron transportadas por un transcurso aproximado de 15 minutos, desde la planta hasta el laboratorio del Consejo Provincial, donde las muestras fueron ingresadas a las 12:25 horas de la fecha antes mencionada. Los análisis fueron procesados durante un tiempo determinado de 5 días hasta la entrega del informe de resultados, **(ver figura 13)**.



**Figura 13** Entrega de muestras al laboratorio del GADPO

### 2.3 Análisis de parámetros de laboratorio

Las muestras enviadas a laboratorio llevaron un proceso de preparación para determinar la humedad, conductividad, pH, carbón orgánico, TPHS, y metales pesados: zinc, hierro, níquel y cobre. Los análisis se los realizó mediante los siguientes equipos y métodos, tal como se detallan en la **tabla 3**.

**Tabla 3** Equipos y métodos utilizados para análisis de lodos

Parámetro	Equipo	Método
pH	Potenciómetro	SM 4500-H+ B, 23rd Ed/PT-01
Conductividad	Potenciómetro	SM 2510 B, 23rd Ed/PT-02
TPH	Cromatografía de gases	Method TNRCC 1005-3-2001/ PT-06
Humedad	Balanza analítica, estufa	Gravimetría McKean, S. (1993). Manual de



		Análisis de Suelos y Tejido Vegetal-CIAT
Carbón Orgánico	Espectrofotómetro UV-VISIBLE	Espectrofotometría UV-Vis Anderson, J. & Ingram, J. (1993). Tropical Soil Biology and Fertility
Metales pesados; Zn, Cu, Fe, Ni	Espectrometría absorción atómica	SM 3030 B, 23rd Ed/PT-05

Por otra parte, se tomaron en cuenta los análisis realizados por el Municipio de Francisco de Orellana en el año 2018 y en el año 2020 cuyos resultados se presentaron dos parámetros que exceden los límites máximos permisibles, como son cadmio y plomo, cabe indicar que los análisis de estos parámetros no se los realizó en el presente proyecto, por motivos de aprovechamiento de recursos, ya que se encontraba cerca de la fecha anual programada en la que realiza los análisis el departamento de Agua y Alcantarillado del Municipio Francisco de Orellana. (ver figura 14 y 15).

Parámetros	Método de Ensayo	Referencia	Límite Máximo Permissible	Unidad	± 727	Incertidumbre (K = 2)
Cadmio	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	0,5	mg/Kg	1,60	± 25%
*Conductividad eléctrica	ITE-AQLAB-53	EPA 9050A	200	uS/cm	618,5	~
Hidrocarburos/Totales	ITE-AQLAB-56	EPA 418.1; ASTM D3976-92	< 150	mg/Kg	4 572,96	± 28%
Níquel	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	19	mg/Kg	14,5	± 19%
Plomo	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	19	mg/Kg	26,9	± 14%
*Potencial hidrógeno	ITE-AQLAB-52	EPA 9045 D	6 ± 8	~	4,05	~
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	ITE-AQLAB-55	EPA 8310, 3510 C, 3630 C	0,10	mg/Kg	< 0, 075	± 31%
*Relación de adsorción de Sodio-RAS	ITE-AQLAB-04/86	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	4	~	14,0	~
*Materia Orgánica	ITE-AQLAB-58	Gravimétrico	**	%	5,81	~

Fuente: Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la prevención y control de la Contaminación Ambiental.  
Norma de calidad ambiental y de descargas de efluentes: Recurso Agua: Acuerdo Ministerial N° 097-A 04 Noviembre 2015

**Figura 14** Análisis de lodos, PTAR. Municipio Francisco de Orellana 2018

Parámetros, métodos y resultados:

Parámetros	Método de Ensayo	Referencia	Límite Máximo Permisible (®)	Unidad	S 812	Incertidumbre (k=2)
Cadmio	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	0,5	mg/kg	1,23	± 25%
*Conductividad eléctrica	ITE-AQLAB-53	EPA 9050 A	200	uS/cm	105,1	-
Hidrocarburos Totales	ITE-AQLAB-56	EPA 418,1; ASTM D3976-92	<150	mg/kg	<100	± 28%
Níquel	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	19	mg/kg	11,9	± 19%
Plomo	ITE-AQLAB-04	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	19	mg/kg	28,7	± 14%
*Potencial hidrógeno	ITE-AQLAB-52	EPA 9045 D	6 a 8	-	4,16	-
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	ITE-AQLAB-55	EPA 8310, 3510 C, 3630 C	0,10	mg/kg	<0,075	± 31%
*Relación de adsorción de Sodio RAS	ITE-AQLAB-04/86	EPA 3050B, SM 3030 B, 3111B	4	-	3,9	-
*Materia Orgánica	ITE-AQLAB-58	Gravimétrico	**	%	2,5	-

**Figura 15** Análisis de lodos, PTAR. Municipio Francisco de Orellana 2020

## 2.4 Elaboración y clasificación de los adoquines

Los lodos seleccionados fueron trasladados como materia prima, desde la planta hacia la empresa de elaboración de adoquines, pequeña entidad que cuenta con los equipos necesarios para la fabricación, ubicado en el km 6 vía a Quito, por la transversal E20 que atraviesa el río Payamino. La materia prima inició el proceso de fabricación de adoquines mediante una primera fase de pesaje, para obtener esto, los cálculos fueron realizados de acuerdo a volúmenes y pesos más grandes, reduciendo hasta llegar a un mínimo necesario para cubrir una demanda de un tiraje de compactación por cada mezcla de chispa, cemento y lodo o arena, (**ver figura 16**).



**Figura 16** Medición en Kg de materiales, chispa, cemento y lodo para la elaboración del mortero

La materia prima utilizada para la creación del mortero se compuso de lodos, chispas y cemento (**ver figura 17**). El mortero se realizó según lo descrito por el fabricante, ya que no existe una dosificación exacta, se utiliza como base la pactada con la fábrica de adoquines, ya que cuentan con una dosificación óptima que les permite lograr una resistencia de más de 400 kg / cm<sup>2</sup>. Además de esto, se agregó agua, la cual se adiciona en función de la humedad de los materiales, hasta obtener una consistencia adecuada para la compactación en máquinas vibratorias.



**Figura 17** Materiales utilizados, cemento, chispa, lodo

Luego de realizar el pesaje y obtener los materiales con sus respectivas cantidades de dosificación como se observa en la **tabla 4 y 5**, se pasó a la realización del mortero, lo cual es realizar una mezcla homogénea entre lodo, cemento y chispa (**ver figura 18**), las cantidades presentadas en las tablas, representan mediciones que crean un volumen óptimo para la elaboración de un tiraje de compactación acorde a los moldes del equipo de fabricación de adoquines, luego pasaron a ser transportados hacia la máquina de compactación y moldeado.

**Tabla 4** Descripción de la cantidad en kg de materiales utilizados para la fabricación de adoquines con lodo húmedo

LODO HUMEDO		Peatonal	Vehicular
Porcentaje de lodo	Material	Peso (kg)	Peso (kg)
20%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	16	16

	Lodo	4	4
50%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	10	10
	Lodo	10	10
70%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	6	6
	Lodo	14	14

**Tabla 5** Descripción de la cantidad en kg de materiales utilizados para la fabricación de adoquines con lodo seco

LODO SECO		Peatonal	Vehicular
Porcentaje de lodo	Material	Peso (kg)	Peso (kg)
20%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	16	16
	Arena	4	4
50%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	10	10
	Arena	10	10
70%	Cemento	5	5.5
	Chispa/granulado 5mm	6	6
	Arena	14	14



**Figura 18** Homogenización de los componentes

Al obtener una mezcla homogénea de los componentes, se traslada hacia el equipo de compactación, donde se crea una vibración en los moldes, con el fin de adquirir una unión de los materiales y su debida consistencia, **(ver figura 19 y 20)**.



**Figura 19** Transporte de material hacia el equipo de compactación



**Figura 20** Equipo de compactación y moldeado

El equipo utilizado para la compactación y moldeado generó una vibración requerida para lograr la fusión de los materiales y de esta manera obtener los productos finales formados con sus respectivas dimensiones, **(ver figura 21 y 22)**.



**Figura 21** adoquín rectangular 20X10X6



**Figura 22** adoquín hexagonal 24X22X8

Concluida la fase de fabricación, se inició el curado del adoquín, lo cual consiste en el riego constante de agua sobre ellos, como se muestra en la **figura 23**, esto con la finalidad de mantener un fraguado de los componentes del cemento y crear un endurecimiento del producto final (Guzman, 2001). De acuerdo con la norma INEN-1488, el tiempo mínimo que debe permanecer el curado es de 28 días.



**Figura 23** Curado de los productos finales

Se creó una matriz para la clasificación del producto, como se muestra en la **figura 24**, esto mientras dura el tiempo de curado, lo cual se realizó en función de sus pesos y porcentajes utilizados de lodos. Esto para dar una mejor identificación visual, así mismo permite mantener un control y diferenciación adecuada durante el tiempo de endurecimiento hasta realizar el ensayo de compresión.



**Figura 24** Clasificación de los adoquines de acuerdo al porcentaje de lodo utilizado

## 2.5 Ensayos de compresión

Terminado el tiempo establecido de 28 días mínimo de curado, los adoquines obtuvieron la dureza necesaria para realizarse los ensayos de compresión y análisis de lixiviados, para ello los adoquines fueron transportados desde la ciudad de Orellana hacia la ciudad de Quito, con un transcurso de 6 horas y una distancia de 357 km, por lo que se hace una cama baja con elementos que contienen una contextura suave, en este caso se utilizó cartón y plástico, esto tuvo el objetivo de minimizar posibles daños a la estructura durante el trayecto, haciendo más seguro el traslado y reduciendo los riesgos y percances que pudieran generarse.

El laboratorio con el que se logró acordar la realización de los ensayos fue LEMSUR, el cual se encuentra dentro de Escuela Politécnica Nacional, en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Para conseguir el apoyo de la universidad fue necesario realizar diversos procesos de solicitud, lo cual tomó mayor tiempo del planificado en el cronograma del plan de tesis. Siendo así, una vez generado la aprobación por parte del decanato de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, se autorizaron los ensayos de compresión.

Los adoquines propuestos para el ensayo de compresión fueron entregados al laboratorio LEMSUR en la fecha 30 de octubre de 2020, en un total de 2 piezas por cada muestra, tanto de los adoquines hexagonales para resistencia vehicular, como también de los adoquines rectangulares que son para resistencia peatonal.



Los ensayos de compresión fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM C140/C140-18, norma aplicada por el laboratorio. Para realizar los ensayos, los adoquines pasaron por una preparación, donde requirieron igualar la superficie de los adoquines, los cuales en general tienen formas irregulares y esto impide que los moldes de compresión abarquen la superficie de las muestras en su totalidad, haciendo que existan errores en la medición. Para igualar esta superficie irregular, se creó una capa de cemento, el cual cubre toda la superficie de la cara superior del adoquín. A continuación, se muestra la capa creada para igualar las irregularidades de los adoquines, como se puede observar en la **figura 25**.



**Figura 25** capa de cemento para igualar imperfecciones del adoquín

Pasado el tiempo que llevó la preparación de los adoquines, se inició con los ensayos de compresión en la fecha 11 de noviembre de 2020. Las muestras de adoquines ingresan a equipos apropiados que pueden someter cargas capaces de romper un elemento de construcción, estos equipos tienen como función generar grandes presiones sobre una superficie, en este caso el adoquín. Las fuerzas empleadas fueron medidas en  $\text{kg/cm}^2$ , esto indicó la capacidad de resistir cierta cantidad de cargas empleadas en un área del elemento ensayado. Se observaron las pruebas de compresión realizadas a los adoquines y como los equipos ejercía presión sobre un elemento, véase en la **figura 26**.



**Figura 26** Equipo de compresión

Los ensayos de compresión fueron realizados hasta que exista una ruptura del elemento ensayado, siendo el rompimiento de la muestra lo que determina la capacidad total de resistencia soportada por el elemento, tal como se puede observar la ruptura con fisuras en la **figura 27**.



**Figura 27** Ensayo de compresión, visualización de la ruptura del elemento

## 2.6 Análisis de lixiviados

Para los análisis de lixiviados, el proceso inició con la preparación de las muestras, de acuerdo con la metodología de la EPA del apartado 1315, que sugiere que los materiales a analizarse deben ser sumergidos por separados en un estanque con agua destilada (**ver figura 28**), lo que permitió simular la escorrentía en el ambiente. El tiempo propuesto por la técnica de obtención de líquido lixiviado estima un periodo de 14 días, sin embargo, el tiempo propuesto por el laboratorio AQLAB, siguiendo su metodología intensifica el periodo a 30 días, con esto se pretende obtener un mejor resultado en los análisis (EPA, 2017).



**Figura 28** muestras en solución acuosa (agua destilada)

Para cumplir con la metodología se tomó una muestra por cada tipo de adoquín, los cuales se introdujeron en agua destilada en la fecha 5 de noviembre, dando inicio al proceso de lixiviación, donde se mantiene el cuidado de las muestras en un cuarto cerrado, para evitar la posible contaminación con agentes externos y se pudieran alterar los resultados.

Al observar los resultados de compresión se determinaron las muestras a analizarse en lixiviados, también se tomaron en cuenta los análisis de lodos realizados por el Municipio Francisco de Orellana, análisis solicitados por la Ing. Viviana Duchicela, con fecha 24 de octubre de 2018 y 21 de septiembre de 2020, además de los análisis realizados en el laboratorio del Concejo Provincial de Orellana, los parámetros a solicitarse fueron Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), esto debido a que fueron los parámetros que no cumplieron con los límites máximos permisibles según los resultados comparados con la norma ecuatoriana TULSMA.

Las muestras de lixiviados fueron tomadas en la fecha 4 de diciembre de 2020, llegando a ser la fecha prevista para cumplir con los requerimientos del laboratorio. El muestreo fue realizado de acuerdo a la norma SEMARNAT 004-2002 y la norma INEN-2176, con los debidos procesos de toma de muestras para lixiviados. Para ello, se realizó una muestra simple que consiste en la toma en un sitio determinado y solo una vez, debido a que cada muestra de adoquín se encontraba en diferentes estanques, **(ver figura 29 y 30)**.



**Figura 29** Toma de muestras de lixiviados



**Figura 30** Muestras de lixiviados de los 4 productos con mejor potencial de fabricación

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son evaluados en tres partes; calidad de lodos, calidad de adoquines y determinación de lixiviados, cada apartado cuenta con sus respectivas normativas aplicables como se describe en la **tabla 6**. Las muestras de lodos son tomadas y evaluadas según las normas de la EPA 503, SEMARNAT 004-2002 Y TULSMA LIBRO VI ANEXO II, mientras que para los adoquines se tiene las normas de requisitos y especificaciones de áridos utilizados para la fabricación de los adoquines, también es necesario aplicar las normas de calidad mecánica para el desarrollo de los ensayos de compresión y poder verificar su resistencia, estas normas aplicadas son INEN 1488, 3040, 872 y 152. Es necesario mencionar que los adoquines al ser elaborados con lodo residual como materia prima, es indispensable adicionar ensayos de lixiviados, con el fin de conocer si genera o no un impacto negativo al ambiente.

**Tabla 6** Clasificación de normas

<b>NORMA PARA CALIDAD DE LODOS</b>	
<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
40 CFR 503.13 EPA	Guía internacional de la regla de biosólidos de la EPA (Environmental Protection Agency) parte 503
SEMARNAT 004-2002	Norma oficial mexicana, protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
TULSMA LIBRO VI ANEXO II	Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados
<b>NORMA PARA CALIDAD DE ADOQUINES</b>	
INEN 1488	INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), establece los requisitos necesarios para la fabricación de los adoquines de hormigón, ya sean patentados o rectangulares, empleados en la pavimentación de áreas transitadas por vehículos y peatones

INEN 3040	INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), adoquines de hormigón, requisitos y métodos de ensayo
INEN 872	INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), áridos para hormigón, requisitos
INEN 152	INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), cemento portland, requisitos
INEN 490	INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), cementos hidráulicos compuestos, requisitos
<b>NORMA PARA DETERMINACIÓN DE LIXIVIADOS</b>	
EPA 1315	Método tasas de transferencia masiva de constituyentes en granular monolítico o compactado, materiales que utilizan un procedimiento de lixiviación de tanque semi dinámico
40 CFR 503.13 EPA	Guía internacional de la regla de biosólidos de la EPA (Environmental Protection Agency) parte 503
SEMARNAT 004-2002	Norma oficial mexicana, protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
TULSMA LIBRO VI ANEXO II	Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados

### 3.1 Calidad de los lodos analizados en laboratorio

Los resultados de los análisis dan a conocer que los lodos se encuentran dentro de los parámetros permisibles de las normas, EPA Y SEMARNAT, para la evaluación de la calidad de lodos. Adicional a normas internacionales, se realiza una inspección de la norma ecuatoriana vigente TULSMA, dentro de la cual entrega datos adicionales sobre pH,

conductividad, COT y humedad. De acuerdo con Riveras (2018), es primordial tomar en cuenta las características de los materiales a usar, donde indica que la presencia de aceites, grasas y sales, perjudican la resistividad del concreto (Riveras, 2018). Debido a que las normas tanto ecuatorianas como internacionales no entregan información sobre calidad de lodos, se toma en cuenta la norma 40 CFR 503.13 EPA, TUSMA LIBRO VI ANEXO II y SEMARNAT 2002. Es necesario mencionar que los parámetros analizados indican si es factible o no la creación del mortero y sean factibles para la fabricación de los adoquines.

Los resultados obtenidos por las muestras indican que existe mayor contenido de materia orgánica en la muestra de lodo húmedo, a diferencia de la muestra de lodo seco en la cual sus valores son más bajos, como se observa en la **figura 31**. Además es preciso indicar el exceso de hierro contenido en ambas muestras. Este mineral incluso teniendo valores altos de concentraciones no presenta riesgo a la salud, sin embargo, en cuanto a la fabricación de adoquines tiende a reaccionar con los componentes del cemento colaborando en la viabilidad de fortalecimiento del concreto (Gutierrez, 2003).

Parámetro	Unidad	Resultados	
		Lodo húmedo	Lodo seco
Potencial Hidrógeno	-	4,60	4,24
Conductividad Eléctrica	μS/cm	214,6	93,52
Cobre	mg/kg	74,50	32,36
Hierro	mg/kg	17510,21	13844,76
Zinc	mg/kg	129,79	36,64
Níquel	mg/kg	11,54	12,23
Hidrocarburos Totales de Petróleo	mg/kg	<100,00	<100,00
Carbón Orgánico Total	%	2,02	0,51
Humedad	%	54,86	6,53

**Figura 31** Resultados de análisis realizados en la muestra de lodo húmedo y seco

Fuente: GADPO

Se incluyen los resultados de los análisis realizados por la Municipalidad de Francisco de Orellana, los cuales indican un exceso de los niveles permitidos por las normas, estos metales son cadmio (Cd) y plomo (Pb) como se observa en la **figura 32**. Por lo que dichos metales fueron puestos a prueba para su encapsulamiento mediante el aprovechamiento del lodo residual como materia prima en la fabricación de adoquines de construcción.

Parámetro	Unidad	Resultados	Límite máximo permisible ®
Cadmio	mg/kg	1,23	0,5
Conductividad Eléctrica	μS/cm	105,1	200
Hidrocarburos Totales	mg/kg	<100	<150
Níquel	mg/kg	11,9	19
Plomo	mg/kg	28,7	19
Potencial hidrógeno	-	4,16	6-8
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	mg/kg	<0,075	0,10
Relación de adsorción de Sodio RAS	-	3,9	4
Materia Orgánica	%	2,5	**

**Figura 32** resultados de muestra de lodo, realizado por el departamento de Agua y Alcantarillado, Municipio Francisco de Orellana

Los metales Pb y Cd, al tener procedencia de industrias de pinturas, metalurgias de galvanizado, se puede asumir posibles procedencias de industrias que ese encuentran presentes dentro de la ciudad el Coca, compañías grandes como Halliburton y más pequeñas como gasolineras, empresas de pinturas, lavadoras pueden contribuir en el incremento de estos metales, los cuales en los procesos de tratamiento de aguas residuales son desechados en lodos, donde la movilidad de dichos metales se sujeta al potencial hidrógeno y presencia de materia orgánica, por conveniencia los lodos con mayor acidez permite mayor solubilidad del cadmio el cual puede ser transmitido a las plantas cuando se usan los lodos en la agricultura, esto puede ocasionar daños a la salud. También se puede dar relación a la presencia de plomo por su uso en la protección para corrosión de metales y elaboración de pinturas. Todos estos factores permiten las concentraciones de plomo y cadmio en los lodos analizados.

### **3.2 Comparación de resultados con la normativa internacional**

En la actualidad Ecuador no cuenta con una normativa que controle los límites máximos permisibles para lodos residuales por ello adopta normas internacionales las cuales son consideradas aplicables por la Autoridad Ambiental Nacional. Normas como la 40 CFR 503.13 EPA de Estados Unidos y la norma mexicana SEMARNAT 004-2002 son las más utilizadas para el uso o eliminación de lodos residuales.

**En la tabla 7**, se indican las concentraciones máximas permisibles de las normas mencionadas anteriormente y los resultados de los análisis de los lodos de la PTAR del municipio de Francisco de Orellana.



**Tabla 7** Límites máximos permisibles

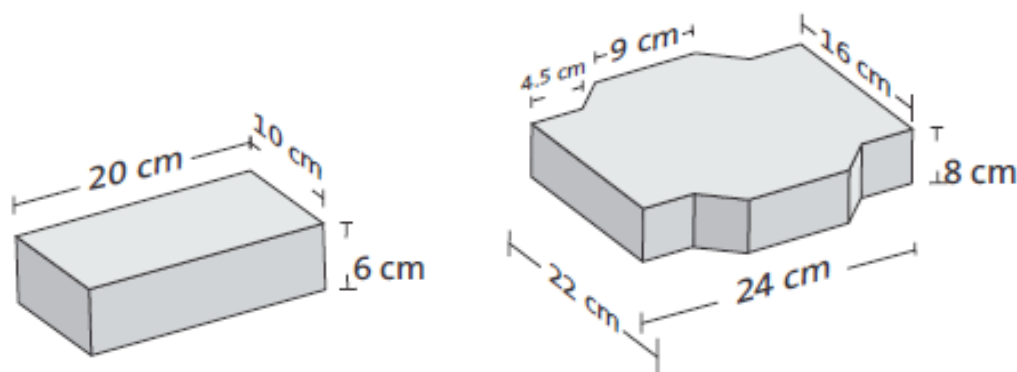
PARAMETRO	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			UNIDAD	RESULTA	RESULTA	UNID AD
	SUELO	BIOSÓLIDO			DOS muestra húmeda	DOS muestra seca	
	TULSMA	EPA	SEMARNAT				
Potencial hidrógeno	6-8	-	-	-	4.60	4.24	-
Conductividad eléctrica	2	-	-	-	214.6	93.52	μ/cm
Cobre	30	4300	1500	mg/ kg	74.50	32.36	mg/ kg
Hierro	-	-	-	-	17510.21	13844.76	mg/ kg
Zinc	60	7500	2800	mg/ kg	129.79	36.64	mg/ kg
Níquel	20	420	420	mg/ kg	11.54	12.23	mg/ kg
Cadmio	0.5	85	85	mg/ kg	1.23		mg/ kg
Plomo	25	840	840	mg/ kg	28.7		mg/ kg
Hidrocarburos Totales de Petróleo	-	-	-	-	<100	<100	mg/ kg
Carbón Orgánico Total	-	-	-	-	2.02	0.51	%
Humedad	-	-	-	-	54.86	6.53	%

Para la comparación de las concentraciones de los metales pesados de lodos se usaron las normas estadounidense y mexicana, se observa que dichos metales se encuentran dentro de los parámetros permisibles. Por lo tanto, los lodos se pueden considerar como lodos no peligrosos. En la tesis Gualato (2016) expone que los lodos proceden igualmente de una planta de tratamiento de agua residual y sus resultados con respecto al análisis de metales tampoco superan los límites máximos permisibles. Sin embargo, la problemática que este presenta es con los patógenos presentes, lo que hace que sus lodos no sean estables y deben ser procesados por una estabilización alcalina hasta alcanzar un producto de clase A como se indican en la norma SEMARNAT 004-2002 (GUALOTO, 2016). Sin embargo, debido a que los patógenos no presentan inconvenientes en la fabricación de adoquines, no fue necesario realizar los análisis de microorganismos, esto se debe a que, dentro de la fabricación de adoquines, la pasta cementante crea un ambiente desfavorecedor por la pérdida de oxígeno, así como su pH ácido y temperatura elevada e incapacitan la vida de microorganismos, además de la presencia de ciertos metales pesados que minimizan la proliferación de ciertos patógenos.

Cabe mencionar que se tomó en cuenta la norma del TULSMA LIBRO VI ANEXO II, vigente en el país que se utiliza para la calidad ambiental del recurso suelo con el fin de tener una referencia local pero no es adecuada para el análisis de comparación con las otras normativas.

### 3.3 Fabricación de adoquines con los lodos producidos en la PTAR del cantón Francisco de Orellana

Para la fabricación de adoquines se realizaron diferentes geometrías como son los rectangulares y hexagonales para pavimentos peatonales y vehiculares. En cuanto a las dimensiones de acuerdo con INEN (1986) estipula que el tamaño del adoquín debe tener una relación longitud/ ancho en el plano no sea mayor de 2 y el espesor no deberá ser menor de 60mm ni mayor de 100mm, **Véase en la figura 33**. En cuanto al espesor mínimo se tiene que para un tránsito peatonal es 60mm de espesor, mientras que para un tránsito vehicular el espesor es de 80mm. La tolerancia del espesor nominal fue  $\pm 3$ mm. La tolerancia en longitud y ancho fue  $\pm 2$ mm de las medidas nominales.





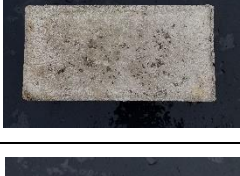




**Figura 33** Geometría y dimensiones

Los adoquines una vez fabricados fueron clasificados según su objetivo para ser utilizados, contenido de humedad, porcentaje de lodo utilizado y su dimensión que está acorde a su disposición final (**ver figura 34**). Además, se presentan como evidencias las fotografías de cada uno de los especímenes fabricados, por lo que dentro de la clasificación se observa el cambio de color según incrementa el reemplazo de lodo por chispa, es así que el cambio de color se convirtió en un indicador visual de la cantidad agregada de lodo residual, lo que se asume que a mayor coloración oscura, el adoquín cuenta con mayor cantidad de lodo residual, esto es más notable al utilizar lodo húmedo como materia prima (**ver tabla 8**). También, en la etapa de curado, la generación de humedad en el adoquín al momento de tener contacto con agua generó una reacción de los elementos químicos del cemento

haciendo una cristalización de los componentes, esto produjo que la plasticidad del mortero se solidifique y se dé un fortalecimiento de la consistencia del adoquín.

**Tabla 8** Clasificación de adoquines

TIPO	LODOS	% USADO	DIMENSIONES	FOTOS
PEATONAL	HUMEDO	20	20X10X6	
		50		
		70		
	SECO	20		
		50		
		70		
VEHICULAR	HUMEDO	20	24X22X8	






		50		
		70		
	SECO	20		
		50		
		70		



Figura 34 Clasificación de adoquines

### 3.4 Evaluación de la calidad del producto desarrollado basado en la Norma INEN 1488 y 3040 para ensayos de compresión y la guía metodológica de la EPA-1315 para análisis de lixiviados.

#### Ensayos de Compresión

Los ensayos de compresión son diseñados para evaluar el trabajo que puede llegar a soportar un determinado elemento, en este caso se evaluó el concreto, material del cual está constituido el adoquín (Ibertest, 2020).

Los requisitos mecánicos que los adoquines deben pasar para calificar su resistencia al trabajo, está definido por la normativa ecuatoriana INEN 1488, donde se menciona las resistencias mínimas en un tiempo establecido, y dependiendo del tipo de uso se tiene los valores que debe soportar un adoquín (**ver figura 35**).

Tipo de uso	No. de vehículos por día mayores de 3t brutas	Equivalente total de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio	Forma recomendada de adoquín	Resistencia característica (MPa) compresión a los 28 días
Peatonal	0	0	A,B,C	(20)
Estacionamiento y calles residenciales	0-150	$0-4,5 \times 10^5$	A,B,C	(30)
Caminos secundarios y calles y principales	150- 1500	$4,5 \times 10^5 - 4,5 \times 10^6$	A	(40)

Nota: 1 MPa = 10 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente

**Figura 35** Tipo de uso y resistencia para adoquines

Como referencia en la calidad de resistencia, se tienen dos estudios realizados con material reciclado, las investigaciones comprenden la utilización de lodo residual de anodizado de aluminio y otra investigación en el cual utilizan tereftalato de polietileno (PET). En ambos casos se obtuvieron resultados bajos en las pruebas de resistencia, sin embargo, en la investigación realizada con PET como materia prima los resultados son más favorables de acuerdo a la normativa colombiana NTC 121, donde se tienen resistencias menores a 100Mpa, por lo que dicha investigación considera el uso de PET como materia prima en la fabricación de adoquines (Di Marco Morals, 2015). Mientras que, en la investigación realizada con lodo residual del anodizado de aluminio, sus resultados consideran que los adoquines elaborados con dicha materia prima no alcanzan la resistencia aprobada por la normativa Ecuatoriana INEN 1488, por lo cual recomiendan el uso de estos adoquines solo para uso recreativo (Granda Mesias & Plaza Tapia, 2012).

En comparación a los estudios antes mencionados, los resultados de compresión obtenidos con los adoquines realizados con lodo residual de la PTAR del cantón Orellana, son más favorables para la utilización tanto en vías de alto tráfico como en circulación peatonal.

En la **tabla 9**, se ve el promedio de los resultados obtenidos por el número de muestras ensayados. Cabe mencionar que los números de muestras se vieron afectados debido a fallas mecánicas en la fase de fabricación, resultante de la inexperiencia en la manipulación y manejo de la maquina vibro-compactadora, por lo cual varios adoquines terminaron siendo desechados ya que no lograron ser conformados al momento de compactarse, sufriendo imperfecciones en su estructura. **(ver figura 36)**.

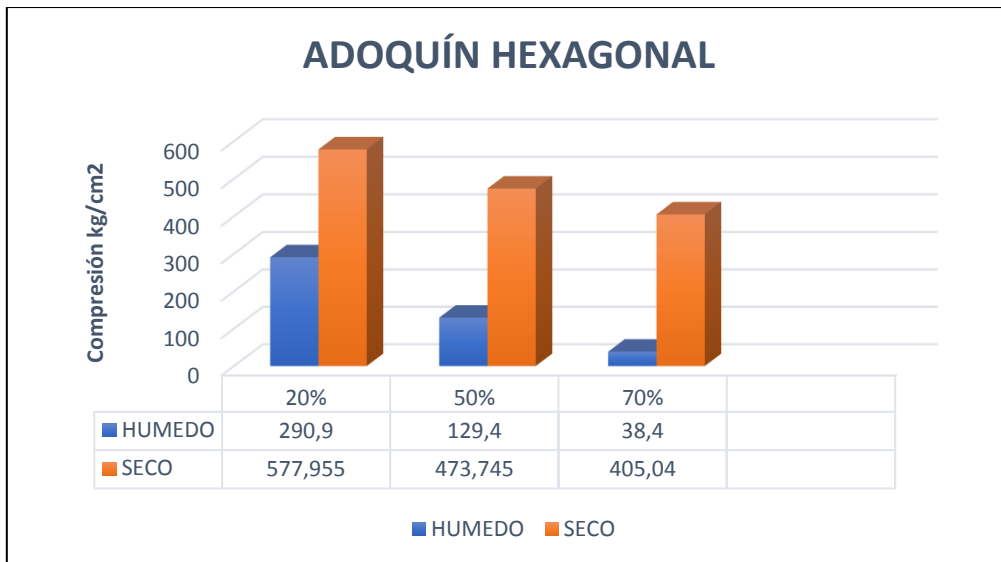


**Figura 36** Daños en la estructura del adoquín en fase de fabricación

**Tabla 9** Promedio de resultados de compresión

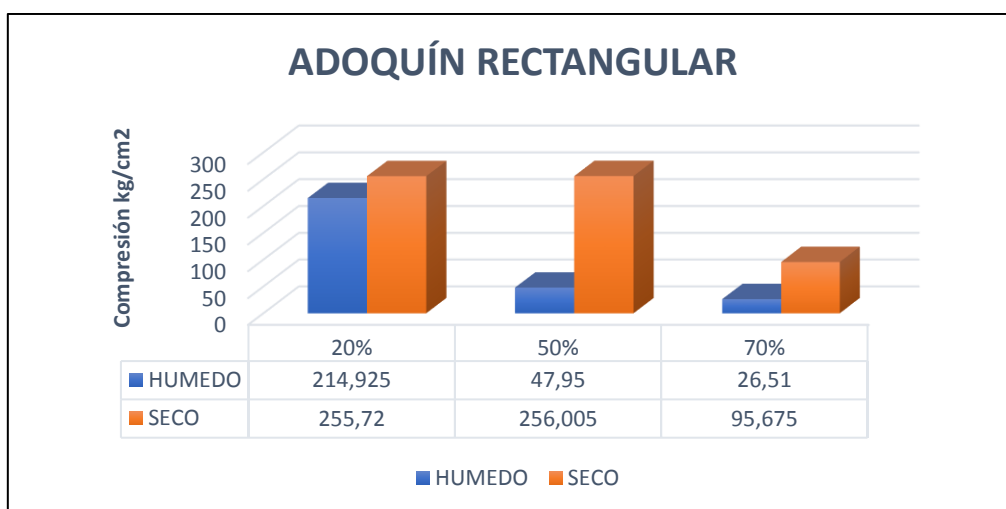
<b>ADOQUÍN HEXAGONAL PARA CIRCULACIÓN VEHICULAR</b>				
%	TIPO	COMPRESION kg/cm <sup>2</sup>		
		MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
20	SECO	637,19	518,72	577,955
50		438,68	508,81	473,745
70		373,39	436,69	405,04
20	HUMEDO	259,73	322,07	290,9
50		141,14	117,66	129,4
70		36,76	40,04	38,4
<b>ADOQUÍN RECTANGULAR PARA CIRCULACIÓN PEATONAL</b>				
20	SECO	209,81	301,63	255,72
50		334,32	177,69	256,005
70		86,52	104,83	95,675
20	HUMEDO	214,29	215,56	214,925
50		51,8	44,1	47,95
70		28,73	24,29	26,51

A continuación, se evidencia la diferencia que existe entre los adoquines elaborados con lodo residual húmedo y lodo residual seco. Como se observa en la **figura 37**, los adoquines dispuestos a la utilización en pavimento vial, obtienen resultados viables, de acuerdo con la norma INEN 1488, las resistencias comprenden de 200 hasta 400 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que los adoquines hexagonales en muestra seca sobrepasan los valores mínimos determinados por la norma. Mientras que, en los adoquines elaborados con lodo residual húmedo, solo los que contiene un 20% de lodo alcanzan esfuerzos que pasan los 200 kg/cm<sup>2</sup>. consecuentemente los adoquines con mayor porcentaje de lodo agregado bajan su calidad a la compresión.



**Figura 37** Resistencia a la compresión, adoquín hexagonal de 24X22X8

Los adoquines destinados a la utilización en circulación peatonal, obtienen resultados no favorables, a excepción de los adoquines fabricados con el 20% de lodo residual seco y húmedo encontrándose en resistencias entre 200 y 300 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que los elementos fabricados con el 50% y 70% de lodo húmedo no superan los 100 kg/cm<sup>2</sup>, a diferencia de los adoquines elaborados con lodo seco en el cual los especímenes fabricados con el 50% de lodo alcanzan valores superiores a 200 kg/cm<sup>2</sup> y los fabricados con el 70% de lodo no superan los 100 kg/cm<sup>2</sup> (ver figura 38).



**Figura 38** Resistencia a la compresión, adoquín rectangular de 20X10X6



## Análisis de Lixiviados

Los análisis de lixiviados comprendieron los metales cadmio y plomo, los cuales presentan un exceso en los análisis realizados por el Municipio Francisco de Orellana, a continuación, se presentan los resultados obtenidos (**ver tabla 10**).

**Tabla 10** Análisis de lixiviados de los productos finales

Muestra	Parámetro	Límite máx. permisible	Resultado acreditado por el SAE	Resultado dado por el equipo	Unidad
Adoquín 20% seco peatonal	Cadmio	0,02	<0,05	0,007	mg/l
	Plomo	0,5	<0,2	-	mg/l
Adoquín 20% húmedo peatonal	Cadmio	0,02	<0,05	0,003	mg/l
	Plomo	0,5	<0,2	-	mg/l
Adoquín 20 % seco vehicular	Cadmio	0,02	<0,05	0,002	mg/l
	Plomo	0,5	<0,2	-	mg/l
Adoquín 50 % seco vehicular	Cadmio	0,02	<0,05	0,003	mg/l
	Plomo	0,5	<0,2	-	mg/l

Las muestras de adoquines se escogieron por su promedio dado en resistencias por lo cual pueden ser utilizados en soporte vehicular y peatonal. Los resultados en lixiviados se encuentran bajo los límites máximos permisibles, entregando buenas condiciones para la reproducción del producto.

El encapsulamiento de los metales es logrado gracias a los componentes de la pasta cementante, con el cual se crea una inmovilización de los metales y evita su emisión al medio externo. Por otra parte, los resultados iguales en todos los análisis de cada muestra, es debido a la acreditación con la que cuenta el laboratorio Aqlab, por lo que en emisión de resultados acreditados no puede entregar con valores menores a la acreditación, sin

embargo, en datos extraoficial entregados por el laboratorio, los valores medidos por el equipo se obtiene resultados que se encuentran bajo el límite permisible.

Los resultados permiten fortalecer la viabilidad de implementar un nuevo aprovechamiento de los lodos residuales por medio de encapsulamiento en la fabricación de adoquines.

## **Evaluación de costo por fabricación de adoquines con lodo residual**

La presente evaluación consiste en una investigación nacional de los precios unitarios por cada material utilizado en la fabricación para elementos prefabricados de concreto, esto con el fin de comparar los costos que implica la fabricación de adoquines y observar la diferencia con la utilización de lodos residuales.

Es necesario mencionar que la evaluación de costo no es una profundización en un estudio de mercado, ya que simplemente se requiere un análisis superficial para el aporte en la fabricación como un método de aprovechamiento de lodos para una posible metodología a implantar tanto en la planta como en otros sectores que lo requieran de dicha investigación. También se considera que muchos de los valores son muy variables en el ámbito de la construcción, por esta razón los valores investigados y detallados son tomados de costeos realizados con diferentes empresas que proporcionan materiales de construcción, y se complementa con la experiencia adquirida en el proyecto estudiado para la cotización de los valores de cada material utilizado.

Cabe destacar que la factibilidad de aprovechamiento de la construcción de adoquines se da en la reducción de una costosa disposición final con un valor de 16,17 dólares americanos procedentes del servicio que presta el relleno sanitario a la PTAR, dicho valor resulta del volumen de 1,6 m<sup>3</sup> de lodos generados diariamente, para lo cual se usa el valor de la tarifa por m<sup>3</sup> de 10,11 dólares americanos, este costo es proporcionado por el relleno sanitario del Distrito Metropolitano de Quito, ya que no se cuenta con el precio por servicio del relleno sanitario de la ciudad de Orellana. Por otra parte, el volumen de lodo generado al día por la planta permite la fabricación de un total de 4004 adoquines peatonales con un 20% de lodo utilizado, 1204 adoquines vehiculares con un 20% de lodo y 640 adoquines con un 50% de lodo utilizado. Y en cuanto, a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se evitaría liberar una estimación de 305,93 kg/año CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>.

Los valores estimados para la fabricación del adoquín con el uso de lodos residuales como materia prima, se presentan en la **tabla 11**.

Tabla 11 valores de inversión por adoquín como producto final

ADOQUÍN 20% SECO PEATONAL					
material	valor U (\$)	cantidad por palé de 10 adoquines rectangulares	unidad	valor total 10 adoquines rectangulares (\$)	valor unitario adoquín rectangular (\$)
chispa/agregado fino (5mm)	0,038	16	kg	0,600	0,060
cemento	0,178	5	kg	0,889	0,089
agua	0,706	0,001	m <sup>3</sup>	0,001	0,0001
energía	0,091	0,083	kw/h	0,008	0,001
lodo	0	4	kg	0,000	0,000
mano de obra	0,547	0,166	h	0,091	0,009
<b>total:</b>				<b>1,59</b>	<b>0,16</b>
ADOQUÍN 20% HÚMEDO PEATONAL					
chispa/agregado fino (5mm)	0,038	16	kg	0,600	0,060
cemento	0,178	5	kg	0,889	0,089
agua	0,706	0,001	m <sup>3</sup>	0,001	0,0001
energía	0,091	0,083	kw/h	0,008	0,001
lodo	0	4	kg	0,000	0,000
mano de obra	0,547	0,166	h	0,091	0,009
<b>total:</b>				<b>1,59</b>	<b>0,16</b>
material	valor U (\$)	cantidad por palé de 4 adoquines hexagonales	unidad	valor total 4 adoquines hexagonales (\$)	valor unitario adoquín hexagonal (\$)
ADOQUÍN 20% SECO VEHICULAR					
chispa/agregado fino (5mm)	0,038	16	kg	0,600	0,150
cemento	0,178	5,5	kg	0,978	0,244
agua	0,706	0,001	m <sup>3</sup>	0,0007	0,0002
energía	0,091	0,083	kw/h	0,008	0,002
lodo	0	5	kg	0	0
mano de obra	0,547	0,166	h	0,091	0,042
<b>total:</b>				<b>1,68</b>	<b>0,44</b>
ADOQUÍN 50% SECO VEHICULAR					
chispa/agregado fino (5mm)	0,038	10	kg	0,375	0,094
cemento	0,178	5,5	kg	0,978	0,244
agua	0,706	0,001	m <sup>3</sup>	0,0007	0,0002
energía	0,091	0,083	kw/h	0,008	0,002
lodo	0	10	kg	0	0
mano de obra	0,547	0,166	h	0,091	0,042
<b>total:</b>				<b>1,45</b>	<b>0,38</b>

Como se observan los valores en los productos finales son bajos, en cuanto a los lodos no se presume un valor debido a que no cuenta con un costo por parte de la PTAR, sin embargo, si se pretende producir el producto por parte de las autoridades, los costos se incrementan dependiendo de la fabricación, el tiempo de traslado, el transporte y demás factores que pueden integrarse. Así mismo, valores como agua, energía y mano de obra dependerán de los cambios en precios públicos, valores, los cuales provienen del gobierno central. Por esto se toman como referencias los datos de 3 entidades públicas como son Orellana, Santa Rosa y Quito, que manejan el abastecimiento de agua, con lo cual se realizó un promedio en m<sup>3</sup> de agua (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana, 2015), para valores de energía es tomado del pliego tarifario de las empresas eléctricas a nivel nacional (Cnel EP, 2019), y para los datos de mano de obra se toma en cuenta el salario básico unificado desglosado por horas (Ministerio de Trabajo, 2018).

A continuación, se observa la diferencia de valores entre adoquines de concreto y adoquines elaborados con lodos residuales, los valores se realizaron según los productos finales. **(ver tabla 12).**

**Tabla 12** Comparación de precios por m<sup>2</sup> de adoquines

producto	dimensiones	unidades pallet m <sup>2</sup>	valor u	valor m <sup>2</sup>
prefabricado	10X20X6	50	0,16	8,00
prefabricado	22X24X8	20	0,44	8,80
20% seco peatonal	10X20X6	50	0,16	8
20% húmedo peatonal	10X20X6	50	0,16	8
20% seco vehicular	22X24X8	20	0,44	8,8
50% seco vehicular	22X24X8	20	0,38	7,6

Los resultados de costos por fabricación alcanzan valores similares a los prefabricados, a diferencia del adoquín con el 50% de lodo residual utilizado, que alcanza un valor menor, con el cual se puede trabajar para optimizar los costos, mientras, los demás adoquines su inversión se eleva hasta alcanzar el precio de mercado.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Los lodos muestreados de acuerdo a la norma técnica SEMARNAT 004-2002 de la PTAR de Orellana, son analizados para determinar la calidad del lodo inclinado hacia el favorecimiento en el concreto, el alto contenido de metales como hierro y cobre, al ser elementos comunes en la corteza terrestre, también son componentes que se encuentran en minerales como agregados de la construcción, por lo que presentan condiciones favorables para el uso en fabricación de adoquines, ya que los valores obtenidos en las muestras aportan a un mejor desarrollo del mortero.
- Los resultados indican una diferencia entre muestra seca y húmeda, por su reducción considerable en cuanto a materia orgánica. La conductividad eléctrica al decaer en la muestra seca favorece a la reducción de sales minerales que pueden minimizar la efectividad del concreto. Por otra parte, metales como cobre, hierro y níquel, no presentan una reducción considerable, sin embargo, estos elementos pueden colaborar en la reacción química que sufre el concreto al momento de fabricarse los adoquines, esto se debe a la composición que tiene el cemento tipo IP puzolánico.
- Los lodos analizados por el Municipio de Francisco de Orellana, obtienen resultados que exceden los límites máximos permisibles en parámetros como Cadmio y Plomo, los cuales son metales que pueden ocasionar serios daños a la salud y el ambiente.
- Las normas analizadas en el contexto utilizado para evaluar la calidad de lodos, resultan tener diferencias notables en los límites permisibles, como es el caso de la normativa local TULSMA LIBRO VI ANEXO II, norma que se direcciona a la aplicabilidad para suelos, mientras que normas internacionales son dirigidas hacia biosólidos, las cuales se acercan a la aplicabilidad de lodos para la cual está destinado el presente proyecto, con lo que se adquirió un punto de partida y su aplicación en campo.
- La fabricación de los adoquines cumple con las directrices establecidas por normativas INEN 1488, 872, para la aplicación de los requisitos de material estipulado por cada normativa. También se cumple su tiempo de fraguado acorde a la normativa INEN 1488 y exposición en sustancia acuosa para determinación de lixiviados según la EPA 1315 respectivamente.
- Los adoquines en su geometría no presentan una exactitud con las medidas y no cumplen con las tolerancias especificadas según la norma INEN (1986), la variabilidad más notoria se observa en adoquines que son fabricados con muestra de lodo húmedo, lo cual hace que el producto sea variable en sus dimensiones. Debido al

contenido de materia orgánica, se presume el posible asentamiento en la compactación del mortero, esto sucede por la plasticidad que no logra el mortero al mezclarse con minerales que presentan materia orgánica.

- Varios especímenes elaborados cumplen con las características ideales para su uso en vías de alto tráfico como en uso de circulación vehicular, entregando resultados de compresión satisfactorios que de acuerdo con la norma INEN 1488 sus esfuerzos sobrepasan los 400 kg/cm<sup>2</sup> y más usados para vías urbanas y rurales teniendo una mayor demanda en su aplicación por su gran resistencia.
- Especímenes de menor resistencia pueden ser utilizados en áreas recreativas ya que en su mayoría las muestras analizadas cumplen con resistencias entre los 200kg/cm<sup>2</sup> y son aptos para su aplicación.
- Los especímenes del 50% de lodo seco y 20% húmedo obtienen un resultado similar, pero es preferible abordar los adoquines con el 50%, ya que se puede ocupar mayor contenido de lodo y así reducir los volúmenes de lodo en la PTAR, además de retirar mayor concentración de metales pesados y reducir el impacto ambiental.
- Los 4 especímenes seleccionados que han cumplido con los demás ensayos y análisis con resultados viables cumplen con los parámetros de lixiviados en cuanto a emisión de contaminantes que pueden ocasionar daños al ambiente.
- Los resultados obtenidos por lixiviación se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, corroborando la aplicabilidad de los mismos en nuevos métodos de aprovechamiento de material residual.
- Los lodos provenientes de la planta de tratamiento del cantón Orellana pueden llegar a ser utilizados como materia prima en la fabricación de adoquines de acuerdo a los porcentajes estudiados y viables en su calidad y favorecimiento en la minimización de contaminación al ambiente.
- Los adoquines requieren una optimización para reducir costos por fabricación y así incluir en el mercado a menor precio y lograr un porcentaje a favor para llevarlo a gran escala y logre mayor factibilidad económica.

## **4.2 Recomendaciones**

- La participación de las diferentes autoridades es indispensable para lograr objetivos que permitan evaluar la viabilidad de nuevos productos con aprovechamiento de materia residual, y ser usados en varios sectores tanto públicos como privados.
- La calidad del lodo requiere ser más amplia dependiendo su utilización y hacia que destino se enfoca el estudio, así como su proveniencia del material a utilizarse.

- La metodología de fabricación puede ser mejorada con mayor tecnología y pruebas con diferentes agregados áridos, también con cambios en material cementante de varias empresas proveedoras.
- Las aplicaciones de encapsulamiento son posibles siempre y cuando la pasta que se genera en el mortero alcance la plasticidad requerida y endurecimiento en condiciones de fraguado.
- La fabricación de los adoquines requiere un costo monetario el cual puede optimizarse con recursos adecuados, lo que facilita la utilización de residuos que no cuentan con valores en su aplicación y reduce los costos por operación y destino final que generalmente ocasionan.
- Los análisis de lixiviados para una mejor comparación se recomiendan realizar por los dos procesos de extracción de lixiviados, la primera por sumersión en un tanque dinámico, y la segunda por trituración del espécimen.
- Se recomienda ampliar el alcance de los análisis para minimizar las variaciones de resultados y el desfase de errores. También es indispensable que la toma de muestras sea realizada por una misma persona en todos los muestreos, esto con el fin de reducir el error humano por el método y técnica utilizado por cada técnico responsable.
- La utilización de diferentes materiales residuales se recomienda ser aplicados a la misma metodología con ciertos cambios en la elaboración de adoquines de concreto con ciertas diferencias en las dosificaciones, con las cuales se puede variar.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Francisco de Orellana. (30 de Noviembre de 2020). *Francisco de Orellana*. Obtenido de Un cantón amazónico lleno de historia: <https://orellana.gob.ec/es/canton/datos-del-canton>

Alfayate Blanco, J. M. (2004). *Contaminación ambiental. Una visión desde la química: una visión desde la química*. Editorial Paraninfo.

Cabezas Fierro, M. I. (Febrero de 2014). *Elaboración de un manual de procesos constructivos del adoquinado*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7225/1/CD-5387.pdf>

- Chaluiza Charro, Á. M. (2012). *Repositorio digital*. Obtenido de Diseño de mezclas de hormaigón ensayos en agregados resistencia a la compresión simple módulo de roturo cantera San Joaquin propiedades físicas de los agregados calidad de los adoquines: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/386/1/T-UCE-0011-19.pdf>
- Cnel EP. (23 de Diciembre de 2019). *Cnel ep*. Obtenido de <https://www.cnelep.gob.ec/pliego-tarifario-2/>
- Comisión estatal de agua de Jalisco. (2013). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados*. Jalisco: Arturo Nelson Villarreal.
- Condorchem. (20 de Abril de 2019). *condorchem evintech*. Obtenido de <https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-lodos/?fbclid=IwAR1vkhIN3-BciEwpki-ftFMVUvSmMoBKsgMhj0Oz9MNHgWxkT6BR5o--yDI>
- Departamento de Ingeniería de la construcción, Universidad Politecnica de Cataluña. (18 de Diciembre de 2002). *utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales*. Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/324/372>
- Di Marco Morals, R. O. (2015). Diseño y elaboración de un sistema de adoquines de bajo costo y material reciclado para construcciones en núcleos rurales. *Esaica*, 30-38.
- EPA. (juio de 2003). *Environmental Regulations and Technology*. Obtenido de Control of Pathogens and vector Attraction in Sewage Sludge: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/control\\_of\\_pathogens\\_and\\_vector\\_attraction\\_in\\_sewage\\_sludge\\_july\\_2003.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/control_of_pathogens_and_vector_attraction_in_sewage_sludge_july_2003.pdf)
- EPA. (Julio de 2017). *LIQUID-SOLID PARTITIONING AS A FUNCTION OF EXTRACT pH USING A PARALLEL BATCH*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method\\_1313\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method_1313_-_final_8-3-17.pdf)
- EPA. (julio de 2017). *Method 1314: Liquid-Solid Partitioning as a Function of Liquid-Solid Ratio for Constituents in Solid Materials Using An Up-Flow Percolation Column Procedure* . Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method\\_1314\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method_1314_-_final_8-3-17.pdf)



- EPA. (julio de 2017). *Method 1315: Mass Transfer Rates of Constituents in Monolithic or Compacted Granular Materials Using a Semi-Dynamic Tank Leaching Procedure*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method\\_1315\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method_1315_-_final_8-3-17.pdf)
- EPA. (julio de 2017). *Method 1316: Liquid-Solid Partitioning as a Function of Liquid-Solid Ratio Using a Parallel Batch Extraction Procedure*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method\\_1316\\_-\\_final\\_8-3-17.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/method_1316_-_final_8-3-17.pdf)
- Estratégico, E. P. (2018). *Empresa Publica Ecuador Estratégico*. Obtenido de <https://www.ecuadorestrategicoep.gob.ec/francisco-de-orellana-el-coca-tiene-nuevo-sistema-de-alcantarillado-gracias-al-aporte-de-los-sectores-estrategicos/>
- Estrucplan. (29 de Mayo de 2009). *Estrucplan*. Obtenido de Metales pesados y su toxicología: <https://estrucplan.com.ar/metales-pesados-y-su-toxicologia/>
- Evangelista, C. (2012). *Control de sistemas no lineales por modos deslizantes de segundo orden*. La Plata.
- GADMFO. (2014-2019). *PDOT*. Obtenido de <https://www.orellana.gob.ec/docs/PDyOT%20GADMFO%202014-2019.pdf>
- García, N. O. (2006). *Lodos residuales:estabilización y manejo*. Obtenido de [http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf)
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana. (2015). *Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana*. Obtenido de Ordenanza que regula y controla el servicio de agua potable y alcantarillado sanitario del cantón Francisco de Orellana: <https://www.orellana.gob.ec/docs/Ordenanzas/ORD%20N%207-2015-REGULA%20Y%20CONTROLA%20EL%20SERVICIO%20DE%20GUA%20POTABLE%20Y%20ALCANTARILLADO%20SANITARIO.PDF>
- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana. (17 de Agosto de 2018). Obtenido de <https://www.orellana.gob.ec/es/sala-de-prensa/noticias/item/202-planta-de-tratamiento-de-aguas-servidas-cumple-importante-rol-ambiental>
- Granda Mesias, I. S., & Plaza Tapia, G. A. (Diciembre de 2012). *Repositotio Dspace*. Obtenido de Utilización de lodos residuales de una planta de Anodizado de Aluminio para la fabricación de ladrillos y adoquines: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6935>

- Granda, I. S. (Diciembre de 2012). *Utilización de lodos residuales de una planta de anodizado de aluminio para la fabricación de ladrillos y adoquines*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6935/1/AC-SGA-ESPE-047218.pdf>
- GUALOTO, J. J. (Diciembre de 2016). *Propuesta de Gestión de Lodos Residuales Municipales. Caso de Estudio: Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Parroquia Rural de Nono*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17066/1/CD-7650.pdf>
- Gunnar, N. (1998). Metales: propiedades químicas y toxicidad. En P. Jeanne Mager Stellman, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo II* (págs. 1-73). Ginebra: Chantal Dufresne, BA.
- Gutierrez, L. (Marzo de 2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia sede Manizales: [https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9302/9589322824\\_Parte1.pdf?sequence=10&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9302/9589322824_Parte1.pdf?sequence=10&isAllowed=y)
- Guzman, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Bhandar Editores LTDA.
- Holcim. (11 de noviembre de 2016). *Evolución de las normas para la fabricación de cemento*. Obtenido de <http://www.camicon.ec/wp-content/uploads/2015/11/EVOLUCIÓN-DE-LAS-NORMAS-Y-CONTROL-DE-CALIDAD.pdf>
- Ibertest. (9 de Diciembre de 2020). *Advanced testing solutions*. Obtenido de <https://www.ibertest.es/products/ensayo-de-compresion/>
- INEN. (Octubre de 1986). *INEN*. Obtenido de Norma INEN 1488: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1488.pdf>
- INEN. (Septiembre de 2011). *INEN*. Obtenido de Instituto Ecuatoriano de normalización: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>
- Instituto Mexicano de Transporte. (2018). *Pruebas de lixiviación como evaluación ambiental de materiales*. Obtenido de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt515.pdf>
- Khalajabadi, S. S. (abril de 2016). *Cenicafé*. Obtenido de La acidez del suelo, un limitante común para la producción de café: <https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0466.pdf>

- León, X. O. (2015). *Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil .
- Limón Macías, J. G. (8 de Julio de 2013). *Lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿problema o recurso?* Obtenido de [http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limón\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limón_trabajo_de_ingreso.pdf)
- M. Mahamud, A. G. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de tratamiento. *Ingeniería del agua*, 49.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2009). Obtenido de Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España: [http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_documento/lodos\\_depuradoras.pdf](http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_documento/lodos_depuradoras.pdf)
- Ministerio de Trabajo. (27 de Diciembre de 2018). *Ministerio de Trabajo*. Obtenido de Comunicado oficial: <http://www.trabajo.gob.ec/incremento-del-salario-basico-unificado-2019/>
- Moeller, G., & Tomasini, C. (2004). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Obtenido de Microbiología de lodos activados.: <https://www.gob.mx/imta>
- Proaño, P., Capito, L., Rosales, A., & Camacho, O. (2017). A dynamical sliding mode control approach for long deadtime systems. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* . IEEE.
- Pure water. (2019). *Pure Water*. Obtenido de <https://purewater.com.co/hierro-y-manganeso-en-el-agua/>
- Rivera López, G. A. (28 de Agosto de 2013). *Concreto simple*. Obtenido de Tecnología del concreto y mortero: [https://www.academia.edu/25800481/Tecnologia\\_Concreto\\_y\\_Mortero\\_Rivera](https://www.academia.edu/25800481/Tecnologia_Concreto_y_Mortero_Rivera)
- Riveras, A. F. (31 de Octubre de 2018). *Incidencia del ph del agua de mezclado en la resistencia a la compresión de concreto hidráulico*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22899/1/INCIDENCIA%20DEL%20PH%20DEL%20AGUA%20DE%20MEZCLADO%20EN%20LA%20RESISTENCIA%20A%20LA%20COMPRESIÓN%20DE%20CONCRETO%20HIDRÁULICO.pdf>
- Salazar, E. (2003). *Abonos organicos y plasticultura*. Bogota: UDC.

- Sanchez, P. A. (1981). *Suelos del trópico características y manejo*. Carolina del Norte: IICA Biblioteca Venezuela, 1981.
- Simon, E. (02 de Febrero de 2008). *Madrid blogs*. Obtenido de El agua: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
- Soto, C. F. (2016). *Efecto de la aplicacion de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo ácido de Loreto, Orellana*. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/8227/1/T-UCE-0004-49.pdf>
- TULSMA. (2017). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes:recurso agua*. Obtenido de Libro 6, anexo 1: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales el recurso desaprovechado*. Francia: Phoenix design aid.
- United States Environmental Protection Agency. (24 de Noviembre de 2020). *EPA*. Obtenido de Hazardous Waste Test Methods / SW-846: <https://www.epa.gov/hw-sw846/leaching-environmental-assessment-framework-leaf-methods-and-guidance#LEAF%20Methods>
- Vazquez, G. B. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. Reino Unido: IWA Publishing.
- Vázquez, n. S. (2016). *Propuesta de gestión de lodos residuales municipales*. Quito : EPN.
- Walker , J., Knight, L., & Stein, L. (Septiembre de 1994). *EPA*. Obtenido de A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biosolids-rule.pdf>
- Zambrano , X., Saltos, X., & Villamar, F. (2009). *ESPOL*. Obtenido de Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/240/1/378.pdf>