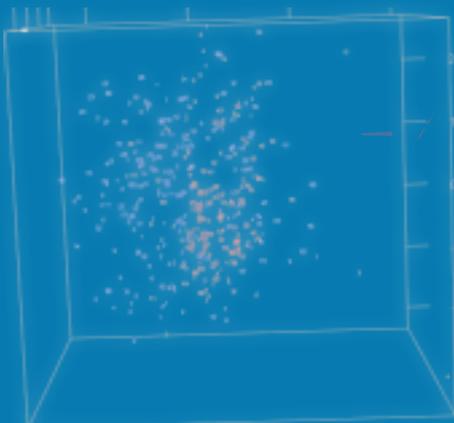
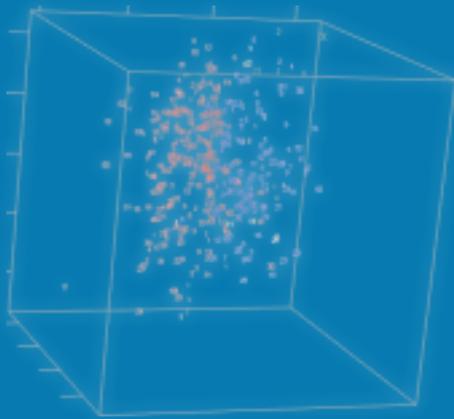
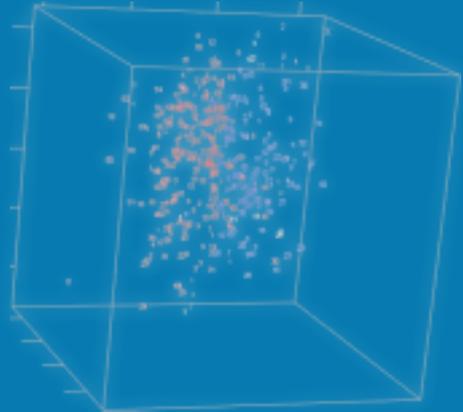
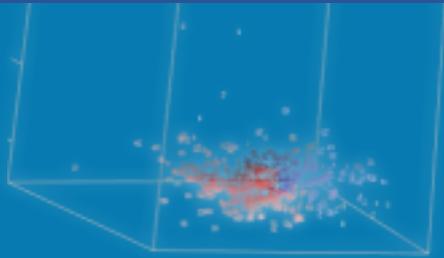


Perfiles



Perf: Número 27
Vol. 1 - 2022
ISSN: 2477-9105
Enero - Junio 2022



FÍSICA

MATEMÁTICAS

QUÍMICA

CIENCIAS BIOLÓGICAS

CIENCIAS DE LA SALUD

ENERGÍAS ALTERNATIVAS



Autoridades de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Byron Ernesto Vaca Barahona Ph.D.
Rector

Ing. Jenny Basantes Ph.D
Vicerrectora Académico

Ing. Pablo Vanegas Ph.D
Vicerrector de Investigación y Posgrado

Ing. Pablo Vanegas Ph.D
Vicerrectora Administrativo

Dr. Patricio Noboa Ph.D
Director Instituto de Investigaciones

Revista Internacional Arbitrada

Distribución libre

CORRESPONDENCIAS Y SUSCRIPCIONES

Revista Perfiles
Panamericana Sur, km 1½
Riobamba, Ecuador
Telef.: (593) (03) 2998200 ext. 161
e-mail: revistaperfiles@epoch.edu.ec

PERFILES (ISSN 2477-9105) es una revista científica semestral publicada por la
Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
ESPOCH
Riobamba – Ecuador
Año XXII
Número 27

CUERPO EDITORIAL

EDITOR

Celso Guillermo Recalde Moreno
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Email: crecalde672000@yahoo.com
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

CO-EDITOR

Víctor García
Universidad Nacional de Chimborazo (Riobamba, Ecuador)

Email: vgarcia375@gmail.com

COMITÉ EDITORIAL

Irene Del Carmen Gavilanes Teran
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

irene.gavilanes@esPOCH.edu.ec
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

Elio Giroletti
Università di Pavia (Pavia PV, Italia)

Email: elio.giroletti@unipv.it

Laszlo Sajo Bohus
Universidad Simon Bolivar

Email: lsajo@usb.ve
Departamento de Física (Caracas-Venezuela)

Janne Rojas
Universidad de Los Andes

Email: janne.rojas24@gmail.com
Facultad de Farmacia (Mérida-Venezuela)

Manuel Morales Yuste
Universidad de Granada

Email: yuste@ugr.es
Facultad de Farmacia (Granada-España)

Omaira Marquez
Universidad Nacional de Chimborazo (Riobamba, Ecuador)

Email: cgomarquez@gmail.com

Sabino Menolasina
Universidad de los Andes

Email: menolasina1960@gmail.com
Facultad de Farmacia (Mérida-Venezuela)

Salvador González Carcedo
Universidad de Burgos

Email: salva@ubu.es
Facultad de Ciencias (Burgos, España)

César A. Cisneros Ramírez-
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (La Habana, Cuba)

Email: cesar@ceter.cujae.edu.cu

David Jaramillo Abril
Servicios de laboratorio analítico mínimo (Western Australia, Australia)

Email: d_jaramillo10@hotmail.com

Jorge L. Mírez Tarrillo
Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú)

Email: jmirez@uni.edu.pe

Carlos F. Ávila Vega-
Universidad Técnica Equinoccial

Email: carlos.avila@ute.edu.ec
Facultad de Ciencias (Quito, Ecuador)

Cristian Vacacela Gomez
Universidad Yachay TECH (Ibarra, Ecuador)

Email: cristianvg7@gmail.com

COMITÉ CIENTÍFICO

Director

Jorge Efrén Silva Yumi
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

jorge.silvay@esPOCH.edu.ec
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

Miembros

Carlos Francisco Carpio Coba
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

ccarpio@esPOCH.edu.ec
Facultad de Recursos Naturales (Riobamba, Ecuador)

Gabriela Viviana Tubón Usca
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

gabriela.tubon@esPOCH.edu.ec
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

Gerardo E. Medina Ramírez
Universidad Estatal Amazónica

Email: medinag47@gmail.com
Escuela de Biología (Puyo, Ecuador)

Adriana C. Rincón Alarcón
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Email: rinconadri@yahoo.com
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

Morella L. Guillén Ferraro-
Universidad Nacional de Chimborazo

Email: morellaguillen@hotmail.com
Facultad de Ciencias de la Salud (Riobamba, Ecuador)

José Mejía López
Pontificia Universidad Católica de Chile

Email: jmejia@puc.cl
Facultad de Física (Santiago, Chile)

John Martin Evans
Universidad de Buenos Aires

Email: evansjmartin@gmail.com
Facultad de Arquitectura (Buenos Aires, Argentina)

Silvia de Schiller-
Universidad de Buenos Aires

Email: sdechiller@gmail.com
Facultad de Arquitectura (Buenos Aires, Argentina)

Natalí Alejandra Chávez Oleas-
Ministerio de Electricidad y Energía Renovable

Email: natalichavez87@gmail.com
Dirección de Aplicaciones Nucleares (Quito, Ecuador)

Freddy Benalcázar-
Universidad Técnica de Ambato(Ambato, Ecuador)

Email: f.benalcazar@yahoo.es

Revisor Texto en Inglés

Jorge Juan Villarroel Santillán-
Trabajador Independiente

Email: jjvillarroels@outlook.com

Diseño, Diagramación, Maquetación

Luis Mullo Chicaiza
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Email: luis_mulloch@yahoo.com
Facultad de Ciencias (Riobamba, Ecuador)

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece a los autores, Cristina Ramos Araujo y Hitler Guerrero Hidalgo, por las imágenes tomas para la portada de la revista, del artículo: **APLICACIÓN DEL CÁLCULO FRACCIONAL A UNA SERIE DE TEMPERATURAS DE LA ZONA ANDINA**, publicada en esta en **Perfiles 24 Volumen 1** del 2020.

CONTENIDO

PREDICCIÓN DE LA SITUACIÓN ACADÉMICA EN ALUMNOS DE PREGRADO USANDO ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING.

Jesús Eduardo Gamboa Unsihuay, Jesús Eduardo Gamboa Unsihuay.....4

ESTUDIO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS CONDICIONES DE TRANSFORMACIÓN EN LA VISCOSIDAD DEL POLIETILENTEREFTALATO (PET) RECICLADO.

Julio-Cesar Velázquez-Infante, Arles Vega García, Rosalia Esquivel Figueredo, Sandra Bárcenas Martínez, Hassan Martínez-Hung.....11

MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIPROPILENO RECICLADO MEDIANTE ADICIÓN DE FIBRAS VEGETALES, POLIETILEN TERFTALATO Y TRATAMIENTO TÉRMICO.

Paul Palmay, Sofía Sanipatin, Daniela Poalacin, Caterine Donoso.....19

DETERMINANTES GENÉTICOS Y SUS MECANISMOS DE ACCIÓN IMPLICADOS EN LA RESISTENCIA BACTERIANA A METALES PESADOS: UNA REVISIÓN.

Iza Guaman Joana Fernanda, Recalde Moreno Celso Guillermo, Iza Guaman Cristian Fabricio.....26

PERFILES DE SUSCEPTIBILIDAD ANTIMICROBIANA EN BACTERIAS AISLADAS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAMBO.

Ana Carolina González-Romero, María Guadalupe Guamán-Chabla, María del Carmen Cordovez-Martínez, Eliana Elizabeth Martínez-Duran.....39

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE ACCIDENTABILIDAD EN LA AVENIDA MARISCAL SUCRE, ENTRE LAS AVENIDAS, UNIVERSITARIA Y SAN FRANCISCO DE RUMIHURCO.

Rivera Alex I., León Mario G., Cabezas Juan F., Miranda Stalin J.....49

PLAN DEL CIERRE DE LA RELAVERA COMUNITARIA “EL TABLÓN”, PROVINCIA DEL ORO, ECUADOR.

Núñez Romero Jorge Alberto, Burbano Morillo Danny Santiago, Jácome Calderón Juan Francisco.....59

DESARROLLO DE ADOQUINES A PARTIR DE LOS RELAVES DE MINA..

Jácome Calderón Juan Francisco, Burbano Morillo Danny Santiago, Núñez Romero Jorge Alberto.....69

PREDICCIÓN DE LA SITUACIÓN ACADÉMICA EN ALUMNOS DE PREGRADO USANDO ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING.

Prediction of academic status in undergraduate students using machine learning algorithms.

Jesús Eduardo Gamboa Unsihuay , Jesús Walter Salinas Flores * 

Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Economía y Planificación, Departamento de Estadística e Informática, Lima, Perú.

*jsalinas@lamolina.edu.pe

Resumen

El rendimiento académico de un estudiante universitario generalmente se mide a través de sus calificaciones, las cuales derivan en una situación académica normal o deficiente, que a su vez depende de diversos factores. El objetivo de esta investigación fue encontrar los principales predictores de la situación académica de un estudiante universitario luego de que transcurrieron seis semestres desde su ingreso. Para el análisis de datos, se hizo uso del algoritmo Boruta para seleccionar variables predictoras y se aplicaron doce algoritmos de clasificación, previa partición de los datos en conjuntos de entrenamiento y evaluación. Luego, se eligieron aquellos modelos con mejores valores de sensibilidad, especificidad y balanced accuracy. Finalmente, se empleó un ensamble y un punto de corte óptimo para mejorar las predicciones. Los modelos con mejor desempeño fueron el de regresión logística, Naive Bayes y máquinas de soporte vectorial con kernel lineal. Al aplicar el ensamble con punto de corte óptimo se obtuvo especificidad de 0.695 y sensibilidad de 0.947. La nota obtenida en el curso de Matemáticas fue una de las más importantes para predecir la situación académica luego de seis semestres de estudios, mientras que las variables sociodemográficas no fueron relevantes.

Palabras clave: Ensamble, minería de datos, Boruta, corte óptimo.

Abstract

The academic performance of a university student is generally measured through grades, which derive in a normal or deficient academic situation, depending in turn on several factors. The objective of this research was to find the main predictors of a university student's academic status after six semesters have elapsed since admission. For data analysis, the Boruta algorithm was used to select predictor variables and twelve classification algorithms were applied, after partitioning the data into training and evaluation sets. Then, those models with the best sensitivity, specificity and balanced accuracy values were chosen. Finally, an optimal assembly and cut-off point were used to improve predictions. The models with the best performance were logistic regression, Naive Bayes and vector support machines with linear kernel. When applying the optimal cut-off assembly, the specificity was 0.695 and sensitivity 0.947. The grade obtained in the mathematics course was one of the most important predictors of academic status after six semesters of study, while sociodemographic variables were not relevant.

Keywords: Ensemble, data mining, Boruta, optimal cut-off.

Fecha de recepción: 28-08-2021

Fecha de aceptación: 14-09-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

En Perú, un estudiante universitario de pregrado es aquel que ha concluido sus estudios de educación secundaria, ha aprobado el proceso de admisión a una universidad, ha alcanzado vacante y se encuentra matriculado en ella. Así, la Universidad Nacional Agraria La Molina de Lima, Perú (UNALM), es una institución educativa que brinda formación en 12 carreras universitarias de pregrado relacionadas al uso y gestión de recursos agropecuarios y la conservación del medio ambiente, organiza procesos de admisión semestrales, mediante los cuales los postulantes buscan alcanzar una vacante para acceder a los estudios universitarios, a través de la resolución de un examen que mide sus conocimientos.

El proceso de admisión se puede dividir en tres etapas: inscripción, examen y asignación de vacantes. En la etapa de inscripción, el postulante, además de brindar sus datos entre los que se encuentra la modalidad de ingreso, la cual se define según los requisitos que el postulante cumple, siendo las más comunes la de concurso ordinario, centro preuniversitario (CEPRE), primer y segundo puesto de colegio, y quinto de secundaria.

La segunda etapa consiste en el examen de admisión, el cual está compuesto preguntas concernientes a las áreas de Razonamiento matemático, Razonamiento Verbal, Matemática, Física, Química y Biología. Sin embargo, existen excepciones en cuanto a los postulantes de algunas modalidades quienes rinden un examen distinto: Traslados Externos y Graduados y Titulados y CEPRE. Finalmente, el proceso de asignación de vacantes se realiza en estricto orden de mérito para cada una de las modalidades del proceso de admisión, es decir aquellos que optaron por distintas modalidades no compiten por una misma vacante.

Luego de haber conseguido una vacante, el ingresante confirma su incorporación a la UNALM realizando su matrícula del primer semestre. En su condición de alumno matriculado y en función a su rendimiento académico, se le adjudica una de las siguientes situaciones académicas:

Normal, Observado, Suspendido, Prueba o Separado. La situación Normal es asignada automáticamente a los estudiantes de primer año (dos primeros semestres) y a aquellos que mantienen su promedio semestral en un valor mayor o igual a 11. Las demás situaciones académicas comienzan a regir a partir del tercer semestre. Así, un estudiante es Observado si su último promedio semestral es inferior a 11, y es Suspendido si sus 2 últimos promedios semestrales son inferiores a 11, lo cual le imposibilita la matrícula en el semestre académico siguiente. Luego de subsanar una observación, la situación académica futura puede volver a ser Normal, sin embargo, esto sucede después de subsanar una suspensión, su condición pasaría a ser Normal con antecedente. Finalmente, la situación de Prueba es aquella que presenta el estudiante que se matricula luego de una suspensión. Si en esta situación, vuelve a reportar un promedio semestral inferior de 11, pasa automáticamente a la situación de Separación académica, con la cual pierde la condición de estudiante de la UNALM.

En la literatura se pueden encontrar diversos estudios acerca del rendimiento académico en estudiantes universitarios. En el estudio llevado a cabo por Gómez-Sánchez, Martínez-López, Oviedo-Marín (10) se encontró que el sexo del estudiante y el semestre de estudios, así como su promedio y satisfacción con la carrera influyen en su desempeño académico. Por otro lado, Ocaña (22), en su investigación, lista un conjunto de potenciales variables académicas que tienen repercusión en el rendimiento académico, entre las que menciona las características del colegio de procedencia, el rendimiento en las pruebas de admisión, el desempeño universitario en el año previo al del estudio, la vocación, entre otras.

Por su parte, en la investigación realizada por Jiménez (14) se mencionan tres factores que inciden en el rendimiento académico: el sexo del estudiante, el acceso a becas y el nivel de uso de tecnologías de la información y la comunicación. Es así que diversos estudios señalan distintos factores que repercuten en el desempeño académico, a lo cual cabe mencionar, tal como lo hace Mora (18), que existe una gran cantidad de factores a los cuales no se suele tener completo acceso, tales

como el entorno familiar, laboral o de salud, pero que, a pesar de ello, la consideración de variables principalmente académicas es de utilidad para la toma de decisiones de los gestores universitarios. También se puede mencionar los trabajos sobre deserción universitaria realizados por Barragán (2), Calvache (3), Montserrat (17), Moreira (19) y Munizaga (20).

En la UNALM, Huertas y Bullón (13) desarrollaron un trabajo en el que evaluaron el rendimiento de los ingresantes del año 2000 luego de cinco años, es decir once semestres académicos después de haber ingresado, llegando a la conclusión de que el 11% logró culminar sus estudios y aproximadamente la mitad se encontraba en situación académica normal, además que la modalidad de ingreso no fue un factor diferenciador en el rendimiento académico.

En un estudio más reciente, llevado a cabo por Delgado (6), se analizó el rendimiento de los ingresantes de los semestres 2017-I y 2017-II mediante su nota obtenida en el curso de Matemática y la cantidad de créditos aprobados en su primer semestre de estudios universitarios. Luego de su análisis, concluyó que la nota de matemática del examen de admisión de la universidad fue la más importante para la clasificación del desempeño académico.

El objetivo de esta investigación consiste en encontrar las variables que permitan predecir la situación académica de un estudiante universitario (normal o deficiente) luego de que transcurrieron seis semestres desde su ingreso, usando algoritmos de Machine Learning.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la metodología CRISP (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), la cual es una metodología probada para trabajos de minería de datos e incluye seis fases que pueden apreciarse en la Figura 1 y que comprende: entendimiento del negocio, entendimiento de los datos, preparación de los datos, modelación, evaluación y despliegue de resultados. Estas fases son mencionadas por Cichosz (4) y Witten, Frank, Hall, Pall (25).

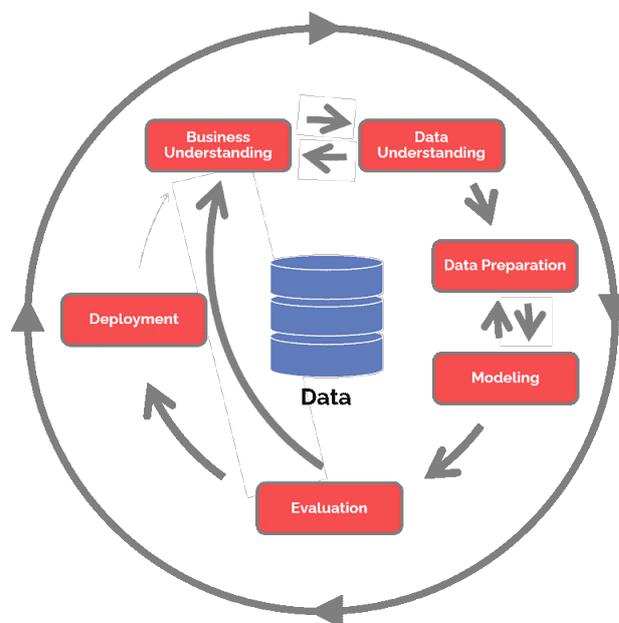


Figura 1. Fases de la Metodología CRISP (Data Science Process Alliance, 2020).

Unidad elemental y variables

Un estudiante que ingresó a la UNALM en los semestres 2017-I o 2017-II por cualquier modalidad excepto Graduados y titulados, Traslado externo y CEPRE, y que además cursó por lo menos un semestre de estudios. El conjunto de datos está compuesto por 622 unidades elementales.

La variable objetivo considerada para el modelo es la situación académica del estudiante 6 semestres después de haber iniciado sus estudios universitarios, la cual es una variable dicotómica que toma el valor 0 si la situación académica del estudiante es Normal u Observado, o 1 para todas las demás situaciones académicas. Las variables predictoras pueden ser agrupadas en tres categorías: sociodemográficas, relacionadas al examen de admisión y referidas al primer semestre de estudios.

Metodología Estadística

Se realizó un análisis descriptivo univariado y bivariado con las variables predictoras y la variable dependiente a predecir (situación académica) y se aplicó el algoritmo BORUTA para la selección de las principales variables predictoras. Este algoritmo duplica el conjunto de datos y mezcla los valores en cada columna. Lantz (16) denomina a estos valores como variables de sombra. Luego, entrena un clasificador usando el algoritmo Random Forest en el conjunto de datos y calcula

el Mean Decrease Accuracy o el Mean Decrease Impurity para cada una de las variables del conjunto de datos. Cuanto mayor sea el puntaje, mejor o más importante es la variable.

El conjunto de datos fue dividido asignando de manera aleatoria el 80% del total de registros para los datos de entrenamiento, y el 20% restante para los datos de evaluación, verificando que en ambas particiones la proporción de estudiantes por situación académica sea similar. Las variables numéricas fueron estandarizadas. Al tener un 84,41% de alumnos en situación académica normal y un 15,59% en situación académica No Normal, se realizó un balanceo de datos utilizando el algoritmo SMOTE, el cual está basado en el principio de oversampling que genera datos artificiales o sintéticos basados en las similitudes del conjunto de variables de la clase minoritaria usando el algoritmo de los vecinos más cercanos o k-nn. Estos algoritmos son descritos por Fernández, García, Galar, Prati, Krawczyk, Herrera (8) y Haibo y Yunqian (11).

Para la etapa de modelamiento se usó la validación cruzada 10-folds para la estimación y selección de hiperparámetros de los modelos. Se usaron los siguientes algoritmos, descritos por Gareth (9) y Hastie (12):

- Regresión logística
- K-NN
- Naive Bayes
- Árbol C5.0
- Árbol CART
- Bagging
- Random Forest
- Gradient Boosting Machine (GBM)
- XGBoosting
- Red Neuronal Perceptrón Multicapa
- Máquina de Soporte Vectorial con kernel lineal (SVL)
- Máquina de Soporte Vectorial con kernel radial (SVM)

Posteriormente, con los tres algoritmos que proporcionaron los mejores indicadores en el entrenamiento y que no estén correlacionados, se realizó un algoritmo de ensamble basado en el promedio de las probabilidades obtenidas y se mejoraron los indicadores usando el punto de corte óptimo sugerido por la curva ROC. Los

métodos de ensamble son técnicas para combinar varios algoritmos de aprendizaje con la finalidad de poder construir un algoritmo de aprendizaje más fuerte. Existen ensambles basados en promedio, promedio ponderado y voto mayoritario, descritos por Alfaro (1), Dixit (7), Kumar (15), Narayanachar (21), Rokach (23) y Zhou (26). Al mantener la muestra de evaluación sin balancear se usaron indicadores robustos a esta desproporción, tales como la sensibilidad, la especificidad y el accuracy balanceado.

III. RESULTADOS

Selección de variables predictoras

Como resultado de la comprensión de los datos y aplicando el algoritmo BORUTA se seleccionaron las siguientes variables predictoras numéricas de la situación académica de un alumno:

PUNTAJE.MATEMÁTICAS: Puntaje obtenido en el área de Matemática en el examen de admisión

- PUNTAJE.RM: Puntaje obtenido en el área de Razonamiento matemático en el examen de admisión.
- PUNTAJE.FÍSICA: Puntaje obtenido en el área de Física en el examen de admisión
- PUNTAJE.FINAL: Puntaje obtenido en el examen de admisión
- LENGUA: Nota en el curso de Lengua
- QUIM: Nota en el curso de Química
- MATE: Nota en el curso de Matemáticas
- CREDAP: Número de créditos aprobados en el primer semestre de estudios.
- PROMSEM: Promedio ponderado del primer semestre de estudios.

Análisis descriptivo de las variables predictoras

- En el primer semestre de estudios, la nota promedio de Matemática fue de 11.1 puntos, para Química su media fue de 10.5, mientras que la nota media de Lengua fue igual a 13.3.
- Los estudiantes obtuvieron un primer promedio semestral con media de 12.2 puntos y aprobaron 14.7 créditos en promedio.
- El 23.1% de los estudiantes que obtuvieron hasta 13.4 de nota en el área de Matemáticas (mediana de la variable) en el examen de admisión presentaron una situación académica de riesgo, mientras que en el grupo restante

(más de 13.4 de nota) esta cifra se redujo a casi la mitad (12.9%).

- El 23.8% de los estudiantes que obtuvieron 11 o menos nota en Matemática (mediana de la variable) en el primer semestre presentaron una situación académica de riesgo, mientras que en el grupo restante (más de 11) este indicador alcanzó solo el 6.7%.
- El 24% de los estudiantes que aprobaron hasta 15 créditos (mediana de la variable) en el primer semestre presentaron una situación académica de riesgo, mientras que en el grupo restante (16 a más créditos aprobados) este indicador alcanzó solo el 7.1%.
- El promedio semestral del primer semestre presentó una alta correlación (mayor a 0.8) con al menos una de las demás variables predictoras, por lo que fue retirado del análisis.

Evaluación de los modelos

En la figura 2 se puede observar que los algoritmos que son más estables son la Regresión Logística, Naive Bayes y un SVM con kernel lineal, puesto que con estos se obtuvieron las menores diferencias entre el Balanced Accuracy en los datos de entrenamiento y evaluación, asimismo, alcanzaron el mayor valor en este indicador al utilizar los datos de evaluación. Estos tres algoritmos fueron ensamblados.

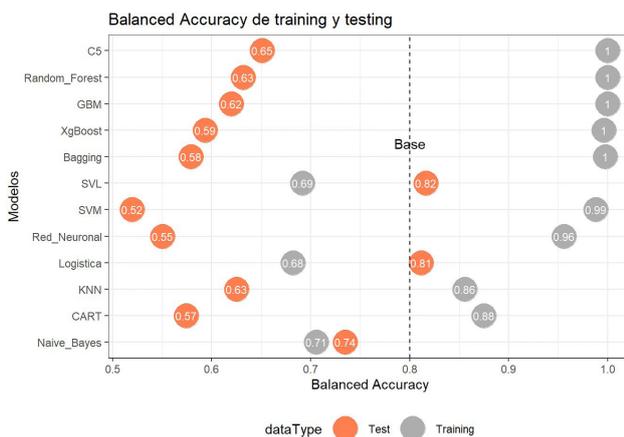


Figura 2. Comparación del Balanced Accuracy para los doce modelos.

Ensamble de modelos

Los resultados de la sensibilidad, especificidad y accuracy balanceado para cada uno de los tres modelos elegidos se muestran en la tabla 1, así también para el ensamble de éstos, usando el punto de corte tradicional (0.5) y el óptimo sugerido por la curva ROC que se aprecia en la figura 3. Con este valor óptimo (0.439), la probabilidad

de detectar correctamente a los alumnos en situación académica normal es de 0.695, mientras que la detección de estudiantes cuya situación es no normal se realiza con una probabilidad de 0.947.

Algoritmo	Sensibilidad	Especificidad	Accuracy Balanceado
Ensamble con umbral óptimo	0.9473684	0.6952381	0.8213033
SVM con kernel lineal	0.8421053	0.7904762	0.8162907
Regresión Logística	0.8421053	0.7809524	0.8115288
Ensamble con umbral de 0.5	0.7894737	0.7333333	0.7614035
Naive-Bayes	0.7368421	0.7333333	0.7350877

Tabla 1. Comparación de indicadores para los tres algoritmos y el ensamble con y sin punto de corte óptimo.

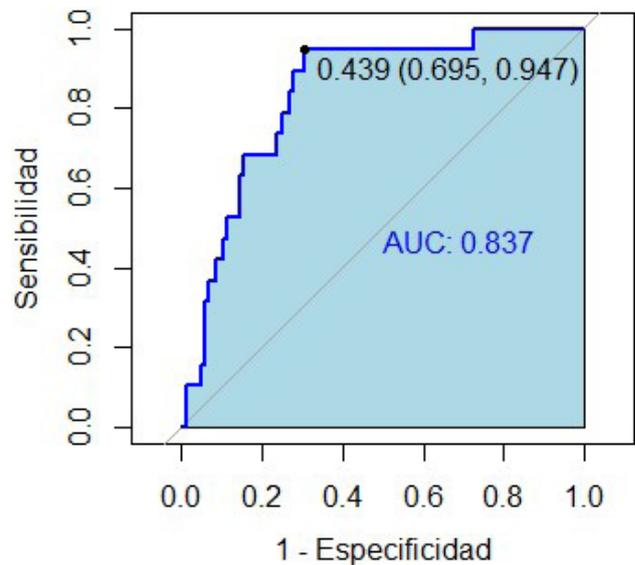


Figura 3. Curva ROC para el ensamble con los tres modelos.

IV. DISCUSIÓN

En los hallazgos reportados de esta investigación, las variables sociodemográficas como el sexo, la edad de ingreso y el tipo de colegio de procedencia del estudiante no contribuyeron en la predicción de la situación académica, a diferencia de lo señalado en las investigaciones de Gómez-Sánchez, Martínez-López, Oviedo-Marín (10) y Cortez, Tutiven, Villavicencio (5). Por otro lado, el estudio de Tapasco, Ruiz y García (24) indica que el puntaje conseguido en el examen de admisión no fue una variable significativa en el promedio del estudiante de carreras de ingeniería y ciencias agropecuarias, lo cual concuerda con lo detectado a través de los algoritmos de Machine Learning para alumnos de la UNALM, puesto

que solo la nota de Razonamiento Matemático estuvo entre las predictoras más significativas y solo en uno de los algoritmos. Esto se debería a que el examen de admisión mide los conocimientos de los postulantes mas no su aptitud hacia la carrera, un factor importante en su desarrollo académico. Finalmente, las notas de Matemática y Química en el primer semestre siempre aparecen en el grupo de mejores predictoras en los tres modelos ensamblados. Es importante mencionar también que el trabajo de Ocaña (22) señala al rendimiento académico previo como una variable que repercute a futuro. Así, los hallazgos reportados por el modelo en estudio podrán ser de utilidad para los tutores, quienes están a cargo del seguimiento de estudiantes universitarios en cuanto a su desempeño académico.

V. CONCLUSIONES

- El modelo de regresión logística, y los algoritmos Naive Bayes y Máquinas de Soporte Vectorial con kernel lineal fueron elegidos por tener

un Balanced Accuracy altos y estabilidad de resultados en las muestras de entrenamiento y evaluación.

- En los modelos elegidos para el ensamble, las variables relacionadas al primer semestre presentaron mayor importancia que las del examen de admisión. La nota obtenida en el curso de Matemáticas fue una de las más importantes para predecir la situación académica.
- Las variables sociodemográficas no fueron relevantes en la predicción del rendimiento académico luego de seis semestres de estudios.
- El modelo encontrado debe actualizarse rutinariamente dado que los contenidos y/o formas de enseñanza - aprendizaje van variando a lo largo del tiempo.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al personal de la UNALM por las facilidades brindadas en la recopilación de la información de las bases de datos de cada oficina.

Referencias

1. Alfaro E, Gámez M, García N. Ensemble Classification Methods with Applications in R. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.; 2019.
2. Barragán S, González L. Un modelo para explicar la retención en la universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano: árboles de decisión. Congresos CLABES. 2016. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/clabes/article/view/1090>
3. Calvache L, Alvarez V, Triviño J, Quiceno C, Pulgarin R. Aplicación de técnicas de minería de datos para la identificación de patrones de deserción estudiantil como apoyo a las estrategias de SARA (sistema de acompañamiento para el rendimiento académico). Congresos CLABES. 2018. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/clabes/article/view/2021>
4. Cichosz P. Data Mining Algorithms: Explained Using R. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.; 2015.
5. Cortez F, Tutiven J, Villavicencio M. Determinantes del rendimiento académico universitario. Revista Publicando. 2017; 4(10): 284 - 296
6. Delgado R. Uso de los métodos multivariante para el análisis del desempeño académico de los estudiantes de la educación superior (Caso: Estudiantes ingresantes en el primer curso de Matemática de la UNALM) [tesis de maestría]. Perú: UNMSM; 2020
7. Dixit A. Ensemble Machine Learning. A beginner's guide that combines powerful machine learning algorithms to build optimized models. United Kingdom: Packt Publishing Ltd.; 2017.
8. Fernández A, García S, Galar M, Prati R, Krawczyk B, Herrera, F. Learning from Imbalanced Data Sets. New York: Springer; 2018.
9. Gareth J, Witten D, Hastie T, Tibshirani R, 2013. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. New York: Springer Texts in Statistics; 2013.
10. Gómez-Sánchez D, Martínez-López E, Oviedo-Marín R. Factores que influyen en el rendimiento académico del estudiante universitario. Tecnociencia. 2011; 5(2): 90 – 97.
11. Haibo H, Yunqian M. Imbalanced Learning: Foundations, Algorithms, and Applications.

New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013.

12. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd. ed. New York: Springer; 2001.
13. Huertas C, Bullón C. Evaluación del desempeño de los alumnos de la UNALM según su modalidad de ingreso. *Anales Científicos*. 2009. 70(3): 58-70.
14. Jiménez M. Análisis cuantitativo de las variables que influyen en el rendimiento universitario. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. 2018. 9(17): 623 – 638.
15. Kumar I, Jaim M. *Ensemble Learning for AI Developers. Learn Bagging, Stacking, and Boosting. Methods with Use Cases*. New York: Springer Science+Business Media; 2020.
16. Lantz B. *Machine Learning with R*. United Kingdom: Packt Publishing Ltd.; 2019.
17. Montserrat V, González J, Patricio J. Modelo predictivo para la permanencia en la Educación Superior. *Congresos CLABES*. 2017. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/clabes/article/view/1588>
18. Mora R. Factores que intervienen en el rendimiento académico universitario: Un estudio de caso. *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante [Internet]*. 2021 [citado el 15 Agosto 2021]. 6: 1041 – 1063. Disponible en <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/52320#vpre-view>
19. Moreira T, Hernández M, Solís M, Fernández T. Estudio descriptivo del perfil desertor en tres cohortes de estudiantes universitarios de primer ingreso. *Congresos CLABES*, 38-49. 2020. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/clabes/article/view/2622>
20. Munizaga F, Rojas-Murphy A, Leal R. Variables que Influyen en la retención de estudiantes de primer año en un programa de bachillerato chileno. *Congresos CLABES*. 2018. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/clabes/article/view/1892>
21. Narayanachar P. *Hands-On Ensemble Learning with R*. United Kingdom: Packt Publishing Ltd.; 2018.
22. Ocaña Y. Variables académicas que influyen en el rendimiento académico de los estudiantes universitarios. *Investigación Educativa*. 2011. 15(27): 165 – 180.
23. Rokach L. *Pattern Classification using Ensemble Methods. Series in Machine Perception and Artificial Intelligence – Vol. 75*. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2010.
24. Tapasco O, Ruiz F, Osorio D. Estudio del poder predictivo del puntaje de admisión sobre el desempeño académico Universitario. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (Colombia)*. 2016. vol. 12, núm. 2, pp. 148-165.
25. Witten I, Frank E, Hall M, Pal C. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 4er. ed. Massachusetts: Morgan Kauffman; 2019.
26. Zhou Z. *Ensemble Methods. Foundations and Algorithms*. Florida: Chapman & Hall/CRC. *Machine Learning & Pattern Recognition Series*; 2017.

ESTUDIO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS CONDICIONES DE TRANSFORMACIÓN EN LA VISCOSIDAD DEL POLIETILENTEREFTALATO (PET) RECICLADO.

Study of the effects produced by the transformation conditions on the viscosity of recycled polyethyleneterephthalate (pet).

¹Julio-Cesar Velázquez-Infante* , ²Arles Vega García , ²Rosalía Esquivel Figueredo ,
²Sandra Bárcenas Martínez , ³Hassan Martínez-Hung

¹Unidad de Extensión, Investigación y Capacitación Agropecuaria de Holguín, Velasco, Cuba.

²Universidad de Holguín, Departamento de Física / Departamento de Química, Holguín, Cuba.

³Universidad de Oriente, Departamento de Química, Santiago de Cuba, Cuba.

*jvelazquezi@ueica.hlg.minag.cu

Resumen

Se estudió el efecto producido por las condiciones de transformación en la viscosidad del polietilentereftalato reciclado. Para ello, se realizó una simulación del procesado en un plastómetro para la determinación del Índice de Fluidez, sobre la base de un diseño de experimentos factorial 2². Como variables independientes se tomaron la temperatura y tiempo de retención del polímero dentro de la cámara de procesamiento, mientras que como variable respuesta se evaluó la viscosidad intrínseca del polietilentereftalato. Mediante un análisis de regresión lineal del diseño experimental se logró obtener por primera vez la ecuación del modelo ajustado para la viscosidad intrínseca, sobre la que los dos factores estudiados (tiempo y temperatura) así como la interacción entre ellos presentaron un efecto significativo con un nivel de confianza de 95 %. En todos los casos ocurrió una disminución de la viscosidad del polietilentereftalato reciclado, encontrándose la mayor incidencia con un 30 % al incrementar la temperatura de 260 a 280 °C. De cara a un proceso de reciclado, se recomienda mantener un perfil de temperaturas que no supere los 260 °C y tiempos de residencia igual o menores a 10 min.

Palabras claves: Polietilentereftalato, reciclado, degradación química, viscosidad intrínseca, plastómetro.

Abstract

The effect produced by the processing conditions on the viscosity of recycled polyethylene terephthalate was studied. For this, a simulation of the processing was carried out using a melt flow index plastometer, based on a factorial design of experiments 2². The temperature and the retention time of the polymer inside the processing chamber were selected as independent factors, while the intrinsic viscosity of the polyethylene terephthalate was the response variable. Through a linear regression analysis of the experimental design, it was possible to obtain for the first time the equation of the model adjusted for intrinsic viscosity, on which the two factors studied (time and temperature) as well as the interaction between them presented a significant effect with a level of 95% confidence. In all cases, there was a decrease in the viscosity of the recycled polyethylene terephthalate, with the highest incidence being 30% when the temperature increased from 260 to 280 °C. For a recycling process, it is recommended to maintain a temperature profile that does not exceed 260 °C and residence times equal to or less than 10 min.

Keywords: Polyethylene terephthalate, recycling, chemical degradation, intrinsic viscosity, plastometer.

Fecha de recepción: 17-08-2021

Fecha de aceptación: 03-09-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

Los plásticos juegan un papel decisivo en la modernidad, estando presentes en prácticamente la totalidad de los campos de la vida del hombre (1-5). De hecho, el consumo global de plásticos en 2018 llegó a los 359 millones de toneladas métricas (6). Particularmente, la producción de polietilentereftalato (PET) en el mundo en 2016 llegó a los 50.01 millones de toneladas métricas, estimándose un ascenso hasta los 87.16 millones de toneladas métricas para 2022 (7). Por sectores de mercado, el PET se ha convertido en el material de envase más usado a nivel mundial para las botellas de agua y refrescos, representando esta aplicación el 83-84 % del volumen consumido de PET en 2018 (8).

Estos objetos, debido a su corta vida de servicio (normalmente inferior a un año desde su manufactura), pasan rápidamente a formar parte de la corriente de desechos sólidos. La principal desventaja de los desechos plásticos proviene del elevado volumen que ocupan y de su extremadamente lenta velocidad de degradación, lo que conduce a su acumulación. Un ejemplo alarmante de esta situación es la enorme marea de desechos plásticos que flotan en los océanos, ocasionando graves daños a los ecosistemas (9). La revalorización de los desechos plásticos, es decir el reciclado y la recuperación de energía, constituyen importantes alternativas para darle otra vida a estos materiales y, al mismo tiempo, mitigar su impacto ambiental (10). Así, en las últimas dos décadas se ha incrementado el interés por el reciclado de los desechos plásticos, y especialmente el del polietilentereftalato. De hecho, el reciclado del PET representa uno de los ejemplos más exitosos y difundidos del proceso de reciclaje de polímeros (11).

La recuperación del PET se realiza predominantemente mediante el reciclado mecánico (12). Este es un proceso rápido y de un coste moderado, que permite la completa recuperación del PET y su utilización para fabricar nuevos productos dirigidos a varias aplicaciones industriales tales como el envasado de detergentes, cosméticos, alfombras, láminas, partes de autos o en nuevas botellas plásticas.

Sin embargo, en todos los casos la aplicación del polietilentereftalato reciclado dependerá fundamentalmente de las propiedades de la resina luego de su procesado. De hecho, la mayor dificultad enfrentada por todos los transformadores durante el reciclado del PET es su degradación. El PET es un poliéster alifático-aromático termoplástico semicristalino obtenido mediante reacciones de policondensación a partir de etilenglicol y ácido tereftálico o dimetiltereftalato (13). Por esta razón, al igual que ocurre para otros poliésteres orgánicos, su reacción de obtención es reversible y puede ocurrir la despolimerización, la que es acelerada por la presencia de agua, ácidos y/o por la temperatura (14). El efecto final se caracteriza por una acentuada pérdida de propiedades del polietilentereftalato reciclado. Por tanto, el control de la degradación del PET durante los procesos de transformación constituye la clave para obtener un producto de buenas prestaciones.

Varios investigadores han centrado su atención en los efectos del proceso de transformación en el PET. Sheldon (15) analizó la influencia de las condiciones de extrusión (velocidad de rotación/temperatura) en la cristalización del PET, encontrando que a elevadas velocidades de extrusión existe una tendencia a degradar las cristalitas u otras fuentes de nucleación, lo que afectó la velocidad de cristalización durante un posterior calentamiento. Curtzwiler y colaboradores (16) prepararon varias láminas para estudiar la influencia del contenido de PET reciclado (de 0 a 100 %) en las propiedades finales. Los ensayos mecánicos demostraron que el contenido de PET reciclado incorporado altera significativamente las propiedades de los materiales estudiados cuando eran comparados con la resina virgen. Giraldi y colaboradores (17) estudiaron nanocomposites de PET reciclado con contenidos de 2.5 y 5% de montmorillonita organomodificada, obtenidos mediante mezclado en fundido en una extrusora de doble husillos corrotantes a 250 y 150 rpm. Sobre la base de la influencia tiempo de residencia, encontraron que la velocidad de rotación de husillo puede optimizarse para conducir a la completa exfoliación de la nanoarcilla y, con esto, obtener las mejores propiedades mecánicas. Sin embargo,

ninguno de ellos aborda los efectos sobre la estructura molecular del PET.

Por otra parte, Matayabas y colaboradores (18) al estudiar nanocomposites de PET con una organoarcilla comercial (Claytone APA), extruidos a 280 °C, encontraron una disminución de la viscosidad del PET, lo que se intensificó con el aumento del contenido de arcilla. Un resultado similar fue encontrado por Fang y colaboradores (19) cuando analizaron la influencia del contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) y los parámetros de extrusión en el comportamiento de un masterbatch y en fundido del PET reciclado. Al aumentar tanto el contenido de CaCO_3 como la temperatura de la cámara de la extrusora de 240 a 260 °C ocurrió una disminución de la viscosidad intrínseca. No obstante, en ambos casos la presencia de los rellenos inorgánicos no deja claro cuál es la relación entre la viscosidad del PET y las condiciones de transformación.

El presente trabajo comprende el empleo de un plastómetro para realizar una simulación de un proceso de extrusión, como vía para el estudio de la influencia de las condiciones de transformación en la viscosidad del polietilenterftalato (PET) procedente de botellas plásticas de desecho.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la investigación se empleó acetona (Merck, Alemania), éter (AnalaR, Inglaterra) y fenol (AnalaR, Inglaterra), todos con un 99 % de pureza. El fenol fue destilado antes ser usado, mientras que el éter y la acetona se utilizaron tal y como se recibieron. El PET empleado se tomó de la reserva de botellas plásticas de desecho almacenada en la Empresa de Recuperación de Materias Primas de Holguín. A las botellas se les retiraron las tapas, etiquetas y demás materiales extraños. Por su parte, los restos de pegamento fueron cuidadosamente eliminados utilizando acetona, éter o agua. Seguidamente, se procedió al lavado, secado preliminar en estufa Electrothermal (Inglaterra) (80 °C/ 1h) y molido de las botellas en un molino desfibrador Nossen 8255 (Alemania). Las escamas de PET se sometieron a un tamizado, tomando para los ensayos

la fracción que permaneció en el tamiz de 2 mm. Finalmente, se realizó un secado de las escamas de PET a vacío a 100 °C durante 24 h en una estufa Memmert (Alemania), denominado PET-R. Además, con fines comparativos, se usó granza virgen de PET (PET-G) de la firma Intercontinental Polymers ($[\eta] = 0.635 - 0.665$ dL/g y $T_f = 255$ °C) (20).

Simulación del proceso de extrusión

Para evaluar los posibles efectos derivados de la degradación ocurrida durante las etapas de extrusión del PET-R, se realizó una simulación del procesado en un plastómetro para la determinación del Índice de Fluidéz (Ceast, Italia). Los experimentos se realizaron sobre la base de un diseño experimental factorial 2², como vía para obtener la mayor cantidad de información con el menor número de experimentos posible (21). Como variables independientes se tomaron la temperatura y el tiempo de retención del polímero dentro de la cámara de procesamiento, mientras que como variable respuesta se tomó la viscosidad intrínseca $[\eta]$. Se realizó una réplica, para un total de 8 experimentos. La tabla 1 muestra el diseño experimental completo utilizado. El rango de temperatura estudiado corresponde a la ventana de procesamiento utilizada por los transformadores del PET, mientras que el rango de tiempo de retención se basó en un estudio previo (22). Por su parte, el procesamiento estadístico se realizó utilizando el software "STATGRAPH".

Experimento	Tiempo de retención (t) (min.)	Temperatura (T) (°C)
E1	10	260
E2	30	260
E3	10	280
E4	30	280

Tabla 1. Diseño de los experimentos.

Viscosimetría capilar

Las medidas se efectuaron en un viscosímetro capilar Cannon Ubbelohde, termostaticado a la temperatura de 50 ± 0.1 °C en un baño de agua. Como disolvente se utilizó fenol. Se preparó una disolución madre de una concentración aproximada de 0.5 g/100 mL por cada corrida experimental. Para ello, se pesaron aproximadamente 0.5 g del polímero y se colocaron en un vaso de precipitados al que se le adicionaron 100 mL de fenol. El beaker fue sellado y se colocó en un baño

termostático (Bunsen, España) a 80 °C durante 1h, realizando agitaciones periódicas hasta completa disolución. De esta disolución, se tomaron 10 mL y se vertieron en el viscosímetro Cannon Ubbelohde, dejando transcurrir 30 min. para que la solución se equilibrara a la temperatura de ensayo. El resto de disoluciones se obtuvieron in situ directamente en el viscosímetro, realizando adiciones sucesivas de disolvente puro. Seguidamente, se midieron los tiempos de flujo que tarda cada disolución y del disolvente puro en pasar entre dos marcas situadas en el viscosímetro. La relación entre el tiempo de caída de la disolución y del disolvente puro corresponde a la viscosidad relativa (η_r). Por su parte, la viscosidad específica se obtuvo restando uno a η_r .

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la determinación de viscosidad intrínseca $[\eta]$ de cada muestra se usaron las ecuaciones de Huggins (23) y Kraemer (24), ecuaciones (1) y (2) respectivamente. Se ha encontrado que estas ecuaciones son válidas a bajas concentraciones y la extrapolación gráfica de cualquiera de ellas a concentración igual a cero proporcione el mismo valor o valores muy aproximados de $[\eta]$.

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + k_H[\eta]^2 c \quad (1)$$

$$\frac{\ln \eta_r}{c} = [\eta] - k_K[\eta]^2 c \quad (2)$$

Donde, η_{sp} es la viscosidad específica y k_H y k_K son las constantes de viscosidad de Huggins y Kraemer. En ambos casos, se requiere la determinación de sus viscosidades relativas (η_r) de una serie de soluciones, base para el cálculo de η_{sp}/c , la cual es extrapolada a concentración cero para obtener a $[\eta]$. En este procedimiento se consume una gran cantidad de tiempo, esfuerzo y materiales. Por esta razón, varios autores han propuesto ecuaciones alternativas que permiten encontrar $[\eta]$ a partir de una sola determinación para una concentración conocida del polímero. Entre estos, Solomon y Ciuta (25) derivaron una relación para la determinación de $[\eta]$ a partir de un solo punto a partir de la combinación de las ecuaciones (1) y (2):

$$[\eta] = \frac{1}{c} \sqrt{2(\eta_{sp} - \ln \eta_r)} \quad (3)$$

La aplicabilidad de la ecuación (3) ha sido estudiada por varios investigadores. Elliot y colabo-

radores (26) la emplearon para determinar $[\eta]$ de muestras comerciales y experimentales de poli-propileno y polietileno en decalina. Por su parte, Abdel-Azim y colaboradores (27) la usaron para estudiar varias muestras de polióxido de etileno y de polietilenglicol, así como poliestireno, utilizando benceno como disolvente. En ambos casos, se encontró que la ecuación de Solomon y Ciuta (ecuación 3) proporcionó valores aceptables de $[\eta]$.

Los valores de $[\eta]$ obtenidos para todas las corridas experimentales, empleando las ecuaciones (1) a la (3) se muestran en la tabla 2. Como puede apreciarse en los datos de la tabla 2, los valores de $[\eta]$ determinados según la extrapolación gráfica de Huggins y de Kraemer se encuentran en buen acuerdo, si bien los últimos son ligeramente superiores que los primeros. Por su parte, el uso de la ecuación (3) conjuntamente con el método clásico de la determinación en, al menos, tres puntos y la extrapolación gráfica se consideran suficientes para establecer si la ecuación de Huggins es aplicable al sistema polímero-disolvente dado (27). Esto es, si los valores de $[\eta]$ obtenidos por extrapolación gráfica concuerdan con la $[\eta]$ obtenida por la ecuación (3) entonces la relación de Huggins es aplicable. En este caso, independientemente de las condiciones experimentales, los valores de $[\eta]$ obtenidos de las ecuaciones propuestas por Huggins y por Solomon y Ciuta (Tabla 2) concuerdan. Esto le brinda soporte a la selección de los valores de $[\eta]$ derivados de la ecuación de Huggins para el análisis del diseño experimental seguido en esta investigación.

Exp.	Nivel		η_{sp}	$[\eta]$ (cps)		
	t	T		Huggins	Kraemer	Solomon&Ciuta ^a
E1	- ^c	-	0.27 / 0.21 / 0.18 / 0.15 / 0.13	0.4206	0.4203	0.4226
E2	+ ^d	-	0.26 / 0.20 / 0.16 / 0.14 / 0.12	0.3479	0.3547	0.3817
E3	-	+	0.21 / 0.16 / 0.12 / 0.10 / 0.09	0.2666	0.2733	0.2952
E4	+	+	0.22 / 0.16 / 0.13 / 0.11 / 0.09	0.2577	0.2659	0.2631
E1 ^b	-	-	0.27 / 0.21 / 0.17 / 0.16 / 0.12	0.4120	0.4117	0.4139
E2 ^b	+	-	0.25 / 0.20 / 0.16 / 0.13 / 0.12	0.3599	0.3633	0.3752
E3 ^b	-	+	0.24 / 0.18 / 0.15 / 0.12 / 0.10	0.2823	0.2906	0.2879
E4 ^b	+	+	0.25 / 0.18 / 0.15 / 0.12 / 0.09	0.2525	0.2611	0.2581

Tabla 2. Datos del diseño experimental 2² elaborado para el estudio del efecto producido por los factores tiempo de retención y temperatura.

^a Promedio de los valores de $[\eta]$ determinados para cada una de las 5 disoluciones evaluadas por muestra experimental.

^b Réplica.

^c Nivel mínimo.

^d Nivel máximo

Mediante un análisis de regresión lineal aplicando el software de procesamiento estadístico STATGRAPH se obtuvo la siguiente ecuación del modelo ajustado:

$$[\eta] = 0.325875 - 0.058025A - 0.02015B + 0.01185AB \quad (4)$$

Donde A corresponde a los valores de temperatura en °C, B al tiempo en minutos y la multiplicación AB corresponde a la interacción de ambos factores.

Por su parte, la tabla 3 muestra el análisis de varianza (ANOVA) para $[\eta]$. En ella se particiona la variabilidad de $[\eta]$ en piezas separadas para cada uno de los efectos y se prueba su significancia estadística. Todos los efectos que tengan un valor P inferior a 0.05 son estadísticamente significativos con un nivel de confianza de un 95 %. En este caso, el tiempo, la temperatura así como la interacción entre ambos factores ejercen un efecto significativo sobre $[\eta]$. Además, el elevado valor encontrado del coeficiente R^2 de un 99.44 % indica que el modelo explica satisfactoriamente la variabilidad observada de $[\eta]$.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	0.026473	1	0.026473	463.44	0.0002
B: Tiempo	0.00271585	1	0.00271585	47.54	0.0063
AB	0.00104882	1	0.00104882	18.36	0.0234
Bloques	0.00006728	1	0.00006728	1.18	0.3572
Error total	0.00017137	3	0.0000571233		
Total (corr.)	0.0304763	7			

Tabla 3. Análisis de varianza para la viscosidad intrínseca $[\eta]$.

Para evaluar la influencia de cada factor estudiado en el diseño experimental se realizó la comparación de dos experimentos donde el segundo factor permaneció constante (Tabla 2). Así, la disminución de $[\eta]$ ocasionada por el incremento de la temperatura fue del orden del 30 %, mientras que el incremento del tiempo tuvo un efecto variable. A la temperatura de 260 °C, se observó una disminución de $[\eta]$ de un 15 % con el incremento del tiempo de residencia. Sin embargo, a 280 °C el mismo incremento de tiempo sólo ocasionó una disminución del 7 % de $[\eta]$.

Por su parte, en la figura 1 se representan los valores de $[\eta]$ para cada muestra experimental, así como también las viscosidades determinadas a muestras de grana virgen de PET (PET-G) y de las escamas de botellas de PET (PET-R) antes de ser introducidas en la cámara del plastómetro de Índice de Fluidez.

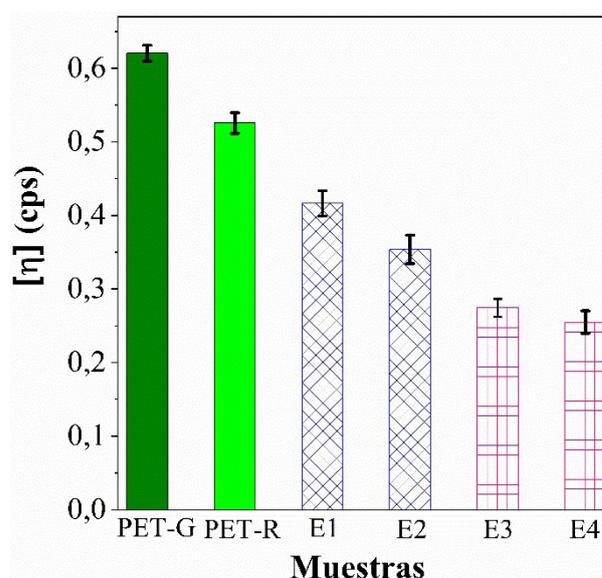


Figura 1. Valores de $[\eta]$ determinados mediante Huggins para muestras de los experimentos 1 al 4, de grana virgen de PET (PET-G) y de las escamas de botellas de PET (PET-R).

En todos los casos, la viscosidad intrínseca de las muestras de PET que han experimentado, al menos, una etapa de procesado fue menor que la de la grana virgen (Fig. 1). Así mismo, al comparar las muestras de los experimentos 1 al 4 (todos con 2 etapas de procesado) con el PET-R (1 etapa de procesado), se puede apreciar que el incremento del número de etapas de procesado condujo a una disminución adicional de $[\eta]$. De acuerdo con la ecuación de Mark-Houwink (Ecuación 4), existe una relación directa entre la viscosidad intrínseca y la masa molecular de un polímero. Por tanto, esta disminución observada de $[\eta]$ estaría indicando una reducción significativa del tamaño molecular de las cadenas de PET, trayendo consigo un deterioro de las propiedades mecánicas del material reciclado (28).

$$[\eta] = K \times M_v^a \quad (4)$$

Esta reducción del peso molecular puede tener lugar durante la transformación del PET, fundamentalmente, mediante procesos de degradación térmica, hidrolítica y/o termo-oxidativa. Las reacciones de degradación térmica e hidrolítica se han estudiado extensivamente (29-31). La degradación térmica ocurre mediante un proceso iónico, en el cual, inicialmente, ocurre la transferencia de un hidrógeno β -CH seguido por la ruptura de la cadena y el origen de compuestos vinílicos y carboxílicos. También, puede ocurrir como consecuencia de un proceso de re-arreglo molecular generando productos oligoméricos cíclicos. Por su parte, las reacciones de hidrólisis

originan grupos terminales carboxilo e hidroxilo. Algunos investigadores (29) la han catalogado como un mecanismo auto-catalítico, potenciado por el incremento en el número de grupos carboxilo terminales. Esta es una reacción extremadamente sensible (32) y tiene lugar a partir de un contenido de agua ligeramente superior a 0 ppm.

En el caso de la degradación térmica oxidativa, se considera que se produce por la reacción del oxígeno con el PET a elevadas temperaturas (31). El mecanismo exacto de la degradación oxidativa del PET es muy complejo y no está claro, pero se ha propuesto que transcurre por medio de radicales libres. El paso inicial de este mecanismo, conduce a la formación de hidroperóxidos en los enlaces del dietilenglicol de las cadenas del polímero. Estudios demuestran que las unidades de dietilenglicol son particularmente reactivas y se combinan con el oxígeno para formar hidroperóxidos (temperaturas por debajo de 200 °C) (33). A temperaturas mayores ($\sim T_p$); estos se descomponen dando lugar a una serie de reacciones que concluyen con la ruptura de la cadena. Sin embargo, este no es el único efecto ya que también traen consigo la ramificación de las cadenas y la formación del dióxido de carbono (CO_2). Estos últimos efectos se explican por la descarboxilación del radical carboxilo seguida por la adición del grupo fenilo resultante a otro anillo aromático, como se muestra en la figura 2. De ese modo, en las muestras procesadas a 280 °C podría estar ocurriendo entrecruzamiento, lo que traería consigo un incremento de la viscosidad del PET, enmascarando la disminución de $[\eta]$ derivada de las reacciones de escisión de cadena.

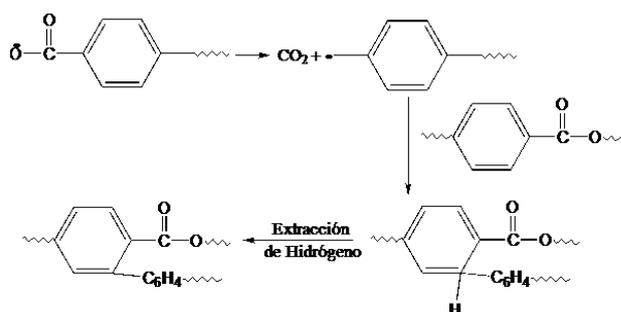


Figura 2. Reacciones de ramificación de las cadenas y formación del dióxido de carbono [Adaptado de (13)].

IV. CONCLUSIONES

Se estudió la influencia de las condiciones de procesamiento en el polietilentereftalato reciclado, obteniéndose por primera vez la ecuación del modelo ajustado por regresión lineal para la viscosidad intrínseca $[\eta]$. Los factores estudiados, temperatura de procesamiento y tiempo de residencia, así como su interacción presentaron dentro del rango estudiado un efecto significativo con un 95 % de confianza. Si bien en todas las corridas experimentales se observó una disminución de la viscosidad, indicando una reducción del tamaño molecular, el incremento de la temperatura ocasionó la mayor reducción de $[\eta]$ en aproximadamente un 30 %.

Así, la determinación de $[\eta]$ constituye una vía útil para optimizar el proceso de reciclaje del PET. De cara a un proceso de reciclado, para minimizar los procesos de degradación durante su transformación en fundido y el consecuente deterioro de las propiedades del PET, se recomienda mantener un perfil de temperaturas que no supere los 260 °C así como mantener un tiempo de residencia igual o menor a 10 min.

R eferencias

1. Çaykara T, Sande MG, Azoia N, Rodrigues LR and Silva CJ. Exploring the potential of polyethylene terephthalate in the design of antibacterial surfaces. *Med. Microb. and Imm.* 2020; 209: 363–372.
2. Begum SA, Rane AV and Kanny K. Applications of compatibilized polymer blends in automobile industry. En: Ajitha AR and Sabu Thomas, Editores. *Compatibilization of Polymer Blends. Micro and Nano Scale Phase Morphologies, Interphase Characterization and Properties.* eBook. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 563-593.
3. Huang J, Yang X, Yu J, Han J, Jia C, Ding M et al. A Universal and Arbitrary Tactile Interactive System Based on Self-powered Optical Communication. *Nan. Energ.* 2020; 69 (March): 10441.

4. Zeng JJ, Gao WY, Duan ZJ, Bai YL, Guo YC, Ouyang LJ. Axial compressive behavior of polyethylene terephthalate/carbon FRP confined seawater sea-sand concrete in circular columns. *Cons. and Build. Mat.* 2020; 234: 117383.
5. Senthil Kumar P and Yaashikaa PR. Case Studies on Recycled Polyesters and Different Applications. En: Subramanian Senthilkannan Muthu, editor. *Environmental Footprints of Recycled Polyester*. eBook. Singapore: Springer; 2020. p. 99-112.
6. Scribd Inc. Plásticos–Situación en 2019 [Internet]. 1ra ed. California: Trip Adler; 2020 [actualizado 20 Septiembre 2021; citado 15 Agosto 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/484313664/Plastics-the-facts-Mar2019-esp>.
7. Business wire Inc. Global Polyethylene Terephthalate Market Report 2017 - By End-Use Industries, Products & Regions - Research and Markets [Internet]. Dublin: Business Wire; 2017 [actualizado 10 Enero 2021; citado 12 Agosto 2021]. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20170914005775/en/Global-Polyethylene-Terephthalate-Market-Report-2017---By-End-Use-Industries-Products-Regions---Research-and-Markets>.
8. Zhang H and Wen ZG. The consumption and recycling collection system of PET bottles: a case study of Beijing, China. *Wast. Manag.* 2014; 34: 987-998.
9. Sasse, F and Emig, G. Chemical recycling of polymer materials. *Chem. Eng. Technol.* 1998; 21: 777-789.
10. Stanica-Ezeanu D and Matei D. Natural depolymerization of waste poly(ethylene terephthalate) by neutral hydrolysis in marine water. *Sci. Rep.* 2021; 11: 4431.
11. Throne JL. Effect of recycle on properties and profits: Algorithms. *Adv. Polym. Tech.* 1987; 7: 347-360.
12. Gupta VB, Bashir Z. PET Fibers, Films, and Bottles: Sections 1–4. En: Fakirov S, editor. *Handbook of Thermoplastic Polyesters*. Vol 1. 2da ed. Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002. p. 317-361.
13. Brandrup J. *Polymer handbook*. Vol 2. 4ta ed. New York: Interscience Publishers; 1978.
14. Silva Freitas FL, Chinellato AC, Rodrigues Pereira Filho E and Cruz SA. Evaluation of the effect of additives on thermo-oxidative and hydrolytic stabilization of recycled post-consumer poly (ethylene terephthalate) using Design of Experiments. *Polym. Test.* 2020; 81: 106275.
15. Sheldon, RP. The influence of extrusion conditions on the crystallization of polyethylene terephthalate film. *Polym.* 1963; 4: 213-219.
16. Curtzwiler G, Vorst K, Danes JE, Auras R, Singh J. Effect of recycled poly(ethylene terephthalate) content on properties of extruded poly(ethylene terephthalate) sheets. *J. of Plast. Film & Sheet.* 2011; 27: 65-86.
17. Giraldi ALFM, Bizarria MTM, Silva AA, Velasco JI, Marcos AdA, Mei LHI. Effects of Extrusion Conditions on the Properties of Recycled Poly(Ethylene Terephthalate)/Nanoclay Nanocomposites Prepared by a Twin-Screw Extruder. *J. of App. Polym. Sci.* 2008; 108: 2252–2259.
18. Matayabas JC, Turner SR. Nanocomposite technology for enhancing the gas barrier of polyethylene terephthalate. In: Pinnavaia TJ and Beall GW, editores. *Polymer–clay nanocomposites*. Vol 1. 1ra ed. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2000. p. 207–225.
19. Fang T, Li J, Yan W, Gu D, Du Z. Effect of calcium carbonate as pore-forming agent on properties of recycled polyethylene terephthalate masterbatch. *J. of Phys.: Conference Series.* 2021; 1790: 012011.
20. Matweb Material Properties Data [Página principal de internet], Blacksburg: MatWeb LLC; 2020. [actualizada en Marzo de 2011; acceso 10 agosto 2021] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=6e09c609f7364fc6a997e6bbafc609d7&ckck=1>.
21. Lopez R. *Diseño estadístico de experimentos*. Vol 1. 3ra ed. Ciudad de La Habana: Científico-Técnica; 1988.
22. Velázquez-Infante JC, Pérez-Rodríguez AT y García JM. Estudio del proceso de recicla-

do de las botellas de polietilentereftalato. En: Francisco Torres Editor. Libro de memorias. 6ta Convención y Feria Internacionales "METANICA 2001". 2001 Jul 17-20; La Habana. Ciudad de La Habana: Científico Técnica; 2001. 101-109.

23. Huggins ML. The Viscosity of Dilute Solutions of Long-Chain Molecules. IV. Dependence on Concentration. *J. Am. Chem. Soc.* 1942; 64: 2716-2718.

24. Kraemer EO. Molecular Weights of Celluloses and Cellulose Derivates. *Ind. Eng. Chem.* 1938; 30: 1200-1203.

25. Solomon OF and Ciuta IZ. Détermination de la viscosité intrinsèque de solutions de polymères par une simple détermination de la viscosité. *J. Appl. Polym. Sci.* 1962; 6: 683-686.

26. Elliott JH, Horowitz KH and Hoodock T. A one-point intrinsic viscosity method for polyethylene and polypropylene. *J. Appl. Polym. Sci.* 1970; 14: 2947-2963.

27. Abdel-Azim AA, Atta MA, Farahat MS and Boutros WY. Determination of intrinsic viscosity of polymeric compounds through a single specific viscosity measurement. *Polym.* 1998; 39: 6827-6833.

28. Masmoudi F, Alix S, Buet S, Mehri A, Bessadok A, Jaziri M et al. Design and Characterization of a New Food Packaging Material by Recycling Blends Virgin and Recovered polyethylene terephthalate. *Polym. Eng. Sci.* 2020; 60: 250-256.

29. Zimmerman H and Kim NT. Investigations on thermal and hydrolytic degradation of poly (ethylene terephthalate). *Polym. Eng. Sci.* 1980; 20: 680-683.

30. Housseini SS, Taheri S, Zadhoush A, Mehrabani-Zeinabad A. Hydrolytic degradation of poly (ethylene terephthalate). *J. Appl. Polym. Sci.* 2007; 103: 2304-2309.

31. Badia JD, Martinez-Felipe A, Santoja-Blasco L, Ribes-Greus A. Thermal and thermo-oxidative stability of reprocessed poly (ethylene terephthalate). *J. Anal. Appl. Pyr.* 2013; 99: 191-202.

32. Al-Abdulrazzak S, Jabarin SA. Processing characteristics of poly (ethylene terephthalate): hydrolytic and thermal degradation. *Polym. Int.* 2002; 51: 164-173.

33. Buxbaum LH. The Degradation of Poly (ethylene terephthalate). *Ang. Chem. Int.* 1968; 7: 182-190.

MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIPROPILENO RECICLADO MEDIANTE ADICIÓN DE FIBRAS VEGETALES, POLIETILEN TERFTALATO Y TRATAMIENTO TÉRMICO.

Improvement of the mechanical properties of recycled polypropylene through addition of vegetable fibers, polyethylene terphthalate and heat treatment.

¹Paul Palmay* , ¹Sofía Sanipatin , ¹Daniela Poalacin , ²Caterine Donoso 

¹Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

²Universidad Tecnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Latacunga, Ecuador.

*paul.palmay@epoch.edu.ec

Resumen

En los residuos sólidos plásticos el polipropileno es uno de los termoplásticos de mayor consumo a nivel urbano y por ende el de mayor generación de residuos. En este sentido, el reciclaje mecánico es la técnica más sencilla de aplicación aprovechando de residuos de la misma familia de termoplástico que acondicionado con otras fibras permiten el mejoramiento de sus propiedades, mediante la elaboración de composites con fibras naturales o sintéticas. El presente estudio tiene como objetivo el análisis de las propiedades más importantes de composites hechos de polipropileno con fibras naturales: de plátano y de abacá; composites de polipropileno con polietileno tereftalato a diferentes concentraciones, con y sin acoplante; y un tratamiento térmico para el mejoramiento de la matriz de polipropileno reciclado. Se obtienen probetas mediante extrusión de monohusillo a diferentes perfiles de temperatura y concentraciones de fibra adicionada. Se plantea el tratamiento térmico al polipropileno midiendo el grado de cristalización que se genera. Posteriormente, se mide la tracción, flexión y calorimetría diferencial de barrido de los composites de buena trabajabilidad usando como acoplante anhídrido terftálico. Los resultados muestran mejoras en las propiedades de tracción y flexión al momento de adición del agente acoplante en ambos composites y con concentraciones bajas de fibra de refuerzo.

Palabras claves: Reciclaje Mecánico, Plásticos Post consumo, Composites Polipropileno.

Abstract

In solid plastic waste, polypropylene is one of the thermoplastics with the highest consumption in urban areas and, therefore, the one with the highest waste generation. In this sense, mechanical recycling is the simplest application technique taking advantage of the waste of the same family of thermoplastics that conditioned with other fibers allow the improvement of their properties, through the elaboration of composites with natural or synthetic fibers. This study aims to analyze the most important properties of compounds made of polypropylene with natural fibers: banana and abaca; polypropylene compounds with polyethylene terephthalate in different concentrations, with and without couplant; and a heat treatment for the improvement of the recycled polypropylene matrix. Samples are obtained by single screw extrusion at different temperature profiles and concentrations of added fiber. The heat treatment of polypropylene is proposed by measuring the degree of crystallization that is generated. Subsequently, the calorimetry of traction, flexion and differential sweep of good workability compounds is measured using terphthalic anhydrous coupler. The results show improvements in tensile and bending properties at the time of addition of the coupling agent in both compounds and with low concentrations of reinforcing fiber.

Keywords: Mechanical Recycling, Post-consumer Plastics, Polypropylene Composts

Fecha de recepción: 23-05-2021

Fecha de aceptación: 03-09-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la tecnología ha orientado sus esfuerzos en combinar las propiedades de diferentes tipos de materiales, a fin de obtener materiales compuestos con mejores propiedades o con propiedades útiles para aplicaciones específicas.

El reciclaje de termoplásticos reforzados con fibra natural recibe gran atención debido a su bajo costo, buenas propiedades y en especial a su biodegradabilidad, razón que las convierte en un reemplazo adecuado al uso de fibras sintéticas usadas en el sector corporativo de los polímeros (1,2).

Las propiedades de la matriz, las fibras y la interfaz fibra-matriz cambian con cada reciclaje siendo de suma importancia tomar en cuenta la relación (L / D) de las fibras, que representa la relación entre la longitud (L) y el diámetro (D) de las fibras de refuerzo (3), ya que de acuerdo a esto se evaluarán las propiedades mecánicas obtenidas del composite.

Este parámetro es de suma importancia ya que ofrece una idea clara de la unión interfacial, así como la transferencia de carga entre las fibras y la matriz de plástico. Existen varios estudios de refuerzo con fibras naturales como cáñamo o sisal, donde se presenta un mejoramiento de la matriz de plástico en sus propiedades mecánicas de los composites (4,5).

La combinación de diferentes polímeros con la matriz base de propileno mejora ciertas propiedades físicas como la resistencia a la tracción y la flexión, entre estos tenemos el tereftalato de polietileno (PET).

Las matrices poliméricas obtenidas se utilizan cada vez más para reemplazar piezas metálicas debido, entre otras cosas, a una mejor relación resistencia / densidad y bajo costo (6,7). Las fibras de refuerzo pueden variar entre sintéticas por ejemplo el Kevlar o Twaron (8), o fibras naturales provenientes de biomasa fibrosa que mejoran las propiedades principalmente de flexión a los composites con polipropileno reciclado (7,9). Sin embargo el principal problema de la adición de

PET a la matriz de PP es la inmiscibilidad de sus estructuras, razón por lo cual es importante la disminución de la tensión superficial entre los polímeros mediante el uso de un agente acoplante que disminuya la tensión superficial entre las fibras y la matriz consiguiendo su incorporación (10,11).

El presente estudio analiza dos metodologías de reciclaje de polipropileno: refuerzo con fibra natural y refuerzo con PET reciclado en los que se usa agente acoplante no convencional denominado anhídrido tereftálico para mejorar la interfaz entre el lado apolar de los refuerzos y el lado polar de la matriz de PP. Adicional se prueba con el mejoramiento de sus propiedades mediante tratamiento térmico como técnica adicional a las convencionales, utilizando plásticos post consumo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de las probetas de PP se usa una extrusora tipo husillo de 4983 mm de largo con un tornillo de diámetro de 50,9 mm y de 9 filetes a lo largo de este, calentado por tres resistencias eléctricas las cuales se controlan con 4 termocuplas en las diferentes zonas.

A la salida de la boquilla se enfría con un baño de agua y un posterior prensado para moldeo a presión de 3500 psi. Adicional cuenta con un variador de frecuencia para el control de las revoluciones de giro. Obteniendo probetas tipo A que están elaboradas con PP reciclado y tipo B composites de PET y fibra vegetal con y sin acoplante, como se muestra en las figuras 1 y 2, en donde se representa las diferentes longitudes de la probeta con l , el ancho de la probeta en la zona de prueba como b_1 y h como el espesor de la probeta.

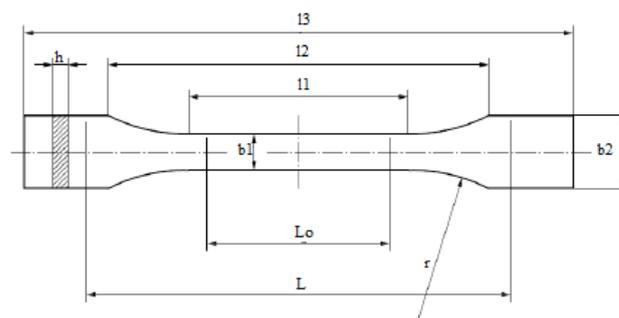


Figura 1. Molde de probeta Tipo B para plástico reforzado con fibra vegetal.

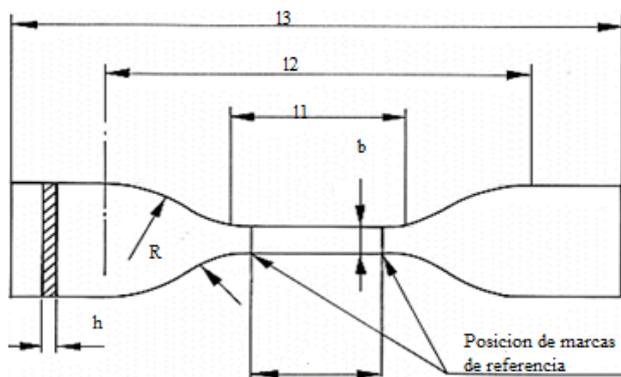


Figura 2. Probeta tipo A para ensayos de tracción en plástico en composites.

Fuente: Norma Internacional ISO 527-2:2012. Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.

Para el refuerzo con fibra natural, se trabajó con fibra de Abacá (*Musa textiles*) o también llamado cáñamo de manila y con fibra de Plátano (*Musa AAB*) proveniente del pseudotallo, variando los porcentajes en el rango de 10 a 30% de fibra. Mientras que para el tratamiento térmico mediante la temperatura de transición vítrea del PP reciclado se calculó la temperatura de recocido, teniendo la precaución de que la estabilidad dimensional de la pieza se preserve y que al mismo tiempo no aparezcan fenómenos de degradación térmica (12,13).

ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA VEGETAL

El abacá y el plátano pertenecen a la familia de las musáceas y poseen propiedades en común, razón por la cual se somete al mismo tratamiento ambos tipos de fibra. El cual consiste en una separación de sus vainas mediante un desfibrado manual, secado al sol y un posterior corte de la fibra hasta un tamaño de 5 mm de largo aproximadamente ya que con este tamaño de partícula se consigue una distribución de fibra en la matriz adecuada el momento de la extrusión. Las proporciones en que se empleó las fibras son 10, 20 y 30 % de fibra, en tratamientos con 1% de acoplante y sin acoplante.

Este método de procesamiento y preparación de los composites aseguró una buena distribución de fibra y una relación apropiada entre fibra y matriz que otorgó las propiedades mecánicas esperadas. La orientación en paralelo de las fibras asegura la homogeneidad en cuanto a distribu-

ción de sus componentes y de las propiedades mecánicas resultantes. Sin embargo al usarse fibras naturales que contiene lignocelulosa se debe prestar atención en mantener la temperatura de procesamiento relativamente baja (200°C) para evitar la descomposición de la fibra y la disminución de la resistencia de las fibras (8), razón por la que se determinó las condiciones de temperatura en las diferentes zonas y la velocidad de giro del tornillo que permitan una extrusión adecuada.

Para ello se trabajó con tres variantes en las temperaturas del tornillo, estimadas en el rango de 160 a 200 °C, datos sugeridos en estudios previos similares al presente trabajo. Tomando en cuenta como factor determinante la facilidad de trabajo en el proceso de extrusión y el grado de fluidez que toma el PP en conjunto con la fibra sin quemarse para obtener las probetas en las cuales se realizará las pruebas físico mecánicas.

El tornillo extrusor fue operado a una temperatura promedio de 185 °C en la zona de dosificación, en la zona de transición y compresión a una temperatura promedio de 175 °C y en la zona de alimentación a una temperatura promedio de 162 °C, variando la velocidad del tornillo entre 80 a 500 rpm en rangos de 50 hasta conseguir una presión de extrusión adecuada para cada tratamiento(14).

ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO CON PET

Para la preparación de las mezclas con PET se plantea un tratamiento variando 5, 10, 20 y 30 % de PET, acorde a lo expuesto por (15,16) y un segundo tratamiento con una concentración al 1, 3 y 5 % de anhídrido ftálico en polvo dentro de cada mezcla y sin acoplante.

De forma similar el perfil de temperatura para el composite con PET se definió en base a los puntos de fusión del polipropileno, polietileno tereftalato y el compatibilizador (anhídrido ftálico). El tornillo extrusor fue operado a una temperatura promedio de 190 °C en la zona de dosificación, transición y compresión y en la zona de alimentación a una temperatura promedio de 155 °C (10,15).

TRATAMIENTO TÉRMICO DE POLIPROPILENO RECICLADO

Se trabajó con dos temperaturas de recocido 125 y 135 °C, que se determinaron a partir de la temperatura de transición vítrea variando el tiempo de recocido de las probetas. La temperatura de la boquilla fue de 160 °C.

III. RESULTADOS

PROPIEDADES FÍSICAS POLIPROPILENO Y POLIETILENO TEREFALATO

Las muestras se denominan como B1, B2, B3 y B4 que corresponden a las composiciones de PET añadido en la matriz de PP, al 5, 10, 20 y 30 % de PET respectivamente. Mientras que se denominan como C1, C2 y C3 las probetas que corresponden a las composiciones de acoplante añadido en la matriz de PP/PET, al 1, 2, 3 % de PET respectivamente.

ENSAYO DE TRACCIÓN

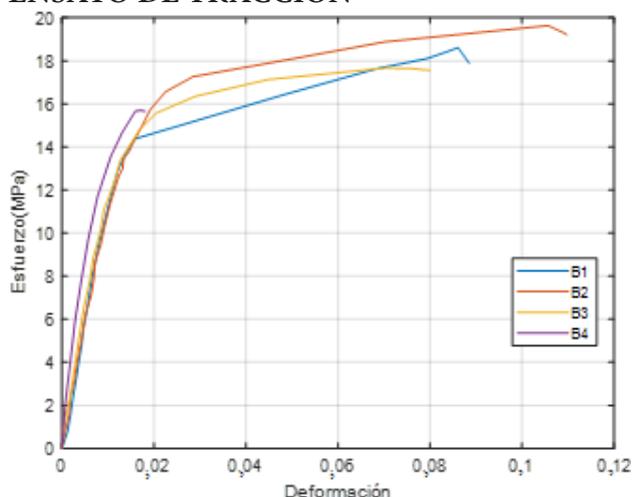


Figura 3. Esfuerzo vs deformación mezclas PP y PET sin acoplante.

En la Figura 3 y 4. se presenta las curvas de resistencia a los esfuerzos de tracción, para refuerzo tanto con fibra como con PET reciclado con y sin acoplante, donde se puede ver que las de tipo C presentan un mayor esfuerzo máximo esto debido a que el acoplante fortalece el composite al ayudar en la interfaz entre el PP y el PET y aumenta su resistencia consiguiendo valores cercanos a los 20 MPa (14,17).

En cuanto a la figura 3 donde se presenta los

composites sin acoplante se puede observar que la mezcla que da mejores propiedades en este ensayo es la correspondiente a la mezcla de 10% PET y 90%PP; mientras que en la figura 4 se puede observar que las probetas con acoplante presenta mayor resistencia con la composición de 5% PET y 95%PP, lo que quiere decir que cuando añadimos acoplante cambia el comportamiento a tracción de las mezclas, el PP mejora las propiedades de la mezcla por el fortalecimiento de la matriz debido al entrecruzamiento de los componentes en la estructura gracias a los puntos de anclaje que proporciona el agente acoplante llegando a una saturación máxima luego de una cantidad determinada de PET en este caso el 10% (18–20).

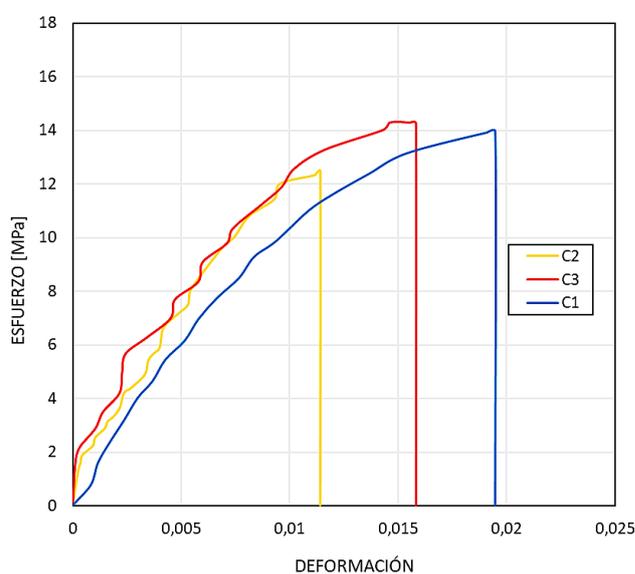


Figura 4. Esfuerzo vs Deformación mezclas PP y PET con acoplante.

ENSAYO DE FLEXIÓN

	MEZCLAS EXTRUIDAS						
	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Modulo Aparente de Elasticidad [MPa]	1708,5	1708,5	1708,5	1708,5	1750,4	1184,6	2908,9
Esfuerzo en la rotura [MPa]	30,1	24,9	31,1	33,7	33,3	32,2	32,0

Tabla 1. Resultados del ensayo de flexión de las mezclas extruidas.

Como se presenta en la tabla 1, la presencia de mayor cantidad de PET conjugado con la presencia de agente acoplante que permite la mejor distribución del refuerzo en la matriz de PP mejora la propiedad de flexión esto debido a las características en sí del PET y que se incorporan al composite(6,21).

PROPIEDADES FÍSICAS POLIPROPILENO Y FIBRA DE ABACÁ

A	B	C	D	E	F	G	H	I
PP		ABACÁ			PLÁTANO			
	10%	20%	10%	20%				
	s/a	c/a	s/a	c/a	s/a	c/a	s/a	c/a

Tabla 2. Nomenclatura para las muestras empleadas.
s/a: sin acoplante
c/a con acoplante

ENSAYO DE TRACCIÓN

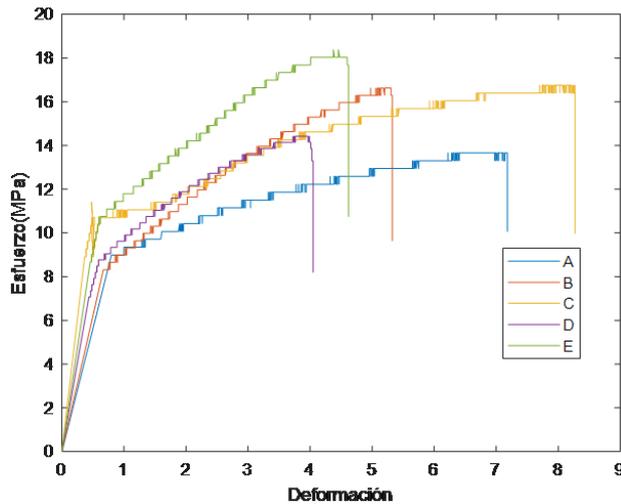


Figura 5. Resultados del ensayo de Tracción PP-Fibra.

De la figura 5 se puede observar que cuando tenemos una mezcla de 10 % de Abacá y 90 % de polipropileno el material compuesto presenta mayor deformación, debido a que las fibras tienen un comportamiento frágil al esfuerzo, pero una matriz dúctil (5,22).

ENSAYO DE FLEXIÓN

Pruebas	Unidad	B	C	D	E
Módulo de elasticidad	MPa	1119,81	2005,84	677,47	1767,37
Esfuerzo de Rotura	MPa	16,30	41,39	21,54	29,55
Flecha en la rotura	mm	24,56	14,52	7,77	8,60

A partir de la Tabla 2. se puede observar que cuando se trabaja con una mezcla de 10 % de Abacá y 90 % de polipropileno (C) el material compuesto alcanza su mayor flexibilidad, ya que la fibra es altamente flexible y combina estas propiedades con las de la matriz obteniendo un material que en un gran porcentaje aumenta su flexibilidad(23).

PROPIEDADES FÍSICAS POLIPROPILENO Y

FIBRA DE PLÁTANO

ENSAYO DE TRACCIÓN

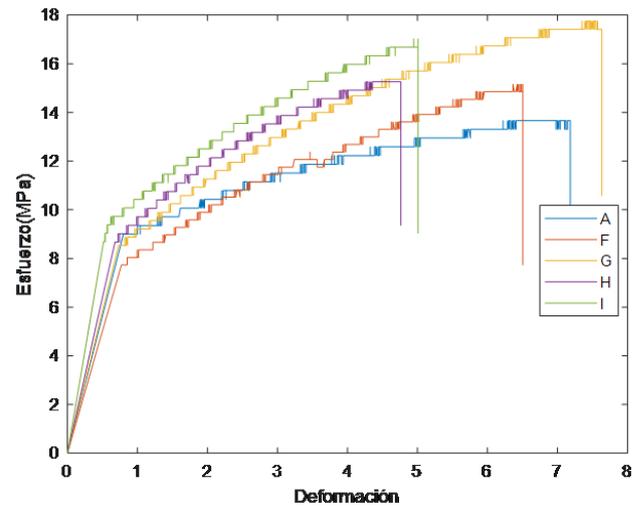


Figura 6. Resultados del ensayo de Tracción en mezcla PP-Fibra.

De la figura 6 se puede observar que cuando tenemos una mezcla (F) de 10 % de fibra de plátano y 90 % de polipropileno el material compuesto alcanza su mayor ductilidad, mejorando la ductilidad que presenta la matriz esto debido a que el material combina las propiedades de la matriz con la fibra.

ENSAYO DE FLEXIÓN

En cuanto a la propiedad de flexión de las muestras ensayadas se tiene que la mezcla de 10 % de fibra de plátano y 90 % de polipropileno el material compuesto alcanza su mayor flexibilidad, ya que la fibra es altamente flexible y combina estas propiedades con las de la matriz obteniendo un material que en un gran porcentaje aumenta su flexibilidad. Tanto del material compuesto con fibra de abacá y fibra de plátano podemos observar que las mejores propiedades se obtienen cuando tenemos un 10% de fibra y 90% de matriz (5,16,21).

PROPIEDADES FÍSICAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO

Realizadas las pruebas mecánicas a las probetas con recocido se muestra que la temperatura de 135 °C presenta buenos resultados mediante ambos enfriamientos con agua y con aire. Sin embargo, el enfriamiento con agua presenta una

pérdida del 54,4% en promedio del módulo de elasticidad debido al que enfriamiento brusco que genera matrices más rígidas (24,25). A pesar de esto al haber sido tratada a la misma temperatura ambas muestras presentan una entalpia de 55 y 56 J g⁻¹ respectivamente, así como un porcentaje de cristalización de 33 y 34 %, que comparado con el 24 % medido a las muestras iniciales de polipropileno reciclado presentan un considerable mejoramiento por la disminución de las zonas amorfas de la estructura.

IV. CONCLUSIONES

Las curvas de esfuerzo respecto a la deformación para el material compuesto desarrollado, en general presentan un comportamiento frágil ante la tensión, pero dúctil por su matriz polimérica; lo que está relacionado con una posible alineación longitudinal de las fibras en los casos en que se presenta mayor proporción de estas. Evidenciándose el mejoramiento de las propiedades del polipropileno reciclado al añadir un composite sea PET o sea fibra vegetal. Aumentando esta tendencia el momento de la adición de acoplante ya que genera una mejor distribución de las fi-

bras

Al realizar las diferentes pruebas mecánicas como son resistencia a la tracción, flexión y compresión a las probetas de PP reciclado y las injertadas con fibra obtenidos por extrusión, es notoria la incidencia de la fibra en los resultados en comparación al PP, en los ensayos de resistencia a la tracción mejora el esfuerzo de fluencia un 22% al trabajar con fibra de abacá con y sin acoplante, ensayos de flexión mejoran únicamente las propiedades al trabajar con 20% de fibra y uso de acoplante, mejorando las propiedades físicas y mecánicas de las probetas en forma general al trabajar con fibra de abacá y agente acoplante, esto debido a que el anhídrido ftálico promueve la adhesión entre la matriz de PP y cargas inorgánicas mediante la formación de enlaces químicos estables entre la matriz orgánica y la superficie de la carga.

En cuanto, al tratamiento térmico realizado al polipropileno, mejora las propiedades de cristalinidad del PP debido a su re estructuración con la temperatura generando mayor dureza pero menor resistencia a la flexión.

R eferencias

1. Sullins T, Pillay S, Komus A, Ning H. Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments. *Compos Part B Eng* [Internet]. 2017;114:15–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.001>
2. Shrivastava A. Environmental Aspects of Plastics. *Introd to Plast Eng*. 2018;207–32.
3. Gu F, Guo J, Zhang W, Summers PA, Hall P. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Sci Total Environ*. 2017;601–602:1192–207.
4. Lila MK, Singhal A, Banwait SS, Singh I. A recyclability study of bagasse fiber reinforced polypropylene composites. *Polym Degrad Stab* [Internet]. 2018;152:272–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.001>
5. Senthilkumar K, Saba N, Rajini N, Chandrasekar M, Jawaid M, Siengchin S, et al. Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. *Constr Build Mater* [Internet]. 2018;174:713–29. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143>
6. Matias AA, Lima MS, Pereira J, Pereira P, Barros R, Coelho JFJ, et al. Use of recycled polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study. *Waste Manag*. 2020;101:250–8.
7. Bommanna K, Shanthakumar GC. Study of Sisal Fibre Attrition and Characterization during Direct Extrusion Compression Moulding. *Mater Today Proc* [Internet]. 2018;5(5):13251–7. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.316>
8. Bledzki AK, Franciszczak P, Osman Z, Elbadawi M. Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers. *Ind Crops Prod* [Internet]. 2015;70:91–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.013>

9. Dickson AR, Sandquist D. Mode of wood fibre breakage during thermoplastic melt processing. *Compos Part A Appl Sci Manuf* [Internet]. 2018;112(July):496–503. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.004>
10. Nonato RC, Bonse BC. A study of PP/PET composites: Factorial design, mechanical and thermal properties. *Polym Test* [Internet]. 2016;56:167–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.005>
11. Saba N, Paridah MT, Jawaid M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. *Constr Build Mater* [Internet]. 2015;76:87–96. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>
12. Awoyera PO, Adesina A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Stud Constr Mater* [Internet]. 2020;12:e00330. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
13. Pang YX, Jia DM, Hu HJ, Hourston DJ, Song M. Effects of a compatibilizing agent on the morphology, interface and mechanical behaviour of polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends. *Polymer (Guildf)*. 2000;41(1):357–65.
14. Francioso V, Moro C, Castillo A, Velay-Lizancos M. Effect of elevated temperature on flexural behavior and fibers-matrix bonding of recycled PP fiber-reinforced cementitious composite. *Constr Build Mater* [Internet]. 2021;269(xxxx):121243. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121243>
15. Cardfelt A. Model system study of recycled polyethylene terephthalate and polypropylene blends by. 2015;(162).
16. Mahendra IP, Wirjosentono B, Tamrin, Ismail H, Mendez JA, Causin V. The influence of maleic anhydride-grafted polymers as compatibilizer on the properties of polypropylene and cyclic natural rubber blends. *J Polym Res*. 2019;26(9).
17. Akshaya EM, Palaniappan R, Sowmya CF, Rasana N, Jayanarayanan K. Properties of Blends from Polypropylene and Recycled Polyethylene Terephthalate using a Compatibilizer. *Mater Today Proc* [Internet]. 2020;24:359–68. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.287>
18. Matias AA, Lima MS, Pereira J, Pereira P, Barros R, Coelho JFJ, et al. Use of recycled polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study. *Waste Manag*. 2020;101:250–8.
19. Wu J, Chen T, Luo X, Han D, Wang Z, Wu J. TG/FTIR analysis on co-pyrolysis behavior of PE, PVC and PS. *Waste Manag* [Internet]. 2014;34(3):676–82. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.005>
20. Wu MH, Wang CC, Chen CY. Chemical modification of atactic polypropylene and its applications as a crystallinity additive and compatibility agent. *Polymer (Guildf)* [Internet]. 2020;194(March):122386. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122386>
21. Hidayah Marzuki N, Irfiani N, Uzir Wahit M, Othman N, Izyan Syazana Mohd Yusoff N. Mechanical properties of kenaf fiber and montmorillonite reinforced recycled polyethylene terephthalate/recycled polypropylene. *Mater Today Proc* [Internet]. 2018;5(10):21879–87. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.046>
22. da Costa HM, Ramos VD, de Oliveira MG. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polym Test*. 2007;26(5):676–84.
23. López Gayarre F, Suárez González J, Blanco Viñuela R, López-Colina Pérez C, Serrano López MA. Use of recycled mixed aggregates in floor blocks manufacturing. *J Clean Prod*. 2017;167:713–22.
24. Cely MM, Castellar O. G, Pereira C. J, Ángel V. R. Efecto de la velocidad de calentamiento sobre las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de aleaciones de titanio modificadas. *Ingeniare Rev Chil Ing*. 2018;26(4):577–84.
25. Wan C, Sun G, Gao F, Liu T, Esseghir M, Zhao L, et al. Effect of phase compatibility on the foaming behavior of LDPE/HDPE and LDPE/PP blends with subcritical CO₂ as the blowing agent. *J Supercrit Fluids* [Internet]. 2017;120:421–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2016.05.038>

DETERMINANTES GENÉTICOS Y SUS MECANISMOS DE ACCIÓN IMPLICADOS EN LA RESISTENCIA BACTERIANA A METALES PESADOS: UNA REVISIÓN.

Genetic determinants and their mechanisms of action involved in bacterial resistance to heavy metals: a review.

¹Iza Guaman Joana Fernanda* , ¹Recalde Moreno Celso Guillermo , ²Iza Guaman Cristian Fabricio

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental / Grupo de Energías Alternativas y Ambiente, Riobamba, Ecuador.

²Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño ETSID, Valencia, España.

*joana.iza@esPOCH.edu.ec

R esumen

Se identificó y describió los principales determinantes genéticos implicados en la resistencia bacteriana a metales pesados reportados en la literatura, así como sus usos a nivel biotecnológico y ambiental. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de información de los últimos 10 años encontrados en revistas con indexación SJR disponibles en las diferentes bases de datos; bosquejando la situación actual del conocimiento sobre el tema y realizando comparaciones cualitativas entre las investigaciones seleccionadas. Las bacterias se encuentran en constante evolución y se vuelven más resistentes gracias a la adquisición de genes que les permite hacer frente a los efectos tóxicos de los metales. Por ello, se compiló desde varios autores los determinantes genéticos de resistencia bacteriana para los metales, como el arsénico, mercurio, cromato y cadmio siendo respectivamente: *ars*, *mer*, *chr*, *cad* y *czc*; estos sistemas pueden localizarse en el cromosoma o plásmidos de las bacterias. Se describe el mecanismo de acción que codifica cada determinante, siendo la regulación y la desintoxicación enzimática los principales mecanismos. Finalmente, se comparó las aplicaciones biotecnológicas y ambientales de los determinantes, encontrándose un amplio uso en la construcción de biosensores y organismos genéticamente modificados.

Palabras Claves: Proteínas, enzimas, transcripción, transgénicos

A bstract

The main genetic determinants involved in bacterial resistance to heavy metals reported in the literature were identified and described, as well as their uses at biotechnological and environmental levels. A bibliographic review of information from the last ten years found in SJR indexed journals available in different databases was carried out, outlining the current state of knowledge on the subject and making qualitative comparisons between the selected researches. Bacteria are constantly evolving and becoming more resistant thanks to the acquisition of genes that enable them to cope with the toxic effects of metals. Therefore, the genetic determinants of bacterial resistance to metals such as arsenic, mercury, chromate and cadmium were compiled from several authors, being respectively: *ars*, *mer*, *chr*, *cad* and *czc*; these systems can be located in the chromosome and plasmids of bacteria. The mechanism of action encoded by each determinant is described, mainly regulation and enzymatic detoxification. Finally, the biotechnological and environmental applications of the determinants were compared, finding wide use in the construction of biosensors and genetically modified organisms.

Keywords: Proteins, enzymes, transcription, transgenics

Fecha de recepción: 24-09-2021

Fecha de aceptación: 09-11-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental generada por metales pesados es una de las principales preocupaciones a nivel mundial, altas concentraciones de estos elementos constituyen un grave problema, porque tienden a bioacumularse en el medio ocasionando daño celular y disfunción de los sistemas vitales en los organismos vivos que entran en contacto con ellos (1). Algunos metales como el Ni y Co, son esenciales a bajas concentraciones porque actúan como cofactores enzimáticos, pero los metales como el Hg, Cr, Cd, Pb entre otros resultan tóxicos incluso a bajas concentraciones (2). Los entornos que presentan elevadas concentraciones de metales pesados constituyen un factor determinante en la evolución de la fisiología celular de ciertas especies bacterianas, ya que les permite desarrollar mecanismos para adaptarse y sobrevivir a estos medios cambiantes (3).

La asociación entre los contaminantes y la microbiota residente da lugar a una serie de procesos adaptativos que finalmente se expresan como mecanismos de resistencia, los cuales pueden ser codificados genéticamente, constitutivos o inducidos por la presencia del metal (3,4). Los mecanismos de resistencia desarrollados por las bacterias se encuentran asociados a los denominados determinantes genéticos, los cuales pueden estar localizados en el cromosoma o en elementos genéticos móviles (2).

Las comunidades bacterianas en los sitios contaminados prosperan con la carga orgánica acumulada, productos tóxicos y metales pesados presentes en ellos. En dicho entorno, se espera que los microorganismos residentes posean genes que les permita degradar diversos contaminantes (5,6). En la presente revisión se identificó y describió los principales determinantes genéticos implicados en la resistencia bacteriana a metales pesados, así como sus usos potenciales a nivel biotecnológico y ambiental.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

IDENTIFICACIÓN:

Revisión bibliográfica de la literatura en las ba-

ses de datos (Scimago Journal & Country Rank; Redalyc; Scielo; Science Direct; Pubmed-NCBI, Nature, Oxford Academic, Plos, Elsevier, Scopus) a partir de un protocolo de búsqueda exhaustivo. Se emplearon palabras clave como: *ars* operón, *mer* operón, *chr* operón, *cad* operón. Adicionalmente, se usaron operadores booleanos con las palabras clave como: *ars* operon AND mechanism, *mer* operon AND mechanism, *cad* mechanism OR expression, *chr* mechanism OR expression.

TAMIZACIÓN:

En esta etapa se aplicaron los criterios de inclusión: estudios dentro de revistas SJR de alto impacto, máximo 10 años de antigüedad, disponibles en el idioma inglés o español, con términos de búsqueda en el título o resumen y que contengan información referente a los determinantes de resistencia a metales pesados y sus mecanismos de acción.

ELECCIÓN:

Los criterios de exclusión correspondían a estudios que no contengan información relevante, se excluyeron investigaciones que no reporten información completa como: los genes que intervienen en el mecanismo de resistencia, aquellos que no especifiquen los productos de los genes implicados en la resistencia, información sin datos de los ensayos, aquellos que no muestren el efecto del metal sobre el crecimiento bacteriano.

INCLUSIÓN:

A los estudios seleccionados con las fases anteriores se les realizó la extracción de las siguientes variables: año y lugar de estudio, tipo de determinante genético, mecanismo de acción investigado y potencial biotecnológico y ambiental.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN:

En el análisis se realizó una síntesis cualitativa de la información.

III. RESULTADOS

DETERMINANTES DE RESISTENCIA AL ARSÉNICO Y SUS MECANISMOS

La organización de los operones *ars* varía entre

las diferentes cepas bacterianas; sin embargo, existen genes centrales que siempre están presentes, un claro ejemplo es el operón *arsRBC* presente en *Pseudomonas fluorescens* MSP3, *Staphylococcus aureus* y *Exiguobacterium antarcticum* B7 (1,2). Otro conjunto de genes presente en pocos genomas es el operón *arsRDABC*, este sistema se ha identificado en *Acidiphilium multivorum* AIU301 y en el plásmido R733 de *Escherichia coli* (3,4). En todos estos genomas se evidencia la presencia del gen *arsR*, no obstante, en *Shewanella* sp. O23s, *arsR* no se encuentra dentro del conjunto de genes *ars*, pero sigue regulando la expresión del operón (5). El producto génico de *arsR* es un represor transcripcional que responde a As^{3+} (6,7). En *Rhodopseudomonas palustris* CGA009 cuando el As^{3+} está ausente, ArsR se une a la región operador/promotor del operón y, por lo tanto, reprime la transcripción de los genes aguas abajo. En contraste, cuando el As^{3+} está disponible, ArsR se une a él y pasa por cambios conformacionales, disociándose de la región operador/promotor (8,9).

El gen más frecuente en el entorno es *arsC*, su diversidad es producto de su funcionamiento en condiciones aeróbicas, anaeróbicas e incluso en amplios rangos de pH y temperatura, incluidos los extremos (10,11). En contraste, se ha encontrado que *arsB* y *acr3* están ampliamente distribuidos en el genoma de bacterias resistentes al arsénico (12). Por su parte, Li et al. (13) identifican al gen *acr3* como la principal bomba de salida de As^{3+} en la familia *Burkholderiaceae*. Asimismo, *Bacillus* sp. PVR-YHB1-1 y 58 de 98 aislados de *Campylobacter* sp., portan el gen *acr3* (14,16). Por el contrario, el gen *arsB* ha sido identificado en *Acidithiobacillus ferrooxidans* AO1, *Pseudomonas putida* KT2440 y está presente en 76 de 98 aislados de *Campylobacter* sp. (17, 18, 16).

Los productos génicos de los determinantes *arsB* y *acr3*, llevan a cabo el mecanismo de expulsión del As^{3+} de la célula. El sistema de eflujo de As^{3+} en *C. glutamicum* se basa en dos permeasas Acr3 que no usan ATP para la liberación del As^{3+} ; sin embargo, trabajan juntas con diferente eficiencia (9). Villadangos et al. (19) mostraron que CgAcr3-1 es un antiportador que cataliza el intercambio de arsenito-protón con los residuos Cis129

y Glu305. Por el contrario, en *Exiguobacterium* sp., aislada de lagos andinos de altura de los Andes Sudamericanos, se ha identificado la bomba ArsB, la cual no contiene cisteínas conservadas y no hay tiolatos implicados en la translocación de As^{3+} (2,19)

Los genes *arsA* y *arsD* están presentes en el genoma de *O. tritici* SCII24T, *A. multivorum* AIU301 y en *E. coli*. En la cepa AIU301, se ha demostrado la función reguladora del gen *arsD* (15, 18, 4, 20). Por otra parte, en *Bacillus* sp. PVR-YHB1-1 y CDB3, este par de genes siempre están juntos, porque presentan funciones interrelacionadas, es decir, el producto génico de *arsD* funciona como una metalochaperona, que transfiere arsénico al gen *arsA* y activa la bomba de salida de As^{3+} (20, 14, 21, 22).

Los operones *ars* confieren resistencia al arsénico inorgánico, pero también pueden acoplarse con otros genes *ars* para permitir la desintoxicación de los organoarsénicos (23, 4). Por otro lado, el gen *arsM* de *R. palustris* CGA009 permite la generación de compuestos metilados, en esta cepa, *arsM* se induce por As^{3+} (8). Firrincieli et al. (24) han identificado el gen *arsI* en varias cepas de *Rhodococcus* sp., principalmente, en *Rhodococcus aetherivorans* BCP1 (21). La actividad de ArsI depende de Fe^{2+} y usa O_2 para la ruptura del enlace, la unión de O_2 a Fe^{2+} permite la transferencia de electrones, convirtiendo el O_2 en un anión superóxido (O_2)⁻² que ataca a los organoarsénicos y forma un intermedio alquilperoxo- Fe^{2+} , rompiendo el enlace C-As (25).

El gen *arsH* está presente solamente en bacterias aeróbicas, como *O. tritici* SCII24T y *A. ferrooxidans* AO1 (26, 15, 27). Por otro lado, Shen et al. (16) identifican el gen *arsP* en 54 aislados de *Campylobacter jejuni*, y evidencia la presencia de *arsP* en bacterias aeróbicas, no obstante, también está presente en bacterias anaeróbicas (26). Chen et al. (29) proponen un mecanismo llevado a cabo por ArsH: la reacción reductora consiste en la formación de un complejo FMN-NADPH oxidado seguido de una transferencia de hidruro de NADPH a FMN, generando FMNH₂ y liberando NADP⁺. En la reacción oxidativa, una molécula organoarsénica se coloca cerca del

FMNH2. La flavina reducida es oxidada por O_2 , produciendo H_2O , seguido de la oxidación del arsénico trivalente.

DETERMINANTES DE RESISTENCIA AL MERCURIO Y SUS MECANISMOS

En *Bacillus thuringiensis* PW-05 aislado de la costa de Odisha, se ha identificado el determinante *merRTPA*, siendo el conjunto de genes más simples para la resistencia al Hg^{2+} (30). El operón *mer* es regulado por el gen *merR*, sin embargo, en los *Bacteroidetes* aislados del Alto Ártico, no está presente este gen, sino *arsR*, en consecuencia, es posible que *merR* sea un desarrollo posterior en la evolución del operón *mer*, que reemplaza a los genes reguladores *arsR* y genera sistemas *mer* más eficientes (31). La proteína MerR en ausencia de Hg^{2+} , reprime la transcripción de los genes estructurales al capturar la ARN polimerasa en un estado inactivo cerrado. En presencia de Hg^{2+} , MerR se une a una secuencia de ADN en las regiones -35 y -10 de su ADN promotor. Tras la unión de Hg^{2+} , los cambios de conformación de MerR inducen un subenrollamiento del ADN promotor, facilitando la formación de un complejo abierto para iniciar la transcripción (32).

Los genes *merP* y *merT* se distribuyen por todo el árbol filogenético (33). Por el contrario, Jan et al. (34) identificaron que de 18 cepas aisladas de sitios contaminados de la India, 14 aislados portaban el gen *merP* y solo 12 cepas el gen *merT*. Principalmente, *P. aeruginosa* ARY1 y *Klebsiella* sp. ND3 portaban el gen *merP* y *merT*. Además, *Klebsiella pneumonia* ND6 portaba el gen *merP*, pero carecía de *merT*, por lo tanto, se evidencia que la función de *merT* es compensada por otro gen transportador. El gen *merP* codifica para la proteína MerP, que elimina el Hg^{2+} o el CH_3Hg en el periplasma y lo transfiere a los diferentes transportadores (35, 36). En el transposon Tn501 de *P. aeruginosa*, el Hg^{2+} es secuestrado por el par de grupos tiol en MerP y posteriormente, transferido al par de grupos tiol ubicados en el primer dominio transmembrana de MerT. A continuación, el Hg^{2+} unido, se pasa a través de la membrana hasta el par de cisteínas en la cara citoplásmica de MerT (37). Desde MerT, el Hg^{2+} pasa a MerA.

El gen *merA* es el determinante clave para la resistencia al Hg^{2+} y se encuentra omnipresente en el entorno (38, 39). Sin embargo, Boyd y Barkay (33) establecen que el gen *merA*, no se encuentra en taxones y gremios microbianos completos y rara vez es identificado en anaerobios estrictos (33). En contraste, la bacteria aeróbica *P. pseudoalcaligenes* carece de *merA*, por lo tanto, la resistencia al Hg^{2+} depende de una estrategia mediada por *merT* y *merP* (40). Lian et al. (41) proponen un mecanismo para el gen *merA* presente en el Tn 501 de *P. aeruginosa*: Cis11 y 14 están presentes en el dominio N-terminal de MerA; NmerA se une y entrega el Hg^{2+} al par de cisteínas C-terminal (Cis 558 y 559) (42). Después de que el Hg^{2+} se une a este par de cisteínas, la cola C-terminal cambia de conformación y mueve el complejo al interior de la proteína donde el Hg^{2+} se transfiere al par de cisteínas del sitio activo, Cis 136 y 141. El otro sustrato (NADPH), transfiere un hidruro a FAD, produciendo $FADH_2$ y NADP⁺ oxidado. Luego, $FADH_2$ reduce el complejo Cis141-S- Hg^{2+} -S-Cis136 para producir Hg^0 .

El gen *merB* del sistema de espectro ancho otorga la resistencia a los compuestos organomercuriales. Mindlin et al. (28) identifican el gen *merB* en la cepa *A. lwoffii* ED23-35 aislada del permafrost. De modo similar, en el Tn 6294 de *Bacillus* sp. EOA1 aislada de Taiwan y *Pseudomonas putida* W619 aislada de un suelo contaminado con níquel está presente el gen *merB* (43, 44). Boyd y Barkay (33) han identificado que 42 cepas, principalmente, distribuidas entre los *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Firmicutes* y *Proteobacterias* portan el gen *merB* en su genoma. Paralelamente, se ha identificado la presencia del gen *merB* en las *Gamma Proteobacterias* aisladas del Alto Ártico (31). A partir de estos ejemplos, resulta evidente la distribución de *merB* en bacterias Gram negativas, sin embargo, se reporta que es más común en bacterias Gram positivas (45).

El producto génico de *merB* del plásmido R831b presenta la Cis96, 159 y Asp 99 que son los residuos catalíticos conservados en las proteínas MerB. Guo et al. (46) definen dos mecanismos llevados a cabo por *merB*. En el primero, el CH_3-Hg se une a uno de los dos residuos de cisteína

del sitio activo (Cis96 o 159) (47). La otra cisteína dona un protón al grupo saliente (CH_3^-), generando la escisión del enlace y la formación de CH_4 . En el segundo mecanismo, el $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se une a una de las dos cisteínas del sitio activo, pero en lugar de protonar el grupo saliente, la otra cisteína transfiere un protón a Asp99. Este paso permite que ambas cisteínas se coordinen con el metilmercurio. Tras la coordinación, Asp 99 protona el (CH_3^-) saliente y produce los productos de ruptura Hg^{2+} y CH_4 .

Los operones *mer* han aumentado sus complementos genéticos y por tal razón su diversidad funcional (48). Los genes que codifican transportadores alternativos son comunes en operones de evolución reciente (33). Se ha identificado que el gen *merG* está presente (de 272 aislados) en 3 cepas de *Pseudomonas* sp., y en 2 cepas aisladas del suelo, lo que sugiere la presencia de *merG*, solo en cepas que contengan el gen *merB* (33). El gen *merF* en *Proteus mirabilis* PW4c ha sido identificado como un transportador, en cambio, en *Pseudomonas stutzeri* 273 aislada de sedimentos de mar, *merF* es el gen clave para la formación de flagelos (49, 48). Hwang et al. (50) caracterizaron la dinámica de MerF unido al Hg^{2+} , al recibir el Hg^{2+} de MerP, la Cis 21 y 22 de MerF lo transfiere a Cis 71 y 72, las cuales lo transfieren a MerA en el citoplasma. MerF presenta dos pares de cisteínas universalmente conservadas, debido a su función en el transporte de Hg^{2+} (35).

Determinantes de resistencia al cromato y sus mecanismos

El determinante de resistencia al cromato (*chr*), se ha detectado en varios géneros bacterianos. Adekanmbi et al. (49) identificaron (de 40 cepas aisladas de aguas residuales de impresión) los genes *chrAB* en *P. aeruginosa*, *Providencia vermicola* PWAP3 y *P. mirabilis* PW4c corroborando la distribución de los genes *chr* en los plásmidos de bacterias Gram negativas. De manera similar, este mismo sistema de genes se ha identificado en los plásmidos de 40 aislados de las *Enterobacteriaceae* (de 109 aislados nosocomiales) y en las cepas ED9-5a y EK30A de *A. lwoffii* (51, 28). En contraste, el gen *chrA*

puede estar presente en plásmidos y cromosomas de *Proteobacterias* (*Shewanella oneidensis* MR-1), *Cyanobacteria*, *Actinobacteria* y *Firmicutes* (52, 51, 53).

O. tritici 5bv11 y *Burkholderia xenovorans* LB400 contienen el determinante *chrBACF* ubicados en el cromosoma y en un mega plásmido respectivamente (54, 55). *Cupriavidus metallidurans* CH34 contiene genes para la resistencia al Cr^{6+} en el plásmido pMOL28 y en el cromosoma (56). No obstante, solamente *chrB* y *chrA* son esenciales para la resistencia al cromato (57). Tanto en *O. tritici* 5bv11 y *Lysinibacillus sphaericus* Ot4b.31; *ChrB* se induce por Cr^{6+} , esta interacción evita que *ChrB* se una a la región promotora generando una desrepresión del sistema que conduce a la expresión de los genes estructurales (54, 58). En contraste, *ChrB* de *C. metallidurans* CH34 activa el sistema *chr* en respuesta al cromato y sulfato (54). De manera similar, Verdugo y Julia (59) establecen que *ChrS* de *Bacillus subtilis* 168, regula negativamente el operón *chr* por la unión de *ChrS* a la región reguladora de su propio gen, y lo regula positivamente por Cr^{6+} (59).

Branco y Morais (61) establecen la importancia de los genes *chrC* y *chrF* para evitar la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en las células sometidas a estrés por cromato; además, establecen una gran similitud entre el producto génico de *chrC* de la cepa 5bv11 con la Fe-SOD (*ChrC*) de *C. metallidurans* CH34. En contraste, el producto génico de *chrF* de *Cupriavidus neocaledonicus* STM 6070 aislada de un suelo rico en níquel y el producto del gen *chrI* de *C. metallidurans* CH34 han sido identificados como represores del operón *chr* (62, 63). Sin embargo, esto difiere de otro estudio, en el cual identifican que *chrF* codifica para un superóxido dismutasa (Mn-SOD) (61).

Determinantes de resistencia al cadmio y sus mecanismos

El sistema de resistencia al cadmio en las bacterias Gram positivas es el sistema *cad*, se ha identificado el conjunto de genes *cadCA* en *S. aureus* ATCC12600 aislado de un ambiente

hospitalario, en *Bacillus vietamensis* 151–6 y *Bacillus marisflavi* 151–25 aisladas de un suelo contaminado con cadmio (64, 65, 66, 67). Por otro lado, en el genoma de la cepa JMAK1 de *Bacillaceae* aislada de la estación Concordia de la Antártica, se ha evidenciado la presencia de los genes *cadA*, *cadC* y *cadD* (68). El gen *cadC* codifica para el represor CadC que se disocia del operador/promotor de *cad* tras la unión de Cd^{2+} (65). CadC de la cepa ATCC12600 presenta dos sitios de unión al metal (64). Por el contrario, CadC de *Listeria monocytogenes* EGDe, carece del sitio de tipo II. En esta cepa, CadC es un regulador dependiente de Cd^{2+} para la expresión de *cadAC* y *lspB* (69).

Los genes *cadXD* son otro mecanismo de resistencia al cadmio y zinc; se ha identificado este sistema en *S. aureus* ST398-t571 aislado de una muestra nasal (70). Del mismo modo, se ha encontrado en *S. aureus* y *A. ferrooxidans* ATCC 23270, el operón *cadXB* y *cadAB* respectivamente (71, 72). Adicionalmente, la resistencia al cadmio en *P. aeruginosa* BC15 aislada de aguas residuales y *P. putida* W619 aislada de un sitio contaminado con níquel; se logra mediante la función de dos genes vitales *cadR* y *cadA* (73, 74).

CadR de *P. aeruginosa* BC15, reprime su propia expresión y la de *cadA* en ausencia de Cd^{2+} , pero se induce en su presencia. CadR presenta 2 tipos distintos de sitios de unión a metales en el extremo C-terminal. Prabhakaran et al. (74) establecen que los residuos de cisteína inician la expresión de CadR desde su promotor, además, la curvatura en PcadR permite a la ARN polimerasa acceder al sitio completo del promotor para la transcripción. Al unirse el Cd^{2+} al sitio I, orienta el dominio C-terminal, cambiando el promotor de un estado represor a un estado parcialmente distorsionado. Con una mayor unión de Cd^{2+} al sitio II, CadR se estabiliza y se transforma en un activador estable (23)

Tynecka et al. (82) proponen un mecanismo llevado a cabo por CadA para extruir el Cd^{2+} : dos Cd^{2+} ingresan a través del uniportador de Mn^{2+} , la unión de Cd^{2+} a CadA provoca la fosforilación de la proteína por ATP, y un cambio de conformación de la cara citoplasmática al

periplasma. En consecuencia, un mayor número de protones bombeados a través de la cadena respiratoria compiten con el Cd^{2+} externo y se unen a sitios de superficie de baja afinidad en CadA. Finalmente, los protones cotransportados hacia abajo a través del canal, extruden dos Cd^{2+} a través del intercambio $\text{Cd}^{2+} / \text{H}^+$.

Un sistema de resistencia al Cd^{2+} , Co^{2+} y Zn^{2+} en bacterias Gram negativas es el sistema (*czc*). *P. putida* SB32 y *Pseudomonas monteilii* SB35 contienen en sus plásmidos el sistema *czc* (65,75). En *A. ferrooxidans* ATCC 23270 y en *Marinobacter adhaerens* HP15 aislada de un entorno marino, se han encontrado los genes: *czcA*, *czcB* y *czcC*, además, se ha evidenciado que la bomba *czcABC* en la cepa HP15 es específica para zinc (72, 76, 77). El sistema *czcICBA* es el determinante más conservado en el género *Cupriavidus*, por lo tanto, resulta evidente su presencia en *C. metallidurans* CH34 y BS1 (78,77).

Potencial biotecnológico de los determinantes genéticos

La constante búsqueda de nuevas cepas microbianas potencialmente resistentes a iones tóxicos, ha abierto el camino hacia el descubrimiento de tecnologías innovadoras basadas en el empleo de estos microorganismos. Es así que los determinantes de resistencia poseen una gama de aplicaciones, entre estas se incluyen su uso para la construcción de biosensores y de organismos útiles para la descontaminación del medio (79, 86, 83).

La tabla 1, detalla los avances más actuales en el desarrollo de biosensores mediante el uso de genes reguladores: *arsR*, *merR*, *cadC*, y *chrB*

Biosensor	Rango de detección	Gen bacteriano	Referencia
Biorreportador bioluminiscente para la evaluación de la contaminación por arsénico en muestras de agua de la India	0,74 - 60 $\mu\text{g/L As}^{3+}$	<i>arsR-lux</i>	(79)
Biosensor bacteriano a base de color de bajo costo para medir el arsénico en el agua subterránea.	10 - 500 $\mu\text{g/L As}^{3+}$	<i>arsR-lacZ</i>	(80)

Biosensor bacteriano para la detección de mercurio en soluciones líquidas.	10 ⁻⁴ y 10 ⁻⁸ M Hg ²⁺	<i>merR-gfp</i>	(81)
Biosensor bacteriano de células completas para la detección de cadmio.	1 mM; 1 μM; 10nM Cd ²⁺	<i>cadC-gfp</i>	(79)
Bioinformadores de células enteras altamente sensibles y específicos para la detección de cromato en muestras ambientales	1 μM -50 μM Cr ⁶⁺ ; 0,1 - >50 μM Cr ⁶⁺	<i>chrB-gfp</i>	(83)

Tabla 1. Biosensores basados en diferentes genes de resistencia a metales pesados

Una mayor familiaridad con el circuito regulador de los determinantes genéticos se ha aprovechado para la construcción de biosensores. Sharma et al. (79) altera *E. coli* DH5α para producir luz cuando entra en contacto con iones de As³⁺. Fusionaron el gen *arsR* y el gen *lux*. El biosensor exhibió un rango de detección de 0,74 a 60 μg/L As³⁺, la luz fue emitida a los 30 minutos de exposición, obteniendo resultados confiables a las 2 h. En contraste, Huang et al. (80) generaron un biosensor basado en color; el casete *arsR-lacZ* fue insertado en la cepa de *E. coli* DH5. Su rango de detección fue de 10 a 500 μg/L de As³⁺ y a las 3 h se evidenció el color azul. Este biosensor provee una señal de color confiable, y es útil para la detección rápida del As³⁺.

Debido a la alta toxicidad del mercurio en el agua, Roointan et al. (81) han construido un biosensor usando el gen *merR* de *Pseudomonas* sp. y la proteína de fluorescencia verde (GFP) en la cepa *E. coli* BL21 (DE3). Su rango de detección fue de 10⁻⁴ y 10⁻⁸ M a las 3 h. A concentraciones bajas la expresión de GFP es baja y a concentraciones altas la expresión de GFP se reduce. La sensibilidad y el breve tiempo de respuesta resulta ventajoso para la detección *in situ* de la contaminación por mercurio en agua. Según los valores estándar de mercurio en agua (0,001 mg/L), este rango de detección es consistente para su aplicación. Sin embargo, debido a la falta de *merA* en el biosensor, se dio una reducción de la intensidad de la fluorescencia a altas concentraciones.

Por otro lado, el gen regulador del operón *cad* se usó para la construcción de un biosensor microbiano en respuesta a Cd²⁺; *E. coli* BL21 (DE3) se empleó como una cepa bacteriana del sensor; el promotor/operador de *cad*, el gen *cadC*

y *gfp*. La concentración detectable más baja del biosensor a 37 °C fue 1 mmol/L, disminuyendo a 1 μmol/L a 25 °C y 10 nmol/L a 15 °C. Una de las ventajas de este biosensor es la mejora de la sensibilidad a baja temperatura, así como la respuesta selectiva y dependiente de la dosis de Cd²⁺.

Paralelamente, el desarrollo de bioinformadores para la detección de cromato, se basan en la expresión de *gfp* bajo el control del promotor *chr* y el gen regulador *chrB*. *E. coli* y *O. tritici* fueron diseñados para emitir fluorescencia en presencia de Cr⁶⁺. El biosensor de *E. coli* demostró ser específico y sensible, su rango de detección fue de 0,1 μM a 50 μM y la máxima fluorescencia se alcanzó a las 5 horas. En *O. tritici* el rango de detección fue de 1 μM a >50 μM, en este rango se dio la saturación de la señal de fluorescencia. Los 2 biosensores resultaron ser específicos y proporcionan utilidad en campo (83).

La tabla 2 detalla los microorganismos o plantas transgénicas que expresan determinantes de resistencia.

Planta o microorganismos modificado	Gen bacteriano	Nivel de resistencia	Referencia
<i>P. putida</i> KT2440	<i>arsM</i>	10 mM As ³⁺	(72)
<i>Escherichia coli</i> BL21 (DE3).	<i>chrB</i>	100 μM Cr ⁶⁺	(85)
<i>A. thaliana</i>	<i>merT</i>	10 mmol/L HgCl ₂	(86)
<i>A. thaliana</i> y <i>Nicotiana. tabacum</i>	<i>merAB</i>	10,000 μg/kg HgCl ₂ 100 μg/kg CH ₃ HgCl	(84)
<i>Oryza sativa</i> y <i>Solanum lycopersicum</i>	<i>merAB</i>	4000 μg/kg HgCl ₂ 4000 μg/kg CH ₃ HgCl	(84)

Tabla 2. Plantas y bacterias que expresan genes de resistencia a metales

La comprensión de los determinantes genéticos y las funciones que codifican ha facilitado la bioingeniería de células y plantas (33). Chen et al. (72) diseñaron genéticamente *P. putida* KT2440 con expresión estable de *arsM-gfp*. La cepa creció a concentraciones de As³⁺ de hasta 10 mM a diferencia de los controles, además, mostró una alta actividad de metilación y volatilización cuando se expuso a As³⁺ o As⁵⁺ 25 μM, después de 48 h, la mayor parte del arsénico fue metilado al ácido dimetilarsínico (DMA⁵⁺), ácido monometilarsínico (MA⁵⁺) y gas trimetilarsina (TMA⁵⁺). Esta capacidad de resistir al As³⁺, la hace una candidata para la remediación *in situ*

de suelos contaminados.

Zhou et al. (85) construyeron cepas de *E. coli* BL21 (DE3) que expresan el gen *chrB* de *O. tritici* 5bv11. La expresión de *chrB* la realizaron intracelular y en superficie y compararon la capacidad de adsorción de Cr^{6+} . Un nivel bajo de Cr^{6+} ($<10 \mu\text{M}$) en el medio, no inhibió el crecimiento de ninguna de las cepas. A concentraciones mayores a $100 \mu\text{M}$ Cr^{6+} , las células que expresan *ChrB* eran más resistentes a la toxicidad que las células control. *ChrB* expuesto en superficie eliminó el 99,1% del Cr^{6+} total (concentración inicial $0,5 \text{ mM}$) en 2 h. La capacidad máxima de adsorción de células de *E. coli* BL21 que expresan *chrB* intracelular fue de $235 \mu\text{mol/g}$ de peso seco de Cr^{6+} .

Xu et al. (86) generaron plantas de *A. thaliana* que expresan el gen *merT* de *Pseudomonas alcaligenes*. *A. thaliana* mejora la formación de la raíz bajo 10 mmol/L de HgCl_2 ; después de 5 días de estrés los controles mostraron disminución del contenido de clorofila, en contraste con las plantas que expresan *merT* (18,65% y 22,43%). Se evidenció menor contenido de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) y de ROS.

Las plantas no poseen la capacidad de desintoxicar el CH_3Hg , por tal razón, varias investigaciones se han enfocado en generar plantas que expresen el gen *merB* confiriéndoles la capacidad de desintoxicar por sí mismas este elemento (60). Li et al. (84) expresaron los genes *merAB* en *A. thaliana*, *N. tabacum*, *O. satyva* y *S. lycopersicum*. Demostraron que *N. tabacum* y *A. thaliana* transgénicas muestran resistencia a $10.000 \mu\text{g/kg}$ de HgCl_2 y $100 \mu\text{g/kg}$ de CH_3HgCl . El crecimiento de *S. lycopersicum* y *O. satyva* se inhibió a $4000 \mu\text{g/kg}$ de mercurio. Las plantas transgénicas redujeron 4 veces más la concentración de mercurio a diferencia de los controles. La expresión de estos genes permite la construcción de plantas útiles para procesos de fitorremediación.

IV. CONCLUSIONES

Los determinantes genéticos de resistencia a metales pesados principalmente para el arsénico, mercurio, cromo y cadmio son *ars*, *mer*, *chr*, *cad*, *czc* respectivamente. Estos se encuentran distribuidos en el genoma de una amplia gama de bacterias aisladas de entornos altamente contaminados; en estos sitios se ha identificado genes de resistencia que muestran una gran especificidad para los iones metálicos o sus derivados orgánicos.

A lo largo de la revisión se ha resaltado los mecanismos de acción llevados a cabo por los genes reguladores como: *arsR*, *merR*, *chrB*, *cadC*, *cadR*; del mismo modo, el mecanismo de reducción, metilación, desmetilación, y oxidación de los iones de metales pesados llevados a cabo por *merA*, *merB*, *arsA*, *arsI*, *arsM* y *arsH*. Existen bombas de eflujo para el mecanismo de expulsión de los metales cuando ingresan a la célula tal es el caso de *chrA*, *cadA* respectivamente para el cromo y el cadmio. En el caso del mercurio hay una variedad de genes cuyo mecanismo es el transporte del metal en su estado orgánico e inorgánico *merE*, *merT*, *merF*, *merC* cumplen esta función, del mismo modo, para el arsénico existen dos determinantes para el transporte *arsB* y *acr3*.

Dentro de las aplicaciones de los determinantes genéticos se encuentran su uso para construcción de biosensores mediante la fusión de los genes reguladores como *arsR*, *merR*, *cadC*, *chrB* del operón y genes reporteros como *gfp* o *lux* para la detección de metales pesados, siendo un método económico y eficaz en comparación con los métodos tradicionales. Otra de las posibles aplicaciones que se le otorga a los determinantes de resistencia es en la generación de organismos transgénicos que expresen genes de interés y que puedan ser usados para la remediación de la contaminación.

1. Kruger MC, Bertin PN, Heipieper HJ, Arsène-Ploetze F. Bacterial metabolism of environmental arsenic - Mechanisms and biotechnological applications. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2013;97(9):3827–41.
2. Ordoñez OF, Lanzarotti E, Kurth D, Cortez N. Genome comparison of two *Exiguobacterium* strains from high altitude andean lakes with different arsenic resistance: identification and 3D modeling of the Acr3 efflux pump. *Front Environ Sci*. 2015;3(July):1–12.
3. Andres J, Bertin PN. The microbial genomics of arsenic. *FEMS Microbiol Rev*. 2016;40(2):299–322.
4. Fekih I Ben, Zhang C, Li YP, Zhao Y, Alwathnani HA, Saquib Q, et al. Distribution of arsenic resistance genes in prokaryotes. *Front Microbiol* [Internet]. 2018;9(OCT):1–11. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6205960/>
5. Uhrynowski W, Radlinska M, Drewniak L. Genomic analysis of *Shewanella* sp. O23s—the natural host of the psheb plasmid carrying genes for arsenic resistance and dissimilatory reduction. *Int J Mol Sci*. 2019;20(5).
6. Antonucci I, Gallo G, Limauro D, Contursi P, Ribeiro AL, Blesa A, et al. An ArsR/SmtB family member regulates arsenic resistance genes unusually arranged in *Thermus thermophilus* HB27. *Microb Biotechnol*. 2017;10(6):1690–701.
7. Shen Z, Han J, Wang Y, Sahin O, Zhang Q. The Contribution of ArsB to Arsenic Resistance in *Campylobacter jejuni*. *PLoS One*. 2013;8(3):1–8.
8. Zhao C, Zhang Y, Chan Z, Chen S, Yang S. Insights into arsenic multi-operons expression and resistance mechanisms in *Rhodopseudomonas palustris* CGA009. *Front Microbiol*. 2015;6(SEP):1–8.
9. Villadangos AF, Van Belle K, Wahni K, Tamu Dufe V, Freitas S, Nur H, et al. *Corynebacterium glutamicum* survives arsenic stress with arsenate reductases coupled to two distinct redox mechanisms. *Mol Microbiol*. 2011;82(4):998–1014.
10. Xiao KQ, Li LG, Ma LP, Zhang SY, Bao P, Zhang T, et al. Metagenomic analysis revealed highly diverse microbial arsenic metabolism genes in paddy soils with low-arsenic contents. *Environ Pollut* [Internet]. 2016;211:1–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.023>
11. Suhadolnik MLS, Costa PS, Castro GM, Lobo FP, Nascimento AMA. Comprehensive insights into arsenic- and iron-redox genes, their taxonomy and associated environmental drivers deciphered by a meta-analysis. *Environ Int*. 2021;146(106234):1–11.
12. Prieto-Barajas CM, Elorza-Gómez JC, Loeza-Lara PD, Sánchez-Yáñez JM, Valencia-Cantero E, Santoyo G. Identificación y análisis de genes ars en cepas de *Bacillus* hipertolerantes al arsénico, aisladas de pozas termales en Araró, México. *TIP Rev Espec en Ciencias Químico-Biológicas* [Internet]. 2018;21(Iii):22–9. Available from: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
13. Li X, Zhang L, Wang G. Genomic evidence reveals the extreme diversity and wide distribution of the arsenic-related genes in *Burkholderiales*. *PLoS One*. 2014;9(3):1–11.
14. Jia MR, Tang N, Cao Y, Chen Y, Han YH, Ma LQ. Efficient arsenate reduction by As-resistant bacterium *Bacillus* sp. strain PVR-YHB1-1: Characterization and genome analysis. *Chemosphere* [Internet]. 2019;218:1061–70. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.145>
15. Sousa T, Branco R, Piedade AP, Morais P V. Hyper accumulation of arsenic in Mutants of *Ochrobactrum tritici* silenced for arsenite efflux pumps. 2015;1–14.
16. Shen Z, Luangtongkum T, Qiang Z, Jeon B, Wang L, Zhang Q. Identification of a novel membrane transporter mediating resistance to organic arsenic in *Campylobacter jejuni*. *Antimicrob Agents Chemother*. 2014;58(4):2021–9.
17. Jiang H, Liang Y, Yin H, Xiao Y, Guo X, Xu Y, et al. Effects of arsenite resistance on the growth and functional gene expression of *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in pure culture and coculture. *Biomed Res Int*. 2015;2015:1–13.
18. Yang HC, Rosen BP. New mechanisms of bacterial arsenic resistance. *Biomed J* [Internet].

- 2016;39(1):5–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bj.2015.08.003>
19. Villadangos AF, Fu HL, Gil JA, Messens J, Rosen BP, Mateos LM. Efflux permease CgA-cr3-1 of *Corynebacterium glutamicum* is an arsenite-specific antiporter. *J Biol Chem* [Internet]. 2012;287(1):723–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1074/jbc.M111.263335>
 20. Yu X, Zheng W, Bhat S, Aquilina JA, Zhang R. Transcriptional and posttranscriptional regulation of *Bacillus* sp. CDB3 arsenic-resistance operon ars1. *PeerJ* [Internet]. 2015;2015(9):1–15. Available from: <https://peerj.com/articles/1230/>
 21. Yoshinaga M, Rosen BP. A C-As lyase for degradation of environmental organoarsenical herbicides and animal husbandry growth promoters. *Proc Natl Acad Sci USA* [Internet]. 2014;111(21):7701–6. Available from: www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1403057111/-/DCSupplemental.
 22. Yang J, Abdul Salam AA, Rosen BP. Genetic mapping of the interface between the ArsD metallochaperone and the ArsA ATPase. *Mol Microbiol* [Internet]. 2011;79(4):872–81. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2958.2010.07494.x>
 23. Liu X, Hu Q, Yang J, Huang S, Wei T, Chen W, et al. Selective cadmium regulation mediated by a cooperative binding mechanism in CadR. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2019;116(41):20398–403.
 24. Firrincieli A, Presentato A, Favoino G, Marabottini R, Allevato E, Stazi SR, et al. Identification of resistance genes and response to arsenic in *Rhodococcus aetherivorans* BCP1. *Front Microbiol*. 2019;10(MAY):1–13.
 25. Nadar VS, Yoshinaga M, Pawitwar SS, Kandavelu P, Sankaran B, Rosen BP. Structure of the ArsI C-As Lyase: Insights into the mechanism of degradation of organoarsenical herbicides and growth promoters. *J Mol Biol* [Internet]. 2016;428(11):1–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2016.04.022>
 26. Chen J, Nadar VS, Rosen BP. A novel MAs(III)-selective ArsR transcriptional repressor. *Mol Microbiol*. 2017;106(3):469–78.
 27. Páez-Espino AD, Nikel PI, Chavarría M, Lorenzo V De, Rica C, José S, et al. ArsH protects *Pseudomonas putida* from oxidative damage caused by exposure to arsenic. *Environ Microbiol*. 2020;22:2230–42.
 28. Mindlin S, Petrenko A, Kurakov A, Beletsky A, Mardanov A, Petrova M. Resistance of Permafrost and Modern *Acinetobacter lwoffii* Strains to Heavy Metals and Arsenic Revealed by Genome Analysis. *Biomed Res Int*. 2016;2016:1–10.
 29. Chen J, Bhattacharjee H, Rosen BP. ArsH is an organoarsenical oxidase that confers resistance to trivalent forms of the herbicide monosodium methylarsenate and the poultry growth promoter roxarsone. *Mol Microbiol*. 2015;96(5):1042–52.
 30. Dash HR, Mangwani N, Das S. Characterization and potential application in mercury bioremediation of highly mercury-resistant marine bacterium *Bacillus thuringiensis* PW-05. *Investig en ciencias Ambient y Contam*. 2013;1–12.
 31. Møller AK, Barkay T, Hansen MA, Norman A, Hansen LH, Sørensen SJ, et al. Mercuric reductase genes (*merA*) and mercury resistance plasmids in High Arctic snow, freshwater and sea ice brine. *FEMS Microbiol Ecol* [Internet]. 2013;87:52–63. Available from: <https://academic.oup.com/femsec/article/87/1/52/508980>
 32. Wang D, Huang S, Liu P, Liu X, He Y, Chen W, et al. Structural analysis of the Hg²⁺ regulatory protein Tn501 MerR from *Pseudomonas aeruginosa*. *Nat Publ Gr*. 2016;(August):1–9.
 33. Boyd E, Barkay T. The mercury resistance operon: from an origin in a geothermal environment to an efficient detoxification machine. *Front Microbiol*. 2012;3(10):1–13.
 34. Jan AT, Azam M, Choi I, Ali A, Haq QMR. Analysis for the presence of determinants involved in the transport of mercury across bacterial membrane from polluted water bodies of India. *Brazilian J Microbiol* [Internet]. 2016;47(1):55–62. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.023>
 35. Sone Y, Nakamura R, Pan-hou H, Itoh T, Kiyono M. Role of MerC , MerE , MerF , MerT,

and/or MerP in resistance to mercurials and the transport of mercurials in *Escherichia coli*. Biol Pharm Bull. 2013;36(November):1835–41.

36. Sone Y, Uraguchi S, Takanezawa Y, Nakamura R, Pan-hou H, Kiyono M. Cysteine and histidine residues are involved in *Escherichia coli* Tn 21 MerE methylmercury transport. Front Microbiol. 2017;7:1994–9.

37. Ly K, Ryan LO, Mitra AK. Overexpression, purification and biophysical characterisation of *Escherichia coli* MerT. PROTEIN Expr Purif [Internet]. 2014;(December):1–5. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pep.2014.11.016>

38. Ruuskanen MO, Poulain AJ. Swift evolutionary response of microbes to a rise in anthropogenic mercury in the Northern Hemisphere. ISME J [Internet]. 2020;(14:788–800):788–800. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/s41396-019-0563-0>

39. Chenia HY, Jacobs A. Antimicrobial resistance, heavy metal resistance and integron content in bacteria isolated from a South African tilapia aquaculture system. Dis Aquat Organ. 2017;126(3):199–209.

40. Zhang J, Zeng Y, Liu B, Deng X. MerP/MerT-mediated mechanism: A different approach to mercury resistance and bioaccumulation by marine bacteria. J Hazard Mater [Internet]. 2020;388(January):122062. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122062>

41. Lian P, Guo H, Riccardi D, Dong A, Parks JM, Xu Q, et al. X-ray structure of a Hg^{2+} complex of mercuric reductase (MerA) and quantum mechanical/molecular mechanical study of Hg^{2+} transfer between the C-terminal and buried catalytic site cysteine pairs. Biochemistry. 2014;53(46):7211–22.

42. Johs A, Harwood IM, Parks JM, Nauss RE, Smith JC, Liang L, et al. Structural characterization of intramolecular Hg^{2+} transfer between flexibly linked domains of mercuric ion reductase. J Mol Biol [Internet]. 2011;413(3):639–56. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2011.08.042>

43. Matsui K, Yoshinami S, Narita M, Chien M, Phung LT, Silver S, et al. Mercury resistance transposons in *Bacillus* strains from different geographical regions. 2016;(December 2015):1–8.

44. Taghavi S, Zhu W, Ramos J, Lelie D Van Der. Comparative genomics and functional analysis of niche-specie. FEMS Microbiol Rev [Internet]. 2011;35:299–323. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3056050/>

45. Naguib MM, El-Gendy AO, Khairalla AS. Microbial diversity of mer operon genes and their potential roles in mercury bioremediation and resistance. Open Biotechnol J. 2018;12(1):56–77.

46. Guo H, Parks JM, Johs A, Smith JC. Mercury detoxification by bacteria: simulations of transcription activation and mercury – carbon bond cleavage. 2011;(Md):311–24.

47. Silva PJ, Rodrigues V. Mechanistic pathways of mercury removal from the organomercurial lyase active site. PeerJ. 2015;2015(7):1–18.

48. Zheng R, Wu S, Ma N, Sun C. Genetic and physiological adaptations of marine bacterium *Pseudomonas stutzeri* 273 to mercury stress. 2018;9(April):1–14.

49. Adekanmbi AO, Adelowo OO, Okoh AI, Fagade OE. Metal-resistance encoding gene-fingerprints in some bacteria isolated from wastewaters of selected printerries in Ibadan, South-western Nigeria. J Taibah Univ Sci. 2019;13(1):266–73.

50. Hwang H, Hazel A, Lian P, Smith JC, Gumbart JC, Parks JM. A Minimal membrane metal transport system: dynamics and energetics of mer proteins. J Comput Chem. 2020;41(6):528–37.

51. Caballero-Flores GG, Acosta-Navarrete YM, Ramírez-Díaz MI, Silva-Sánchez J, Cervantes C. Chromate-resistance genes in plasmids from antibiotic-resistant nosocomial enterobacterial isolates. FEMS Microbiol Lett. 2012;327(2):148–54.

52. Baaziz H, Gambari C, Boyeldieu A, Chaouche AA, Alatou R, Fons M. ChrA SO₂, the chromate efflux pump of *Shewanella oneidensis*, improves chromate survival and reduction. 2017;(Vi):1–15.

53. Henson MW, Domingo JWS, Kourtev PS, Jensen R V., Dunn JA, Learman DR. Metabolic and genomic analysis elucidates strain-level variation in *Microbacterium* sp. isolated from chromate contaminated sediment. *PeerJ*. 2015;2015(11):1–17.
54. Morais Vasconcelos P, Branco R, Romeu F. Chromium resistance strategies and toxicity: what makes *Ochrobactrum tritici* 5bv11 a strain highly resistant. *Biometals* (2011) [Internet]. 2011;24:401–10. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10534-011-9446-1>
55. Acosta-Navarrete YM, León-Márquez YL, Salinas-Herrera K, Jácome-Galarza IE, Meza-Carmen V, Ramírez-Díaz MI, et al. Expression of the six chromate ion transporter homologues of *Burkholderia xenovorans* LB400. *Microbiol (United Kingdom)*. 2014;160(PART 2):287–95.
56. Bazzis H. Isolation of *Shewanella* sp. from Algeria and characterization of a system involved in detoxification of chromate [Internet]. Freres Mentouri Cinstantine 1 University; 2018. Available from: <http://archives.umc.edu.dz/handle/123456789/136458>
57. Pradhan SK, Singh NR, Rath BP, Thatoi H. Bacterial chromate reduction: A review of important genomic, proteomic, and bioinformatic analysis. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2016;46(21–22):1–82.
58. Rangel D, Dussan J. International Biodeterioration & Biodegradation Transcriptional analysis and molecular dynamics simulations reveal the mechanism of toxic metals removal and efflux pumps in *Lysinibacillus*. *Int Biodeterior Biodegrad* [Internet]. 2018;127(June 2017):46–61. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.11.016>
59. Verduzco-rosas EASJLA, Julia A. An Lrp-type transcriptional regulator controls expression of the *Bacillus subtilis* chromate transporter. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2013;104 (941–948):1–8.
60. Paisio CE, González PS, Talano MA, Agostini E. Remediación biológica de Mercurio : Recientes avances Resumen Biological remediation of Mercury : Recent advances Abstract. 2012; 3(2):119–46.
61. Branco R, Morais P. Two superoxide dismutases from TnO₂ are involved in detoxification of reactive oxygen species induced by chromate. *BMC Microbiol* [Internet]. 2016;16(1):1–10. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s12866-016-0648-0>
62. Klonowska A, Moulin L, Ardley JK, Braun F, Gollagher MM, Zandberg JD, et al. Novel heavy metal resistance gene clusters are present in the genome of *Cupriavidus neocaledonicus* STM 6070, a new species of *Mimosa pudica* microsymbiont isolated from heavy-metal-rich mining site soil. *BMC Genomics*. 2020;21(1):1–18.
63. Mergeay M, Houdt R Van. Metal response in *Cupriavidus metallidurans*. *Biometals*. 2015;I:1–97.
64. Hoogewerf AJ, Dyk LA Van, Buit TS, Roukema D, Resseguie E, Plaisier C, et al. Functional characterization of a cadmium resistance operon in *Staphylococcus aureus* ATCC12600: CadC does not function as a repressor. *J Basic Microbiol*. 2015;55:148–59.
65. Yu X, Ding Z, Ji Y, Zhao J, Liu X, Tian J, et al. An operon consisting of a p-type ATPase gene and a transcriptional regulator gene responsible for cadmium resistances in *Bacillus vietnamensis* 151-6 and *Bacillus marisflavi* 151-25. *BMC Microbiol*. 2020;20(1):1–13.
66. Zhang H, Zhou Y, Bao H, Zhang L, Wang R, Zhou X. Plasmid-borne cadmium resistant determinants are associated with the susceptibility of *Listeria monocytogenes* to bacteriophage. *Microbiol Res* [Internet]. 2015;172:1–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.01.008>
67. Parsons C, Lee S, Kathariou S. Dissemination and conservation of cadmium and arsenic resistance determinants in *Listeria* and other Gram-positive bacteria. *wiley*. 2020;(December 2019):560–9.
68. Guo S, Mahillon J. pGIAK1, a heavy metal resistant plasmid from an obligate alkaliphilic and halotolerant bacterium isolated from the Antarctic Concordia Station confined environment. *PLoS One*. 2013;8(8):1–8.
69. Pombinho R, Camejo A, Vieira A, Reis O, Carvalho F, et al. *Listeria monocytogenes* CadC regulates cadmium efflux and fine tunes lipoprotein localization to escape the host immune res-

ponse and promote infection. J Infect Dis. 2017;215(9):1468–79.

70. Gómez-Sanz E, Kadlec K, Feßler AT, Torres C. Analysis of a novel erm (T) - and *cadDX* - carrying plasmid from methicillin- susceptible *Staphylococcus aureus* ST398-t571 of human origin. J Antimicrob Chemother [Internet]. 2013;68(October 2012):471–3. Available from: <https://academic.oup.com/jac/article/68/2/471/676191>

71. Argudín MA, Hofer A, Butaye P. Heavy metal resistance in bacteria from animals. Res Vet Sci [Internet]. 2019;122:1–57. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.11.007>

72. Chen J, Sun GX, Wang XX, Lorenzo V De, Rosen BP, Zhu YG. Volatilization of arsenic from polluted soil by *Pseudomonas putida* engineered for expression of the *arsM* arsenic (III) S-adenosine methyltransferase gene. Environ Sci Technol. 2014;48(17):10337–44.

73. Prabhakaran R, Rajkumar SN, Ramprasath T, Selvam GS. Identification of promoter *PcadR*, in silico characterization of cadmium resistant gene *cadR* and molecular cloning of promoter *PcadR* from *Pseudomonas aeruginosa* BC15. Toxicol Ind Health. 2018;34(12):819–33.

74. Prabakaran C, Kandavelu P, Packianathan C, Rosen BP, Thiagarajan S, Biotechnology A. Structures of two ArsR As(III)-responsive transcriptional repressors : implications for the mechanism of derepression. J Struct Biol. 2020;207(2):209–17.

75. Jain S, Bhatt A. Molecular and in situ characterization of cadmium-resistant diversified extremophilic strains of *Pseudomonas* for their bioremediation potential. 2014;297–304.

76. Stahl A, Pletzer D, Mehmood A, Ullrich MS. *Marinobacter adhaerens* HP15 harbors two CzcCBA efflux pumps involved in zinc detoxification. Antonie Van Leeuwenhoek. 2015; 8 (6):1-5

77. Mazhar SH, Herzberg M, Fekih I Ben, Zhang C. Comparative insights into the complete genome sequence of highly metal resistant *Cupriavidus metallidurans* srtrain BS1 isolated from a gold – copper mine. Front Microbiol. 2020; 11(2):1-21

78. Nies DH. The biological chemistry of the transition metal “transportome” of *Cupriavidus metallidurans*. Cupriavidus. 2016;23–6.

79. Sharma P, Asad S, Ali A. Construction of an *Escherichia coli* biosensor for Cd^{2+} and sensitivity analysis by low-temperature induction. J Biosci. 2013;38(2):251–8.

80. Huang CW, Wei CC, Liao VHC. A low cost color-based bacterial biosensor for measuring arsenic in groundwater. Chemosphere [Internet]. 2015;141:44–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.011>

81. Roointan A, Shabab N, Karimi J, Rahmani A, Alikhani MY, saidijam M. Designing a bacterial biosensor for detection of mercury in water solutions. Turkish J Biol. 2015;39(4):550–5.

82. Tynecka Z, Malm A, Gos Z. Cd^{2+} extrusion by P-type Cd^{2+} -ATPase of *Staphylococcus aureus* 17810R via energy-dependent Cd^{2+}/H^{+} exchange mechanism. 2016;651–63.

83. Branco R, Cristóvão A, Morais P V. Highly sensitive, highly specific whole-cell bioreporters for the detection of chromate in environmental samples. PLoS One. 2013;8(1):13–7.

84. Li R, Wu H, Ding J, Li N, Fu W, Gan L, et al. Transgenic *merA* and *merB* expression reduces mercury contamination in vegetables and grains grown in mercury contaminated soil. Plant Cell Rep. 2020;39 (10):1369–80.

85. Zhou X, Li J, Wang W, Yang F, Fan B, Zhang C, et al. Removal of chromium (VI) by *Escherichia coli* cells expressing cytoplasmic or surface-displayed *chrB*: A comparative study. J Microbiol Biotechnol. 2020;30(7):996–1004.

86. Xu S, Sun B, Wang R, He J, Xia B, Xue Y, et al. Overexpression of a bacterial mercury transporter MerT in *Arabidopsis* enhances mercury tolerance. Biochem Biophys Res Commun [Internet]. 2017;490(2):528–34. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.06.073>

PERFILES DE SUSCEPTIBILIDAD ANTIMICROBIANA EN BACTERIAS AISLADAS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHAMBO.

Antimicrobial susceptibility profiles of bacteria isolated from agricultural crops in the Chambo river basin.

Ana Carolina González-Romero* , María Guadalupe Guamán-Chabla , María del Carmen Cordovez-Martínez , Eliana Elizabeth Martínez -Duran .

Universidad Nacional del Chimborazo, Facultad de Ciencias de la Salud, Carrera Laboratorio Clínico, Riobamba, Ecuador.

*ana.gonzalez@unach.edu.ec

Resumen

Introducción. Las enfermedades transmitidas por alimentos han aumentado en los últimos años, derivado del consumo de productos agrícolas contaminados con bacterias resistentes a antibióticos. **Objetivo.** Identificar los perfiles de resistencia antimicrobiana de bacterias aisladas en cultivos agrícolas de la cuenca del río Chambo.

Materiales y métodos. Se analizaron un total de 12 muestras de vegetales y hortalizas recolectadas de zonas agrícolas de seis puntos geográficos cercanos al río Chambo. El aislamiento e identificación de las bacterias se realizó por medio de pruebas convencionales empleando medios de cultivo conjuntamente con pruebas bioquímicas. El perfil de resistencia a los antibióticos se determinó por el método de difusión del disco en agar.

Resultados. Se identificaron (12/14) 85,7% bacterias pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae entre ellas: *Citrobacter freundii*, *Citrobacter amalonaticus*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus vulgaris*, *Klebsiella oxytoca* y (2/14) 14,3% correspondiente a *Enterococcus faecalis*. El 50% de las enterobacterias presentaron resistencia a cefalosporinas de 3ra generación (ceftriaxona y ceftazidima), 50% a kanamicina y 25% a imipenem, gentamicina y trimetoprim sulfametoxazol.

Conclusiones. Existe contaminación de los cultivos agrícolas vertidos con agua de riego de la cuenca del río Chambo por especies de enterobacterias y *E. faecalis*; con altos porcentajes de resistencia a antibióticos de uso clínico.

Palabras claves: Río Chambo, productos agrícolas, bacterias, resistencia, antibióticos.

Abstract

Introduction. Foodborne illnesses have increased in recent years as a result of the consumption of agricultural products contaminated with antibiotic-resistant bacteria.

Objective. To identify the antimicrobial resistance profiles of pathogenic bacteria isolated in agricultural crops from the Chambo river basin.

Materials and methods. A total of 12 samples of vegetables collected from agricultural areas of six geographical points near the Chambo River were analyzed. Bacterial isolation and identification was performed by conventional tests using culture media in conjunction with biochemical tests. The antibiotic resistance profile was determined by the agar disc diffusion method.

Results. (12/14) 85.7% human pathogenic bacteria belonging to the Enterobacteriaceae family were identified, including: *Citrobacter freundii*, *Citrobacter amalonaticus*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus vulgaris*, *Klebsiella oxytoca* and (2/14) 14.3% corresponding to *Enterococcus faecalis*. 50% of the Enterobacteriaceae were resistant to 3rd generation cephalosporins (ceftriaxone and ceftazidime), 50% to kanamycin and 25% to imipenem, gentamicin and trimethoprim sulfamethoxazole.

Conclusions. The results obtained indicate a high contamination of agricultural crops dumped with

irrigation water from the Chambo river basin by species of Enterobacteriaceae and *E. faecalis*; with high percentages of resistance to antibiotics for clinical use.

Keywords: Chambo River, agricultural products, bacteria, resistance, antibiotic.

Fecha de recepción: 13-10-2021 **Fecha de aceptación:** 30-11-2021 **Fecha de publicación:** 31-01-2021

I. INTRODUCCIÓN

El consumo de hortalizas verduras es vital para la salud humana puesto que poseen innumerables propiedades alimenticias, son fuente inagotable de vitaminas, minerales, fibra y energía; y pueden contribuir de alguna forma con la prevención de enfermedades cardiovasculares y gastrointestinales (1). Sin embargo, por sus características físicas y de cultivo, estos productos están expuestos a contaminación de tipo biológica y química, constituyendo un riesgo para la adquisición de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) (2).

La contaminación de los productos hortofrutícolas ocurre a partir de diversas fuentes como: uso de agua de riego contaminada, el suelo de cultivo, la materia fecal humana o animal, el aire, el equipo de cultivo y manejo, los recipientes y utensilios, los materiales de transporte y el humano. El consumo de vegetales crudos, ha sido asociado a numerosos casos de brotes de enfermedades por microorganismos patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Clostridium botulinum*, *Vibrio cholerae* y *Escherichia coli* (3).

Las ETA son consideradas un problema de salud pública a escala mundial, siendo el agua y los alimentos las principales fuentes de enfermedades entéricas agudas. Se han descrito alrededor de 200 enfermedades de transmisión alimentaria, cuya etiología incluye bacterias, virus, hongos, parásitos, productos químicos y toxinas de origen vegetal. Se estima que anualmente se enferman unos 600 millones de personas (1 de cada 10 habitantes) por ingerir alimentos contaminados. Los niños menores de 5 años cerca de un 40% contraen dicha enfermedad, que provocan cada año 125 000 defunciones (2-5).

Ecuador es un país potencialmente agrícola con productos de primera necesidad que además son de exportación a nivel mundial (6). Es por

ello, que se implementó un plan para mitigar la aparición de bacterias multiresistentes, proyecto presentado por La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con el propósito de brindar asistencia técnica a los gobiernos para formular e implementar planes nacionales multisectoriales para controlar la resistencia antimicrobiana en la alimentación y la agricultura. Dentro de las principales fuentes de contaminación en la agricultura se encuentra el uso de agua de riego ya que ésta pudiera ser no potable, además, la ubicación geográfica de las huertas debido a que estas pudieran estar cerca de aguas residuales, proviniendo quizá de hospitales, casas, restaurantes, escuelas. En el agua de riego se encuentran bacterias patógenas, las cuales al poseer genes de virulencia y de resistencia a antibióticos pudieran transferir estos genes a bacterias no patógenas también presentes en estos ambientes (5).

Tomando en cuenta que los vegetales frescos forman parte esencial de la dieta humana y además pueden estar asociados con la transmisión de bacterias multiresistentes, el objetivo de esta investigación fue identificar los perfiles de resistencia antimicrobiana de bacterias aisladas en cultivos agrícolas de la cuenca del río Chambo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de estudio: descriptivo con un diseño de campo y cohorte transversal.

Sitios de muestreo: se analizaron un total de 12 muestras de vegetales y hortalizas encontrados en las cercanías (500 m) de seis zonas agrícolas identificadas como puntos de recolección, cuyos productos son regados directamente del caudal del río Chambo, el cual cubre una superficie aproximada de 3.580 Km². El recorrido de este río atraviesa la provincia de Chimborazo que consta de cantones como: Penipe, Guamoto, Alausí, Chambo, Colta, Riobamba y Guano.

Donde se fijaron los seis puntos para la recolección de los diferentes cultivos agrícolas (figura 1).

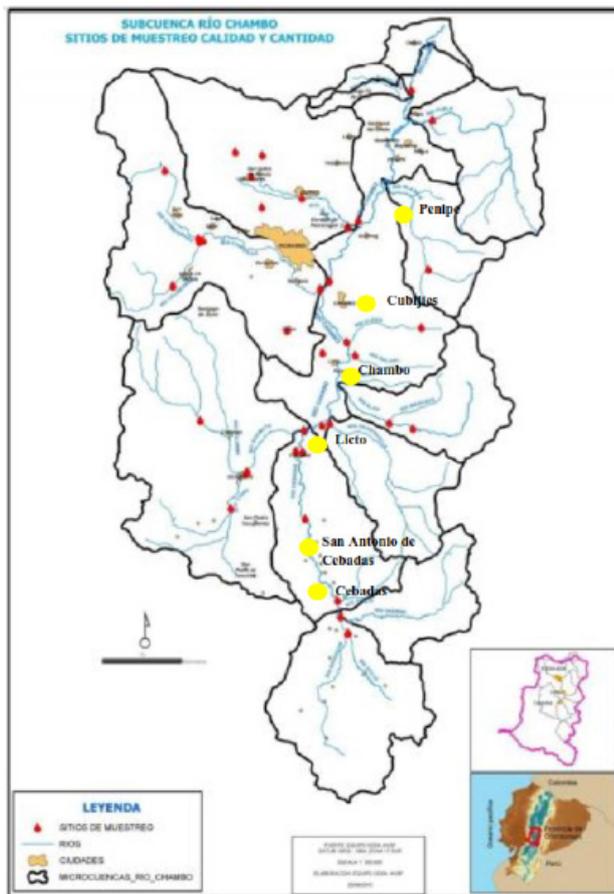


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo a lo largo de la microcuenca del río Chambo.

Se tomó en cuenta la altitud y la variante climatológica temperatura de las zonas, este estudio se ejecutó durante el período abril – julio de 2019 (tabla 1).

Puntos	Estación de muestreo	Ubicación	Altitud	Temperatura Ambiente (°C)
Punto 1	Chambo	A 100 m de la entrada a Chambo	2569	21
Punto 2	San Antonio de Cebadas	A 120 m Vía Riobamba – Macas	2979	19
Punto 3	Licto	A 2 m de la Entrada de Licto	2730	20
Punto 4	Cebadas	A 200 metros de la entrada a Cebadas	2907	20
Punto 5	Penipe	Entrada de Penipe	2361	19
Punto 6	Cubijíes	A 50 metros de la entrada a Cubijíes	2479	19

Tabla 1. Datos de altitud y temperatura obtenidos en cada estación durante la recolección de productos agrícolas cercanos del río Chambo.

Muestras: las 12 muestras de vegetales y hortalizas se tomaron por duplicado de manera aséptica en bolsas estériles, posteriormente se selló, se asignó su respectiva codificación a cada bolsa y se conservó en refrigeración en una cava con hielo hasta el momento de su llegada al laboratorio de Microbiología, Facultad de Ciencias de la Salud, en la Universidad Nacional de Chimborazo, establecimiento donde se llevó a cabo análisis microbiológico.

Cultivo y aislamiento de cepas bacterianas presentes en los vegetales y hortalizas: Una vez que las muestras de productos vegetales fueron transportadas al laboratorio de Microbiología, se realizó el análisis microbiológico. Del centro del fruto del producto agrícola se tomó 25 g (triturado) y se colocó en 225 ml de agua peptonada para realizar el pre-enriquecimiento y luego se incubaron por 24 horas a 37°C. Posteriormente se tomó 1ml de cultivo y se inoculó en un tubo con 9 ml de agua peptonada los cuales se incubaron 24 horas a 37°C. Transcurrido el periodo de incubación se tomaron 10 microlitos del cultivo para sembrar por la técnica de agotamiento en los medios de cultivo agar MacConkey (MK) Acumedia®, Agar Sangre (AS) Himedia®, Cistina Electrolito Deficiente (CLED) Difco™ y Tio-sulfato Citrato Bilis Sacarosa (TCBS) Difco™.

Preparación de medios de cultivo: los medios de cultivo fueron preparados según instrucciones del fabricante. Todos los medios fueron autoclavados a 15 psi a 121 °C durante 25 minutos, se enfrió y se colocó en cajas monopetry Greiner® estériles, con un volumen aproximado de 15 mL sobre una superficie horizontal y en tubos anteriormente esterilizados un volumen de 5 ml respectivamente. Posteriormente solidificado el medio de cultivo se procedió almacenar en fundas de estériles para evitar la posible contaminación a una temperatura de 2 – 8°C.

Técnica de aislamiento de colonias: la técnica empleada fue la siembra por agotamiento en agar. una vez obtenidas las colonias seguidamente se realizó la tinción de Gram y pruebas bioquímicas para la identificación bacteriana a través de métodos microbiológicas convencionales de acuerdo con los esquemas de Koneman et al (6).

Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias: las pruebas bioquímicas utilizadas para las bacterias Gram positivas fueron la observación de α , β , o γ hemólisis en agar sangre, y las pruebas de catalasa, agar bilis esculina y crecimiento en caldo BHI con NaCl al 6,5%.(6).

En el caso de las bacterias Gram negativas se realizaron las pruebas: oxidasa, agar kligler, agar urea, citrato, caldo malonato, agar motilidad-indol-ornitina (MIO) y agar lisina hierro agar (LIA) (6). El agar Kligler se utilizó para observar la fermentación de la glucosa o la lactosa, la presencia de H_2S y si había producción de gas o no. Se utilizó la urea para ver la producción de ureasa, el agar citrato como fuente de carbono y nitrógeno. El caldo Malonato se utilizó para diferenciar microorganismos entéricos según su capacidad de utilizar el manitol. Para observar la motilidad bacteriana, la producción de indol y la actividad enzimática ornitina descarboxilasa se usó el medio MIO y para detectar la desaminación o descarboxilación de la lisina se probó el medio LIA.

Determinación del perfil de susceptibilidad a los antibióticos de las cepas bacterianas aisladas e identificadas: a las bacterias aisladas, se les realizó ensayos de sensibilidad por el método de difusión del disco en agar Mueller Hinton (Oxoid Basingstoke, UK) de acuerdo a las instrucciones del Clinical and Laboratory Standard Institute (CLSI, 2019) (7).

Para realizar la prueba se transfirió una o dos colonias del cultivo a un tubo con solución fisiológica estéril, el crecimiento bacteriano se ajustó a la turbidez del patrón 0.5 del estándar de McFarland. Se introdujo un hisopo de algodón estéril dentro del tubo que contenía el inóculo estandarizado. Con el hisopo humedecido, se inoculó en tres o cuatro direcciones toda la superficie de una placa con agar Mueller Hinton. Se dejó secar el inóculo a temperatura ambiente durante 5 minutos. Posteriormente se procedió a la colocación de los discos de antibióticos con una pinza estéril luego se incubaron las placas 24 horas a 37°C. Transcurrido el periodo de incubación se realizó la lectura midiendo con una regla milimetrada, la zona clara alrededor del disco de antibiótico,

el cual se corresponde con la inhibición del crecimiento bacteriano. Estos datos se compararon con los diámetros de zona establecidos para cada antibiótico en las tablas de interpretación internacional del CLSI 2019. La interpretación de los halos de inhibición permitieron expresar los resultados como sensible o resistente.

Se ensayaron los siguientes antimicrobianos (BD BBLTM, USA): ceftazidima (CAZ) 30 μ g, Ceftriaxona (CRO) 30 μ g, trimetoprim-sulfa (SXT) x μ g, penicilina (P) 10 U, imipenem (IMI) 10 μ g, tetraciclina (TE) 30 μ g, ciprofloxacina (CIP) 5 μ g, gentamicina (GM) 10 μ g, Amikacina (AK) 30 μ g, vancomicina (Va) 10 μ g.

Para estos ensayos se utilizó como cepa control *P. aeruginosa* ATCC 25923, *S. aureus* ATCC 25923, *K. pneumoniae* ATCC 700603.

Análisis Estadístico de Datos

De los resultados obtenidos se procedió a la realización de tablas descriptivas con referencia a la frecuencia y porcentaje, aplicando hojas de cálculo pertenecientes al sistema operativo Microsoft Office 2013.

III. RESULTADOS

Se seleccionaron puntos estratégicos tomando como referencia la longitud del río y las zonas agrícolas de los distintos sectores para la recolección de productos cercanos al río Chambo. Los puntos fueron: Chambo, San Antonio de Cebadas, Licto, Cebadas, Penipe y Cubijíes (tabla 2).

Puntos	Estación de muestreo	Producto agrícola
Punto 1	Chambo	Remolacha
Punto 2	San Antonio de Cebadas	Lechuga
Punto 3	Licto	Zanahoria
Punto 4	Cebadas	Frutilla
Punto 5	Penipe	Papas
Punto 6	Cubijíes	Ocas

Tabla 2. Estaciones de muestreo y productos agrícolas recolectados.

Se aislaron e identificaron de los productos agrícolas procesados un total de 14 bacterias; 12/14 (85,71%) pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae y 2/14 (14,28%) a la familia Enterococaceae.

De la Remolacha se aislaron 2 cepas de *Enterobacter cloacae* y 1 de *Enterococcus faecalis*. De la lechuga se aisló 1 cepa de *Citobacter amalonaticus* y 1 de *Proteus vulgaris*. De las zanahorias, 2 cepas de *Citrobacter freundii*. De la frutilla, 1 cepa de *E. faecalis* y 1 de *P. vulgaris*. De las papas, 2 cepas de *C. freundii* y de las ocas, 2 cepas de *Klebsiella oxytoca* y 1 de *E. cloacae* (tabla 3).

El 50% (6/12) de las enterobacterias aisladas de estos productos agrícolas presentaron resistencia

a cefalosporinas de 3ra generación (ceftriaxona y ceftazidima), 50% (6/12) a kanamicina y 25% (3/12) a imipenem, gentamicina y trimetoprim sulfametoxazol (tabla 3).

Con respecto a la multirresistencia de las cepas de Enterobacterias estudiadas, el 16,7 % (2/12) resultaron resistentes a seis antibióticos, 8,3 % (1/12) a cuatro antibióticos, 8,3% (1/12) a tres antibióticos y el 41,7 % (5/12) a dos antibióticos (tabla 3).

Estación de muestreo	Producto agrícola	Bacterias aisladas	Nº cepas bacterianas	CRO	CAZ	IMP	FOX	SXT	CN	K	TE	CIP	P	VA
Chambo	Remolacha	E. cloacae (1.1)	1	R	R	R	R	S	R	R	S	S	-	-
		E. cloacae (1.2)	1	S	S	S	S	S	S	R	R	S	-	-
		E. faecalis (1.3)	1	-	-	-	-	-	-	-	S	S	R	R
San Antonio de Cebadas	Lechuga	C. amalonaticus(2.1)	1	S	S	S	S	S	R	R	S	S	-	-
		P. vulgaris (2.2)	1	R	R	R	R	S	R	R	S	S	-	-
Licto	Zanahoria	C. freundii (3.1)	1	S	R	R	R	R	S	S	S	S	-	-
		C. freundii (3.2)	1	R	R	S	S	R	S	S	S	S	-	-
Cebadas	Frutilla	E. faecalis (4.1)	1	-	-	-	-	-	-	-	S	S	S	S
		P. vulgaris (4.2)	1	R	S	S	S	S	S	R	S	S	-	-
Penipe	Papas	C. freundii (5.1)	1	S	R	S	S	R	S	S	S	S	-	-
		C. freundii (5.2)	1	R	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Cubijés	Ocas	K. oxytoca (6.1)	1	S	S	S	S	S	S	R	S	S	S	S
		K. oxytoca (6.2)	1	R	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
		E. cloacae (6.3)	1	-	-	-	-	-	-	-	S	S	R	R

Tabla 3. Perfiles de susceptibilidad a los antibióticos de cepas bacterianas aisladas de los productos agrícolas de la Cuenca del río Chambo.

CRO: ceftriaxone; CAZ: ceftazidime; IMP: imipenem; FOX: ceftoxitin; SXT: sulfá trimetropin, CN: gentamicina; K: kanamicina; TE: tetraciclina; CIP: ciprofloxacina; P: penicilina VA: vancomicina

Tres cepas expresaron fenotipos correspondientes a la producción de betalactamasas AmpC inducibles. Este mecanismo AmpC tipo cromosómico inducible, se pudo evidenciar fenotípicamente utilizando como agente inductor al imipenem y como sustrato a ceftazidima observándose un achatamiento en forma de D en el halo de inhibición de ceftazidima (figura 2).



Figura 2. AmpC inducible en cepa de *P. vulgaris* y *E. cloacae* aislada de productos agrícolas.

IV. DISCUSIÓN

Los alimentos vegetales son una de las principales vías de transmisión de microorganismos a través de la cadena alimentaria. En la superficie de las plantas en crecimiento existe una microbiota típica, que se puede contaminar por el aporte de microorganismos de distinta procedencia, como puede ser el origen animal que aporta al suelo y al agua, sus excretas (2).

Otra vía de contaminación son las aguas residuales y de riego, ya que los cultivos pueden ser regados por estas aguas sin tratar, existe la posibilidad de que los alimentos vegetales recién cosechados estén contaminados por microorganismos patógenos para el hombre, sobre todo por aquellos que producen trastornos gastrointestinales (8).

La subcuenca del Río Chambo se encuentra ubicada en el centro del Ecuador, teniendo una superficie de 3580 km² y cubre un 54% de la superficie total de la provincia de Chimborazo, en esta zona se encuentra parte de los siete cantones de la provincia: Alausí, Riobamba, Chambo, Penipe, Guano, Colta y Guamote, donde se encuentran unos 33 ríos de tamaño variable según su ubicación geográfica y época del año. La subcuenca pertenece a la provincia en un 98% abarcando los humedales y zonas naturales, como los páramos (9).

En esta subcuenca se han desarrollado algunos estudios para conocer la calidad del agua en toda su extensión. El equipo técnico de la Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas-Agrónomos y Veterinarios Sin Fronteras (CESAA-VSF) realizaron por primera vez estudios en 33 estaciones seleccionadas con dos muestras cada una. Como primeros indicadores de la calidad del agua se analizaron diversos parámetros tanto físicos, químicos y microbiológicos, evaluándose el oxígeno disuelto, pH, temperatura, PO₄, NO₃, turbidez, conductividad, salinidad, sólidos totales disueltos, presencia de coliformes totales y *E. coli* como principal indicador microbiológico de contaminación. Los resultados obtenidos de los distintos parámetros obtenidos confirmaron que los ríos Guano, Guate, Chibunga y Chambo se encuentran contaminados (10,11).

En esta subcuenca donde se ubican los sitios agrícolas de muestreo no han sido desarrollados ningún estudio para evaluar los productos cosechados. Sin embargo, se ha reportado un trabajo similar donde se identificaron bacterias de interés clínico como: *C. diversus*, *C. amalonaticus*, *E. aerogenes*, *E. cloacae*, *Hafnia alvei*, *Aeromonas* spp y *Enterococcus* spp aisladas de productos agrícolas regados con aguas del río Guano, Chimborazo, Ecuador (12).

En las zonas agrícolas seleccionadas (Chambo, San Antonio de Cebadas, Licto, Cebadas, Penipe y Cubijíes) cercanas al río Chambo donde se recolectaron los productos se siembran vegetales y hortalizas que se expenden a los mercados de Riobamba. Los agricultores de estas zonas implementan prácticas de producción orgánica. Los

pequeños productores de estas zonas hacen un manejo racional de los recursos naturales, sin la utilización de productos de síntesis química para la obtención de alimentos sanos. Se ha descrito que en diversos puntos del río Chambo existe la presencia de coliformes fecales y *E. coli* como bacteria indicadores de contaminación fecal, esto debido tanto a actividades humanas y ganaderas que se encuentren próximas al río, los productos agrícolas de estos sectores son regados con estas aguas contaminadas de donde se asume que llegan las bacterias multiresistentes (13).

Las bacterias más prevalentes descritas tanto en estudios realizados en el agua como en los productos agrícolas regados con las aguas de los ríos Chambo y Guano son enterobacterias y *E. faecalis* (11,12).

En el presente estudio, se encontró que el 83,3% de las bacterias aisladas de los productos agrícolas obtenidos de los puntos cercanos al río Chambo correspondían a enterobacterias de los siguientes géneros: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Proteus* bacterias comúnmente encontradas en agua, suelos, vegetación y microbiota intestinal de animales (14). Considerados potenciales bioindicadores de calidad del agua con bajo potencial patógeno y corresponden a 10% de los microorganismos intestinales humanos y animales, por lo que su presencia en el agua está asociada con contaminación fecal e indica tratamientos inadecuados o contaminación posterior (15).

Por otro lado, en los productos como las remolachas y ocas se aisló cepas de *E. faecalis* la presencia de esta bacteria es considerado como un indicador de contaminación fecal de fuentes humanas (16). También está involucrada en el deterioro de los alimentos, en intoxicaciones alimentarias y en la propagación de resistencia a los antibióticos a través de la cadena alimentaria (17).

La presencia de *Enterococcus* spp. en ambientes tales como el agua, alimentos y el aire pudiesen estar relacionados a su transmisión, en especial con diseminación tanto de patrones de resistencia a antibióticos como en la producción de enfermedades (17).

El uso de antibióticos en diversas áreas incluyendo la agrícola ha aumentado lo cual pudiera facilitar la adquisición de resistencia a los mismos por parte de bacterias presentes en dicho ambiente, sean patógenas o no. Dicha adquisición de resistencia pudiera realizarse a través de la transferencia horizontal de elementos genéticos móviles tales como transposones, plásmidos o integrones (18,19).

El uso inadecuado de antibióticos en medicina humana, veterinaria y agrícola propicia la liberación de estos antibióticos al medio ambiente. Junto con estos antibióticos, bacterias con resistencia a ellos se pudieran liberar en las aguas que pudieran irrigar diversos cultivos (20).

Se cree que las plantas de tratamiento de aguas residuales son probables puntos críticos para la diseminación de la resistencia a los antibióticos en el medio ambiente, ya que ofrecen condiciones convenientes para la proliferación de resistencia bacteriana, así como para la transferencia horizontal de genes de resistencia entre diferentes microorganismos. De hecho, genes que confieren resistencia a todas las clases de antibióticos junto con elementos genéticos móviles como plásmidos, transposones, bacteriófagos, integrones se detectan en bacterias aisladas de las plantas de tratamiento de aguas residuales de diferentes países. Parece que estas plantas con procesos de tratamiento convencionales son capaces de reducir significativamente la resistencia bacteriana a los antibióticos pero no son eficientes en la eliminación de genes de resistencia. La implementación de procesos avanzados de limpieza de aguas residuales además de un tratamiento de aguas residuales convencional es un paso importante para proteger el medio ambiente acuático (20).

Estudios previos con respecto a la incidencia de bacterias con resistencia a antibióticos provenientes de agua de riego y productos agrícolas incluyen la búsqueda de resistencia a antibióticos en diferentes especies de Enterobacteriales y *Enterococcus*. En un estudio llevado a cabo por Abriouel et al., (21) donde analizaron diferentes cepas de enterobacterias y *Enterococcus* spp. provenientes de frutas, vegetales, agua y suelo reportaron resistencia a antibióticos como

quinupristina/dalfopristina, estreptomycin, nitrofurantoína, levofloxacin, ciprofloxacina, rifampicina, cloranfenicol, tetraciclina, eritromicina y penicilina. En otro estudio realizado por Odonkor y Addo, (22) buscaron la prevalencia de resistencia a antibióticos en cepas de *E. coli* provenientes de fuentes de agua de riego, en las cuales, encontraron que 32.99% presentaba resistencia a penicilina, así como cefuroxima (28.87%), eritromicina (23.71%), tetraciclina (21.45%), ampicilina (11.32%) y ciprofloxacina (8.25%).

En el presente estudio, las Enterobacterias aisladas de los productos agrícolas presentaron resistencia a ceftriaxona (50%), ceftazidima (50%), kanamicina (50%), imipenem (25%), gentamicina (25%) y trimetoprim sulfametoxazol (25%). Es importante destacar que tres cepas de *E. cloacae* (cepa 1.1), *C. freundii* (cepa 1.1) y *P. vulgaris* (cepa 2.2) expresaron fenotipos correspondientes a la producción de betalactamasas AmpC inducibles.

Las bacterias de los géneros *Enterobacter* y *Citrobacter* poseen de manera natural estas betalactamasas lo que explica su resistencia natural a las aminopenicilinas, cefalosporinas de 1ra generación, cefamicinas (cefotaxima, cefotetán) y aminopenicilinas combinadas con inhibidores de betalactamasas (amoxicilina-ácido clavulánico, ampicilina-sulbactam).

La cepa de *P. vulgaris* presentó fenotipo de resistencia presuntivo a betalactamasa tipo AmpC plasmidica inducible lo cual tendría que ser comprobado por métodos moleculares. Los genes ampC mediados por plásmidos han sido encontrados en bacterias como *Salmonella* spp., *K. pneumoniae* y *P. mirabilis* que naturalmente no poseen estos genes (23). La evidencia molecular sugiere que los genes que codifican a estas enzimas, derivan de los genes ampC cromosómicos que naturalmente poseen las enterobacterias de los géneros *Enterobacter* spp., *Providencia* spp., *Morganella morganii*, *Serratia marcescens*, *C. freundii* y *H. alvei* Estos genes han sido integrados en elementos genéticos transferibles facilitando la diseminación a diferentes bacterias (24).

En relación a las 2 cepas de *E. faecalis* aisladas,

presentaron resistencia a penicilina y vancomicina. La resistencia de *Enterococcus* spp. a diversos agentes antimicrobianos supone un problema de salud pública que afecta a todo el mundo, sobre todo a los países en los que el uso de antibióticos no está especialmente regulado (25).

La resistencia adquirida de *Enterococcus* a múltiples antibióticos se ve favorecida por la acumulación de mutaciones y resistencias adicionales adquiridas a través de genes exógenos (16). El genoma de estas bacterias se caracteriza por poseer la capacidad de incorporar a través de elementos genéticos móviles exógenos, genes de resistencia a multitud de antibióticos, así como de transferir determinantes de resistencia generados por ellos mismos tras la exposición a ciertos antibióticos a otras especies patógenas (25,26).

La presencia de *Enterococcus* spp. en los alimentos también puede suponer una amenaza debido al impacto negativo que puede causar la dispersión de la resistencia a antibióticos a través de la cadena alimentaria. En alimentación animal se utilizan multitud de agentes antimicrobianos como terapia y profilaxis frente a infecciones bacterianas y para fomentar el crecimiento animal. Este uso excesivo de antibióticos en producción animal se relaciona directamente con el aumento de las resistencias a los antibióticos, encontrando similitudes entre las cepas de *Enterococcus* spp. de origen animal con cepas de *Enterococcus* spp. proveniente de infecciones humanas nosocomiales (27). *Enterococcus* spp., exhibe una variedad de mecanismos de resistencias intrínsecas y adquiridas frente a las mayores clases de antibióticos de uso clínico y están dota-

dos de mecanismos de intercambio genético eficientes que facilitan la diseminación de los genes de resistencia a antibióticos (28). Las resistencias adquiridas especialmente frente a penicilina/ampicilina, aminoglicósidos y glicopéptidos han ido en aumento, limitando su espectro terapéutico.

Existen evidencias científicas que relacionan el uso de antibióticos en la cría de animales con la aparición de cepas de *Enterococcus* spp., resistentes en los alimentos, corroborando la implicación de éstos en la diseminación de resistencias con repercusión en Salud Pública (29-30).

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio reflejan que existe contaminación de los cultivos agrícolas vertidos con agua de regadío de la cuenca del río Chambo por especies de enterobacterias y *E. faecalis*; con altos porcentajes de resistencia a antibióticos de uso clínico betalactámicos, aminoglucósidos y trimetoprim sulfá, además tres cepas de enterobacterias expresaron fenotipos de resistencia correspondientes a la producción de betalactamasas AmpC inducibles y 2 cepas de *E. faecalis* presentaron resistencia a vancomicina y penicilina, de allí la necesidad de considerar establecer criterios que requieren el esfuerzo conjunto de gobiernos, productores y consumidores, implementando procesos de tratamiento de aguas residuales eficientes, así como realizar un seguimiento microbiológico permanente teniendo en cuenta el aspecto de la resistencia a los antibióticos, junto con un mayor control de la ingesta de medicamentos y una adecuada gestión de los residuos médicos.

Referencias

1. Rivera-Jacinto M, Rodríguez-ulloa C, López-Orbegoso J. Contaminación fecal en hortalizas que se expenden en mercados de la ciudad de Cajamarca, Perú. Rev Peru Med Exp Salud Publica. [Internet]. 2009 [citado 2021 Jun 30]; 26(1): 45-48. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100009&lng=es.
2. Alegbeleye, Oluwadara Oluwaseun, Ian Singleton, y Anderson S. Sant'Ana. 2018. Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce during field cultivation: A review. Food Microbiol. [Internet]. 2018 [citado 2021 Jun 30]; 73 : 177-208. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29526204/>.
3. Rodríguez Torrens H, Barreto Argilagos G, Sedrés Cabrera M, Bertot Valdés J, Martínez Sáez S, Guevara Viera G. Las enfermedades transmitidas por alimentos, un problema sanitario que hereda e incrementa el nuevo milenio REDVET. [Internet]. 2016 [citado 2021 Jun 30]; 16 (8):

- 1-27. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63641401002>.
4. Zúñiga Carrasco IR, Caro Lozano J. Enfermedades transmitidas por los alimentos: una mirada puntual para el personal de salud. [Internet]. 2017 [citado 2021 Ago 20]; 37 (3): 95-104. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.medigraphic.com%2Fpdfs%2Fmicro%2Ffei-2017%2Ffei173e.pdf&clen=161529&chunk=true>
 5. Castro Delgado ZL. Presencia de microorganismos patógenos y genes de virulencia y resistencia a antibióticos en agua de riego en huertas de Chihuahua, Puebla y Veracruz. 2020. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/20892>.
 6. Koneman EW, Winn WC. Enterobacteriaceae. En: Koneman Diagnóstico Microbiológico: Texto y Atlas en color. 6ta. edición. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana; 2008. p. 205-62.
 7. Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). Performance standards for antimicrobial susceptibility testing Clinical and Laboratory Standards Institute Wayne, PA. 2019.
 8. Antwi-Agyei P, Cairncross S, Peasey A, Price V, Bruce J, Baker K, et al. A Farm to Fork Risk Assessment for the Use of Wastewater in Agriculture in Accra, Ghana. PLOS ONE. [Internet]. 2015 [citado 2021 Ago 20]; 10 (11):1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142346>.
 9. Aportes a la planificación para la gestión integral de los recursos hídricos: Contribución del Comité de la Subcuenca del río Chambo [Internet]. 2015 [citado 22 de noviembre de 2021]; p 30. Disponible en: <http://cesa.org.ec/wpcontent/uploads/2018/07/aportes-a-la-planificacic3b3n-para-la-girrhpresentado-3.pdf>
 10. Subcuencachambo.wordpress.com. [Internet]. Ecuador: 2015 [actualizado 6 de abril de 2015; citado 22 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://subcuencachambo.wordpress.com/diagnostico-de-la-subcuenca/>
 11. Molina J, Orozco J. Detección de resistencia antimicrobiana en bacterias de interés clínico aisladas en el Río Chambo. UNACH. [Internet]. 2019 [citado 22 noviembre de 2021]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/5557/1/UNACH-EC-FCS-LAB-CLIN-2019-0007.pdf>
 12. Cazares Silva M. Bacterias patógenas para el hombre aisladas en productos agrícolas provenientes de la cuenca del Rio Guano. UNACH. [Internet]. 2019 [citado 22 noviembre de 2021]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6222>
 13. Bautista V. Estudio de la calidad del agua de la cuenca del Río Chambo en época de estiaje. [Internet]. 2014 [citado 10 febrero de 2018]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/3221>
 14. Ríos S, Agudelo R, Gutiérrez L. Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. Rev. Fac. Nac. Salud Pública [Internet]. 2015 [citado 2021 Ago 20]; 35 (2): 236-47. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf>
 15. Robert-Pullés M. Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba. Revista CENIC. Ciencias Biológicas [Internet] 2014 [citado 2021 Ago 26]; 45(1): 25-36. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1812/181230079005.pdf>.
 16. Larrea Murrell J A, Rojas Badía M M, Romeu Alvarez B, Rojas-Hernández M, Heydrich-Pérez M. Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. Rev CENIC Ciencias Biológicas [Internet]. 2013 [citado 2021 Ago 20]; 44 (3): 24-34. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>
 17. Russo N, Caggia C, Pino A, Coque TM, Arioli S, Randazzo CL. Enterococcus spp. in Ragusano PDO and Pecorino Siciliano cheese types: A snapshot of their antibiotic resistance distribution. Food Chem Toxicol. [Internet]. 2018 [citado 2021 Ago 20]; 120: 277-286. Disponible en:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30009890/>

18. Pierre S, Passerat J. 2009. Antimicrobial resistance of fecal bacteria in waters of the Seine river watershed (France). *Sci Total Environ*. [Internet]. 2009 [citado 2021 Ago 20]; 408(2):365-72. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19853889/>

19. Silva J, Asserella L, Bolados N, Herrera N, Leyton J. Resistencia a antimicrobianos en cepas de *Enterococcus* spp. aisladas en hospitales del Norte de Chile. *Revista Chilena Infectologia* [Internet]. 2006 [citado 2021 Ago 20]; 23(3):226-231. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-10182006000300005&lng=es.

20. Pazda M, Kumirska J, Stepnowski P, Mulkiewicz E. (2019). Antibiotic resistance genes identified in wastewater treatment plant systems – A review. *Sci Total Environ*. [Internet]. 2019 [citado 2021 Ago 22]; 697:134023. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31479900/>.

21. Abriouel H, Omar NB, López RL, Gálvez A. La doble faceta del género *Enterococcus* y su importancia en alimentos. *Real Acad Ciencias Vet Andalucía Orient* [Internet]. 2008 [citado 2021 Ago 22]; 21:66-74. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3327057>.

22. Odonkor ST, Addo KK. Prevalence of Multidrug-Resistant *Escherichia coli* Isolated from Drinking Water Sources. *Int J Microbiol*. [Internet]. 2018 [citado 2021 Ago 23]; 2018(7204013):1-7. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30210545/>.

23. Martínez Rojas DV. Betalactamasas tipo AmpC: Generalidades y métodos para detección fenotípica. *Rev. Soc. Ven. Microbiol*. [Internet]. 2009 [citado 2021 Ago 30]; 29(2):78-83. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562009000200003&lng=es.

24. Philippon A, Arlet G, Jacoby G. Plasmid-determined AmpC-type β -lactamasas. *Antimicrob Agents Chemother*. [Internet]. 2002 [citado 2021 Ago 30]; 46:1-11. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC126993/>.

25. Gökmen M, Önen A, Ektik N, Kara R, Torlak E, Metli M. Detection of Prevalence, Antibiotic Resistance and Virulence Factors of *Enterococcus* spp. Isolated From Ready to Eat Foods . *Kocatepe Vet J*. [Internet]. 2017 [citado 2021 Ago 30]; 10(2):76-82. Disponible en: <https://dergi-park.org.tr/tr/pub/kvj/issue/32997/368499>.

26. Rehaïem A, Fhoula I, Slim AF, Ben Boubaker I.B, Chihi AB, Ouzari H. Prevalence, acquired antibiotic resistance and bacteriocin production of *Enterococcus* spp. isolated from tunisian fermented food products. *Food Control*. [Internet]. 2016 [citado 2021 Ago 30]; 63: 259-266 Disponible en : [10.1016/j.foodcont.2015.11.034](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.11.034).

27. Marin A, Gálvez A y Pérez R. Antimicrobial Resistance in *Enterococci*. *J Infect Dis Ther*. [Internet]. 2014 [citado 2021 Ago 30]; 2: 150. Disponible en : <https://www.readcube.com/articles/10.4172%2F2332-0877.1000150>.

28. McGowan L, Jackson C, Barrett J, Hiott L, Fedorka-Cray P. Prevalence and antimicrobial resistance of enterococci isolated from retail fruits, vegetables, and meats. *J Food Prot* [Internet]. 2006 [citado 2021 Ago 30]; 69 (12): 2076-82 Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17186667/>

29. Hanchi H, Mottawea W, Sebei K y Hammami R. The Genus *Enterococcus*: Between Probiotic Potential and Safety Concerns—An Update. *Front. Microbiol*. [Internet]. 2018 [citado 2021 Ago 30]; 9: 1791 Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01791>

30. Vandera E, Lianou A, Kakouri A, Feng J, Koukkou A, Samelis J. Enhanced control of *Listeria monocytogenes* by *Enterococcus faecium* KE82, a multiple enterocin-producing strain, in different milk environments. *J. Food Protect*. [Internet]. 2017 [citado 2021 Ago 30]; 80 (1): 74-85 Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28221890/>

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE ACCIDENTABILIDAD EN LA AVENIDA MARISCAL SUCRE, ENTRE LAS AVENIDAS, UNIVERSITARIA Y SAN FRANCISCO DE RUMIHURCO.

Analysis of the accident rate on Mariscal Sucre Avenue, between Universitaria and San Francisco de Rumihurco Avenues.

Rivera Alex I. , León Mario G.* , Cabezas Juan F. , Miranda Stalin J. 

Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias - Ingeniería Civil, Quito, Ecuador.

*mgleon@uce.edu.ec

Resumen

En el presente estudio técnico el tema de accidentabilidad es abordado de manera estadística a nivel nacional, provincial y cantonal, para posteriormente enfocarse en la avenida Mariscal Sucre la cual mediante datos de la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas es la vía más accidentada dentro del sistema vial del Distrito Metropolitano de Quito. La avenida Mariscal Sucre tiene una longitud de 31 kilómetros atravesando la ciudad por su flanco occidental desde Guamaní en el sur hasta Ponceano en el norte, para su estudio se delimitó el recorrido tomando como punto de inicio la intersección con la avenida Universitaria hasta la avenida San Francisco de Rumihurco resultando un tramo de 12.7 kilómetros. El análisis del tramo de la avenida parte de la determinación de los índices de accidentabilidad, morbilidad y mortalidad mediante el estudio del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) y de un buffer poblacional de los barrios que colindan con el trayecto de la vía. Posteriormente se procede a identificar los puntos críticos también conocidos como negros que son aquellos donde los siniestros son más recurrentes.

Palabras claves: Mariscal Sucre, accidentalidad, índices, mortalidad, buffer, percentil.

Abstract

In this technical study, the accident rate is approached statistically at the national, provincial and cantonal levels, to later focus on Mariscal Sucre Avenue, which according to data from the Metropolitan Public Company of Mobility and Public Works is the most accident-prone road within the road system of the Metropolitan District of Quito. Mariscal Sucre avenue has a length of 31 kilometers crossing the city on its western flank from Guamani in the south to Ponceano in the north, for its study the route was delimited taking as a starting point the intersection with Avenida Universitaria to Avenida San Francisco de Rumihurco, resulting in a 12.7 kilometer stretch. The analysis of the section of the avenue starts from the determination of the accident, morbidity and mortality rates through the study of the Annual Average Daily Traffic (AADT) and a population buffer of the neighborhoods that adjoin the route of the road. Subsequently, the critical points, also known as black spots, are identified, which are those where accidents are most recurrent.

Keywords: Mariscal Sucre, accident rate, rates, mortality, buffer, percentile.

Fecha de recepción: 05-04-2021

Fecha de aceptación: 08-11-2021

Fecha de publicación:

I. INTRODUCCIÓN

El número anual de víctimas fatales resultado de

accidentes de tránsito a nivel mundial ha sufrido un incremento de 1.20 a 1.35 millones durante los años 2015 y 2016, además esta causa de muer-

te se ha posicionado como la principal en las personas de entre los 15 y 29 años (1). La distribución de las víctimas causadas por los accidentes de tránsito es irregular en todo el mundo y depende del desarrollo de cada país, en los países de bajos ingresos estas muertes representan el 90% de las que se producen en todo el mundo a pesar de que en dichos países solo se encuentra el 50% del total de vehículos del mundo (2).

Después del impacto en la salud pública, los accidentes de tránsito se convierten en un problema importante para el desarrollo, significando una pérdida económica equivalente al 3% del PIB en países industrializados y 5% en países de ingresos medios y bajos (3) como es el caso de los países de América Latina y el Caribe (ALC) en donde está perdida económica es inaceptable pues podría invertirse en el mejoramiento de la calidad de vida y oportunidades para las personas (4).

En el 2011 las Naciones Unidas a través de la OMS proclamaron el Decenio de Acción para la Seguridad Vial (2011 -2020) con el objetivo de estabilizar y reducir el número de muertes producto del tránsito a nivel mundial mediante 5 pilares básicos; gestión de la seguridad vial, vías de tránsito y movilidad, vehículos más seguros, usuarios de vías de tránsito y respuesta tras los accidentes (5).

A pesar de los objetivos planteados por la OMS las estadísticas muestran una tendencia al aumento de los accidentes de tránsito, algo que se evidencia en América Latina con un total anual de 142 525 fallecidos y 5 millones de lesionados. En cuanto a los peatones fallecidos por accidentes de tránsito, el promedio para la subregión Andina representa el 43%, mientras que Ecuador ocupa el séptimo lugar en tasa de mortalidad por accidentes de tránsito en Latinoamérica y es el décimo tercero a escala global en comparación con países de ingresos similares (2).

Un accidente de tránsito es un hecho o situación ocurrido en la vía donde interviene por lo menos un vehículo en movimiento que puede o no provocar lesiones y/o muertes a personas así como daños materiales [6], es un evento que escapa del control del ser humano aunque esto no significa

que sea un hecho súbito potencialmente prevenible (7), es por esta razón que la OMS y Naciones Unidas hacen uso de la frase “la seguridad vial no es accidental” lo que da como resultado que la denominación de accidente de tránsito debería ser reemplazada por “ siniestro o hecho vial” (8).

Según la tipología a los siniestros de tránsito se los puede considerar: simples cuando únicamente involucran a un solo vehículo que se encuentra en movimiento sobre la vía el cual puede experimentar pérdida de pista, volcamiento, salto, caída, incendio, estrellamiento y/o rozamiento; múltiples en los que intervienen dos o más vehículos simultáneamente o bien intervienen vehículos y peatones, estos pueden resultar en choques, atropello, arrollamiento, roce y/o colisión, la última tipología recae en los accidentes mixtos que se definen como siniestros en los que se combinan varios tipos de accidentes de tránsito pudiendo ser simples con múltiples o viceversa (6).

Giscard, indica en su estudio que el 61% de conductores interrogados señalan al destino o a la mala suerte como el principal factor desencadenante de un siniestro de tránsito, si esta visión fatalista fuera cierta, las medidas que se toman para prevenir accidentes de tránsito serían inútiles ya que estos tendrían lugar cuando y donde menos se lo espera (9). Los siniestros de tránsito son producto de cuatro factores fundamentales que tienen una interacción constante en un lugar y tiempo determinado (10), estos son: el factor humano, factor mecánico que se refiere al vehículo automotor, factor vial o características geométrías de la vía y el factor ambiental. (Tabla 1)

Factor	Participación
Vía y entorno	2.5 %
Usuario	65.0 %
Vehículo	2.5 %

Tabla 1. Participación de los factores del tránsito en los siniestros viales. Fuente: (10)

El desarrollo de un siniestro de tránsito está presidido por dos elementos “tiempo” y “espacio”, el espacio es el lugar específico donde suceden los hechos, mientras que el tiempo corresponde a segundos o fracciones de segundos que a la vez se componen de tres fases, percepción, decisión y conflicto. (Figura 1)



Figura 1. Fases de un accidente de tránsito.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se ha recurrido a la aplicación del método empírico-analítico y el método deductivo directo, debido a que se extraen partes de un todo para ser analizadas individualmente mediante el procesamiento y estudio de datos entregados por entidades públicas y por trabajos realizados en campo, conduciendo la trayectoria del estudio de lo general a lo particular.

El índice de accidentabilidad en la Avenida Mariscal Sucre ha sido el tema general de estudio y de ello se han desglosado varias partes que fueron analizadas individualmente como las causas, por las cuales se producen los accidentes de tránsito, la tipología y lugares de los siniestros.

Análisis de accidentalidad: Ecuador y Distrito Metropolitano de Quito.

El registro de siniestros de tránsito de manera oficial por parte de las entidades reguladoras ha permitido la realización de estudios que conlleven el análisis de la accidentalidad vial como el titulado "Caracterización de la mortalidad por Accidentes de Tránsito en Ecuador, 2015" del cual se desprende que desde 1998 al 2015 fallecieron 29 148 personas debido a algún tipo de siniestro vial (11).

De acuerdo a los datos expuestos por la Agencia Nacional de Tránsito a escala nacional el número de siniestros viales, así como la cantidad de lesionados producto de estos sucesos ha experimen-

tado una disminución desde el año 2015 al 2019 como se aprecia en la Figura 2.

A pesar de que el número de incidentes de tránsito ha disminuido, la cifra de víctimas fatales correspondiente al mismo periodo presenta un incremento de 2138 a 2180 lo que permite entrever que la gravedad de los accidentes se ha agudizado.

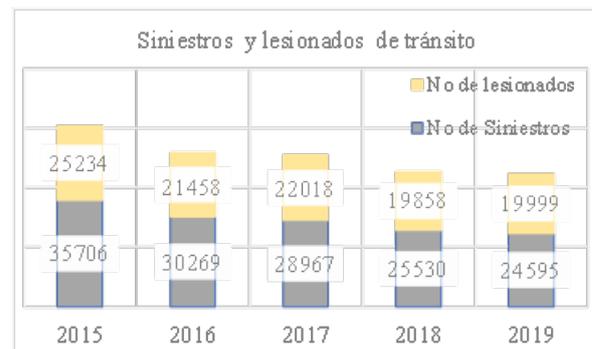


Figura 2. Siniestros y lesionados de tránsito.

La pandemia actual causada por el COVID-19, ha obligado a la sociedad a integrarse a una nueva realidad la que incluye una movilidad totalmente alterada debido al confinamiento, el teletrabajo y principalmente por las diferentes restricciones vehiculares impuestas a nivel nacional como medidas de control ante el avance de la pandemia (12), todo esto ha dado paso a un impacto directo en las estadísticas relacionadas con los siniestros de tránsito (13), evidenciándose una disminución promedio del 36% en el número de siniestros, lesionados y fallecidos correspondientes a los meses de enero a septiembre del 2020 en comparación con el mismo periodo del año 2019.

A nivel nacional la causa a la que se atribuye el 24% de siniestros es la distracción al momento de conducir debido al uso del teléfono celular y otros dispositivos electrónicos como pantallas acopladas al tablero del automóvil, mientras que al exceso de velocidad en conjunto con el desdén hacia las señales de tránsito representan cada una el 16% como causa generadora de accidentes. La provincia de Pichincha ha experimentado una reducción del número de accidentes en un 68% en el 2019 con respecto al año 2015, dándose una concentración del 95% del total de siniestros solo en el Distrito Metropolitano de Quito. (Figura 3)

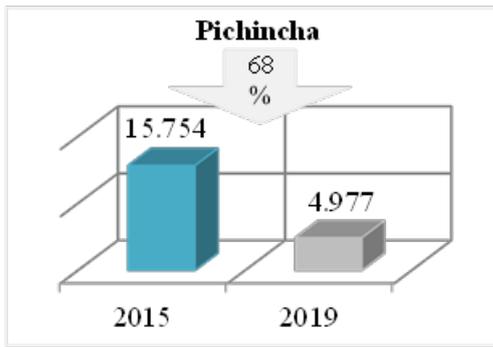


Figura 3. Accidentes de tránsito ocurridos en la provincia de Pichincha.

Análisis de accidentalidad en la Avenida Mariscal Sucre

La Avenida Mariscal Sucre, también conocida como Avenida Occidental fue idealizada por el alcalde de Quito Sixto Durán Ballen y construida en el año de 1976 con el objetivo de descongestionar el tránsito del centro de la urbe, en un inicio esta Avenida formaba parte del anillo vial periférico de la ciudad de Quito (14), pero a medida que la expansión poblacional avanzaba, esta perdía su propiedad delimitadora pasando a convertirse en la actualidad en una vía Semi Expresa Arterial.

La Avenida Mariscal Sucre alberga la mayor cantidad de accidentes en comparación con el resto de vías urbanas principales del DMQ (15) como se aprecia en la Figura 4, lo que justifica el actual estudio destinado a la identificación de los puntos críticos en un tramo de 12.7 km que inicia desde la Av. Universitaria al Sur hasta la Av. San Francisco de Rumihurco al Norte.

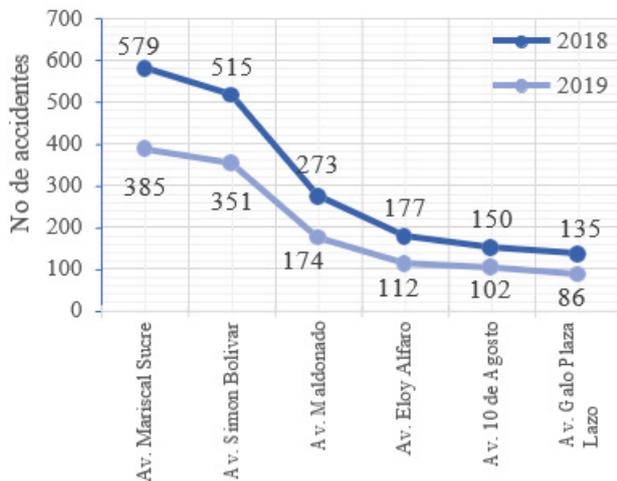


Figura 4. Número de accidentes en las principales Avenidas del D.M.Q.

Como ya se dijo anteriormente todos los acciden-

tes de tránsito son prevenibles y evitables incluso los que son atribuidos a fallas de fabricación de vehículos pues mediante estudios se ha verificado que estas son producto de un error humano consciente, es por eso que solo es posible hablarse de eventos inevitables a los que involucran en su totalidad a la intervención de la naturaleza. Partiendo de lo anterior descrito es posible decir que en un incidente de tránsito existe la participación directa de conductores y peatones, mediante el análisis llevado a cabo de los datos estadísticos correspondientes a los años 2018 y 2019 de la Av. Mariscal Sucre se establece un porcentaje de participación directa de los conductores del 94% y 6% por parte de los peatones.

Aunque a nivel nacional el exceso de velocidad se posiciona como la segunda causa generadora de siniestros de tránsito, en la Av. Mariscal Sucre pasa a ser la causa principal, esto a pesar que desde el punto de vista teórico la velocidad tiene un efecto positivo sobre la movilidad pues reduce los tiempos de transporte, la realidad demuestra que tiene repercusiones negativas para la seguridad en las vías ya que incrementa la probabilidad de ocurrencia de accidentes, así como la gravedad de sus consecuencias (3).

La infraestructura vial compuesta por la superficie de la carretera o calzada y la señalización horizontal y vertical, es un factor importante de seguridad vial, en el que el diseño de la carretera influye directamente en el número de siniestros que puedan darse a lo largo de esta (16).

A pesar de que en la fase de diseño se prioriza la seguridad vial, es inevitable que durante la operación de la vía se registren siniestros viales, pudiéndose dar estos de manera dispersa a lo largo de la carretera o concentrándose en ciertos puntos específicos que reciben el nombre de “puntos críticos o negros”.

La importancia de ubicar los “puntos negros” radica en la posibilidad de evaluación e identificación de las posibles causas técnicas que originan el alto número de siniestros, para de esta manera proponer medidas correctivas acordes a cada situación que tendrán la finalidad de reducir la siniestralidad de los puntos y por ende las conse-

cuencias que se derivan de estos (17). En el tramo de la Avenida Mariscal Sucre objeto de estudio ha sido posible identificar cinco puntos críticos en los que el número de siniestros ha aumentado o se ha mantenido constante. (Tabla 2)

Punto	N de siniestros	
	2018	2019
Mariana de Jesús	18	13
N48 (subida al Pinar)	7	7
Cesar Villacres	12	8
Fernández Salvador	25	14
José Figueroa	1	4

Tabla 2. Participación de los factores del tránsito en los siniestros viales.

Con la finalidad de sintetizar de manera analítica los aspectos más importantes que intervienen en la siniestralidad de la Avenida Mariscal Sucre se obtendrán indicadores cuya función radica en la cuantificación de los siniestros (18). Los índices que se muestran a continuación fueron construidos especialmente para el tramo de la vía estudiado, pues tienen como base numérica, al Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) de la vía, un buffer poblacional de los barrios colindantes a esta y además de datos estadísticos relevantes que cuantifican la participación que han tenido los conductores y peatones en los siniestros registrados. (Figura 5)

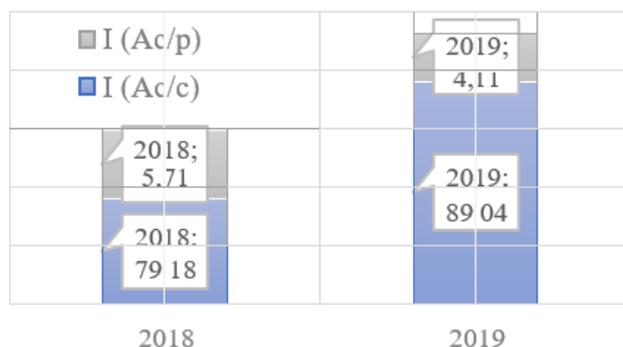


Figura 5. Indicadores de accidentes causados por el conductor y peatón.

Para que exista una reducción en los índices de accidentalidad, es indispensable que los usuarios de la vía siendo estos conductores, peatones o pasajeros dispongan oportunamente de información suficiente que les permita usar adecuadamente las vialidades, lo que se logra a través de señales de tránsito estandarizadas que permitan a los usuarios una interpretación uniforme de la información que estas transmiten a lo largo de

una vía ya sea rural o urbana (19).

Los dispositivos de control de tránsito indican a los usuarios las precauciones o prevenciones que deben tener en cuenta, las restricciones existentes en el tramo de la vía por el que se está circulando y la información necesaria sobre aspectos que necesariamente debe conocer el usuario de la vía, razones por las cuales la señalización vial está ligada directamente a la función de evitar siniestros viales, motivo suficiente por el cual en las vías debe verificarse periódicamente el estado físico, visibilidad y necesidad de nueva señalización. La fotogrametría al ser una extensión de la fotografía aérea, permite obtener información visual mediante vehículos aéreos no tripulados, que siguen una trayectoria definida previamente denominada “plan de vuelo” el cual está compuesto de una sucesión de hitos o puntos definidos geográficamente mediante latitud y longitud que el vehículo sobrevolará para la obtención de imágenes (20). En la Avenida Mariscal Sucre, mediante fotogrametría se pudo constatar el estado del inventario vial existente en la actualidad en cada punto crítico, esto con la finalidad de poseer información que permita tomar medidas destinadas al mejoramiento de dicho inventario y por ende influir directamente en la disminución de los siniestros viales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde el año 2015 el número de siniestros a nivel nacional ha experimentado en promedio una disminución anual del 9% hasta el año 2019, mientras que debido a las restricciones de movilidad impuestas en el territorio nacional como medida para controlar el avance del Covid-19 durante el 2020 el número de siniestros se redujo en un 37% (21).

A nivel provincial, Pichincha y Guayas son las provincias más afectadas por los siniestros viales, pues abarcan el mayor número de estos, aunque existe una marcada diferencia entre las dos como se aprecia en la Figura 6, a medida que en la provincia de Pichincha desde el 2015 el número de siniestros presenta una tendencia a disminuir, en el Guayas el número ha ido en ascenso, hasta que

en el año 2018 desplazo a Pichincha y paso a ser la provincia con más siniestros a nivel nacional.



Figura 6. Porcentaje de accidentes de tránsito en las Provincias de Pichincha y Guayas.

En la provincia de Pichincha el distrito Metropolitano de Quito es el cantón con mayor número de siniestros, concentrándose gran parte de estos en la Avenida Mariscal Sucre. Mediante un estudio estadístico se identificaron los Puntos Críticos en el tramo norte de la Avenida desde la intersección con la Avenida Universitaria hasta la Avenida San Francisco de Rumihurco, esto permitió su posterior análisis con el objetivo de tomar medidas destinadas a la reducción de siniestros viales.

La fotogrametría permite estudiar zonas geográficas a partir de imágenes enlazadas entre sí, con el fin de extraer información útil para aplicarla a diferentes fines tales como la inspección de estructuras, el ordenamiento urbano y vial, etc. Gracias a la fotogrametría fue posible cubrir el área estudiada en cada punto, facilitando la distinción de la señalización horizontal y puntos de iluminación, destacando tramos con desgaste en la pintura en la señalización. (Figura 7)



Figura 7. Avenida Mariscal Sucre y calle N° 48.

Demarcar las señales horizontales ayuda con la seguridad del usuario en la vía, como, por ejemplo; el paso cebra, (importante para el cruce peatonal), líneas de borde de calzada, (destinada para que el conductor observe el trayecto de la vía), líneas de división de carril, (adecuadas para distribuir a los vehículos de forma ordenada en el carril deseado), simbología (eficiente para direccionar al vehículo), etc. Es por ello que se debe garantizar una señalización horizontal legible y adecuada pues la ineficiente demarcación trae como consecuencia que los carriles sean invadidos o no sea posible distinguir la línea borde de la calzada provocando pérdida de pista, que los vehículos no se detengan en las líneas de pare, o circulen en carriles de dirección opuesta, etc. causas que a menudo provocan accidentes en esta vía.

Dentro del sistema vial, la seguridad del usuario sea este peatón o conductor, requiere de la visibilidad necesaria para incorporarse al flujo vehicular o peatonal, en este punto es donde la iluminación artificial tiene un papel importante, pues a pesar de que la carga vehicular durante la noche es un tercio de la existente en el día, los siniestros ocurren en mayor proporción en horas nocturnas, por lo cual, analizar la correcta ubicación de los puntos de iluminación es trascendental para que los usuarios viajen con seguridad por la vía.

Punto Crítico	Radio de curvatura	Espaciamiento máximo (INEN)	Distancia en el proyecto	Observación
Av. Mariscal Sucre y	m	m	m	
Mariana de Jesús	208.75	55	50 30	Cumple Cumple
N 48	439.37	77	50	Cumple
César Villacrés	2216.94	95	40	Cumple
Fernández Salvador	-	95	30 40	Cumple Cumple
José Figueroa	384.58	72	50	Cumple

Tabla 3. Iluminación actual en los Puntos Críticos

Como se observa en la Tabla 3 los puntos de iluminación han sido colocados a la distancia recomendada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Las avenidas y calles son uno de los principales componentes del sistema vial, sujetos a volúmenes de tránsito que poseen características espaciales y temporales específicas. Su principal objetivo es obtener información sobre el movimiento de vehículos dentro de un sistema vial y son expresados siempre con respecto al tiempo esto hace posible que sea estudiado su comportamiento futuro. De forma general los datos de volúmenes de tránsito se utilizan en diferentes campos, tales como planeación, ingeniería de tránsito, investigación, uso comercial y seguridad. El volumen de tránsito obtenido en el presente proyecto estará destinado al campo de seguridad vial, permitiendo el cálculo del índice de accidentes y mortalidad con respecto al Tráfico Promedio Diario Anual, el cual es un dato importante para ratificar la factibilidad del estudio. Para la obtención del TPDA y la composición vehicular correspondiente a la Avenida Mariscal Sucre, se aplicó dos tipos conteos el manual y el automático.

El conteo automático permite obtener el volumen total del tráfico de manera rápida y sin distinción entre cada vehículo debido a la limitada tecnología de los contadores automáticos, por lo cual no pueden ser considerados como suficientes para un estudio de seguridad vial, para solventar esta falencia se aplica el conteo manual que permite conocer el porcentaje de vehículos livianos, pesados y buses que circulan por la vía, y que se muestra a continuación en las Tablas 4 y 5.

PUNTO	SENTIDO	TPDS	FH	FD	FS	MES	FM	TPDA (Veh/día)
Av. LEGARDA	Norte - Sur	36 109	1.00	1.006	1.00	ENERO	1.031	37 443
	Sur - Norte	38 272	1.00	1.009	1.00	ENERO	1.031	39 827
Av. MARIANA DE JESUS	Norte - Sur	21 220	1.00	1.041	1.00	ENERO	1.031	22 783
	Sur - Norte	43 552	1.00	1.007	1.00	ENERO	1.031	45 228

Tabla 4. Valor de TPDA (contadores automáticos).

PUNTO	SENTIDO	Livianos	Pasajeros	Carga	Motos	TPDA
Av. Mariscal Sucre y Legarda	Norte - Sur	33 051	607	752	1 682	36 092
	Sur - Norte	91.57%	1.68%	2.08%	4.66%	100.00%
		33 941	792	715	2 559	38 007
		89.30%	2.08%	1.88%	6.73%	100.00%

Tabla 5. Composición vehicular (conteo manual).

Mediante el valor del TPDA fue posible realizar la reclasificación de la Avenida Mariscal Sucre en su inicio fue concebida como una vía perimetral, y en la actualidad según la Ordenanza Metropolitana N°0432 (2013) entra en la clasifi-

cación de vía semi expresa arterial.

Alternativas de solución

Con el objetivo de lograr vías urbanas seguras para los usuarios se necesita intervenir en dos ámbitos principalmente:

Preventivo: en el que se busca evitar que se generen conflictos y por lo tanto siniestros viales, en este ámbito se encuentra la aplicación de criterios de seguridad aplicados en la planificación urbana, de la red vial, y en el diseño y operación de las vías.

Correctivo: donde se realiza la corrección o ratificación de factores viales que ya están generando siniestros. Los accidentes que se dan de manera dispersa a lo largo de una vía son abordados mediante la “gestión segura de tránsito”, mientras que en los puntos negros que son los que abarcan la mayor cantidad de siniestros se aplica medidas de ingeniería de bajo costo (22).

Las medidas ingenieriles de bajo costo son herramientas técnicamente planificadas y aplicadas en sitios específicos de una vía que fueron identificados como conflictivos, dichas herramientas son destinadas a la reducción del número de siniestros a través de una corrección y mejora de la infraestructura vial. Dichas medidas son eficaces pese a su relativa simplicidad, entre estas se encuentra la colocación de atenuadores de velocidad, despeje de obstáculos visuales (rameado de árboles frondosos), manteamiento de la pintura de la señalización horizontal, colocación de isletas en intersecciones, entre otras (23).

La elección y posterior aplicación de las medidas ingenieriles de bajo costo depende de varios factores que deben ser previamente analizados, pudiendo ser estos: el clima y el tipo de material que se dispone. Las medidas destinadas a la reducción de siniestros en los puntos críticos han sido sintetizadas de manera grupal como se muestra a continuación:

i. A través de la fotogrametría se comprobó el desgaste que presenta la señalización horizontal en los puntos críticos, motivo por el cual la colocación de pintura nueva es el requerimiento

con el que se debe inicial.

ii. La implementación de nueva señalización horizontal como es el caso de líneas logarítmicas acompañadas de tachas tienen como objetivo influir en la reducción de velocidad la misma que se ha comprobado que es elevada en los puntos críticos.

iii. En casos en los que la pendiente no permite la instalación de reductores de velocidad físicos, la opción viable recae en reductores virtuales los cuales generan un impacto visual a los conductores provocando una reducción de velocidad.

iv. El atenuador de impactos es un dispositivo físico que ha demostrado su eficacia al momento de encauzar un vehículo a la vía en caso de choque, o de atenuar el impacto evitando así lesiones graves en los usuarios del automotor, por estas razones y al comprobar que en el punto crítico N3 se generan impactos es de imperiosa necesidad la instalación de este dispositivo (24).

Énfasis en caminar, montar bicicleta.

En el Ecuador la Nueva Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, establece en el Art. 204 que uno de los derechos de los ciclistas es disponer de vías de circulación

privilegiada dentro de las ciudades y en las carreteras, como ciclovías y espacios similares, ratificando esto en el Art. 209 donde se instituye que las entidades municipales deberán hacer estudios para incorporar en el casco urbano vías nuevas de circulación y lugares destinados para estacionamiento de bicicletas para facilitar la masificación de este medio de transporte.

En el contexto de la actual pandemia por el COVID-19 que ha obligado a todas las personas a mantener el denominado distanciamiento social la Organización Mundial de la Salud establece que es necesario aprovechar aquel que ofrecen los modos de transporte activos en los que la probabilidad de contraer el virus es del 0.1%, frente a las condiciones de encierro que generan los transportes públicos donde la probabilidad de contagio asciende a un 67%. Del mismo modo

los medios transporten como la bicicleta permiten un reforzamiento del sistema inmunológico de los usuarios reduciendo el riesgo de contagio.

Por todo lo planteado anteriormente se propone acercar a la avenida Mariscal Sucre a una movilidad sostenible haciendo que el vehículo privado pierda su protagonismo y permitiendo así que el peatón pueda moverse de manera más segura y saludable y en armonía con el medio ambiente ya sea a pie, o bicicleta generando una movilidad sostenible (25).

IV. CONCLUSIONES

La siniestralidad en el Ecuador ha experimentado un descenso anual del 9% desde el año 2015 hasta el 2019, mientras que debido a las restricciones de movilidad impuestas en el territorio nacional como medida para controlar el avance del Covid- 19 durante el 2020 el número de siniestros se redujo en un 37%, esta reducción se ve refleja en la también disminución de lesionados producto de los mismos, lo que no sucede con las víctimas fatales en donde su número presenta un ascenso del 2% anual, permitiendo concluir que aunque el

número de siniestros se han reducido no sucede lo mismo con la gravedad que estos acontecen, y para que un país sea considerado como referente en seguridad vial la Organización Mundial de la Salud toma a la reducción de mortalidad por siniestros de tránsito como indicador principal.

La importancia de la determinación de los índices de accidentalidad radica en que estos son instrumentos que permiten sintetizar aspectos importantes de los siniestros, en el caso del tramo estudiado de la Avenida Mariscal Sucre se calculó los índices a partir del número total de accidentes registrados en la vía y de los atribuidos a los conductores y peatones, a través de estos parámetros fue posible conocer que cada 100 accidentes, en el 2018, 79 fueron causados por el conductor, mientras que en el 2019 el número haciende a 89; para esa misma cantidad de accidentes 6 fueron provocados por los peatones en el 2018 mientras que para el año 2019 el valor del índice se reduce a 4, esto permite concluir que el comportamiento

vial de los peatones ha mejorado durante el año 2019 pues su participación directa en siniestros viales se ha reducido, cosa que no ocurre con los conductores pues se evidencia el incremento de siniestros donde estos han influido.

A partir del cálculo del índice de accidentabilidad con respecto a la población que reside en los barrios ubicados a lo largo del tramo estudiado, es posible llegar a la conclusión que los siniestros de tránsito ocurridos en la Av. Mariscal Sucre, representan el 53.70% de los suscitados a nivel cantonal, comprobando así que efectivamente la Av. Mariscal Sucre es la que más siniestralidad posee en el Distrito Metropolitano de Quito.

Si bien la avenida Mariscal Sucre fue diseñada como una vía perimetral, el incremento de la población a su alrededor ha sido tal que en la actualidad es catalogada como una Vía Semi

Expresa Arterial según la ordenanza municipal N°0432, siendo este cambio es una de las causas principales para que se produzca el alto número de siniestros tal y como se ha observado en otras vías del país, en donde el cambio en el uso de la vía ha sido el factor común para la ocurrencia de accidentes.

Una vez realizado el respectivo análisis estadístico de los siniestros que tuvieron lugar a lo largo del tramo estudiado se obtuvo como resultado cinco Puntos Críticos o Negros. De dichos puntos es posible extraer como conclusión que su porcentaje de INCREMENTO – REDUCCIÓN de siniestros es inverso al de los puntos no críticos, como se muestra a continuación en el gráfico, es decir en los PC, existe una baja reducción y elevado incremento de siniestros, mientras que en los PNC la reducción es alta y el incremento bajo.

Referencias

1. World Health Organization, Global status report on road safety 2018, Geneva: WHO, 2018.
2. Organización Mundial de la Salud, Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2015, Ginebra: OMS, 2015.
3. Organización Mundial de la Salud, Control de la Velocidad, Ginebra: OMS, 2017.
4. D. Soria, A. Pinto, M. Ponce de Leon y E. Café, Estrategia de seguridad vial: Contribuyendo a disminuir la brecha de siniestralidad en América Latina y el Caribe: Resultados del primer quinquenio y plan de acción 2016-2020, Washington DC: Banco Interamericano de Desarrollo, 2017.
5. World Health Organization, «Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020,» [Internet]. [citado: 10 Noviembre 2020]. Disponible en: [https://www.who.int/roadsafety/decade_of_acti on/plan/plan_english.pdf?ua=1](https://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/plan_english.pdf?ua=1).
6. D. Medina, M. Medina y C. Escobar, Accidentes de tránsito Rescate in situ, Quito: Ediciones Médicas EDIMEC, 2019.
7. A. Congacha, J. Barba, L. Palacios y J. Delgado, «Caracterización de los siniestros viales en el Ecuador,» NOVASINERGIA, vol. II, n° 2, pp. 17-29, 2019.
8. J. Campon, Manual de Investigación de Siniestros Viales, Madrid: Ministerio del Interior-Dirección General de Tránsito, 2017.
9. P. Giscard, Phytosociologie de la securite el des risquesd accidents chez le conducteurs de voiture, Paris: Janvier Juin, 1967.
10. J. Dextre, M. Pirota, C. Tobasso, J. Bermudez y G. Anibal, Vías humanas: Un enfoque multidisciplinario y humano de la seguridad vial., Lima: Fondo Editorial Pontifica Universidad Católica del Perú, 2008.
11. A. Gomez, M. Russo y P. Suasnavas, «Caracterización de la Mortalidad por Accidentes de 2015,» Ciencimerica, vol. I, n° 5, pp. 22-32, 2016.
12. Instituto de Salud Global de Barcelona, «ISGlobal,» [Internet]. [citado 11 Noviembre 2020]; Disponible en: https://www.isglobal.org/documents/10179/794_3094/6_ISGlobal+COVID-19+y+movilidad+ES.pdf/428d93ba-d4b2-4042-9f24-ec5c17bb8dc5.

13. El Comercio, «El Comercio,» [Internet]. 29 Septiembre 2020. [citado 11 Noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/blogs/informe-judicial/pandemia-vuelven-fatidicos-accidentes-transito.html>.
14. D. Guaman, Diagnostico del problema de congestión vehicular en el intercambiador Fernand de Salvador: Intersección Av. Mariscal Sucre, Av. Fernandez Salvador y Calle Melchor de Valdez, Quito: Pontifica Universidad Catolica del Ecuador, 2016.
15. Dirección de ingeniería de tránsito y seguridad vial, «Número mensual de accidentes suscitados en los principales ejes viales del DMQ,» Agencia Metropolitana de Tránsito, Quito, 2020.
16. Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, Guía práctica de seguridad vial, Suiza: Global Road Safety Partnership, 2007.
17. Centro de Experimentación y Seguridad Vial Colombia S.A, «CESVI COLOMBIA,» [Internet]. 26 Octubre 2016. [citado 19 Noviembre 2020]. Disponible en: <http://www.revistaautocrash.com/identificar-puntos-negros-reduce-la-accidentalidad/>.
18. S. Cecchini, Indicadores sociales en América Latina y el Caribe, Santiago de Chile: Cepal: División de Estadística y Proyecciones Económicas, 2005.
19. R. Cal y Mayor y J. Cardenas, Ingeniería de Tránsito, Mexico D.F: Alfaomega Grupo Editor, 2007.
20. A. S. f. P. a. R. S. ASPRS, «The Imaging and Geospatial Information Society,» [Internet]. 6 Octubre 2020. Disponible en: <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>.
21. Agencia Nacional de Transito, «Agencia Nacional de Transito,» Agencia Nacional de Transito, [Internet]. 5 Enero 2021. Disponible en: <https://www.ant.gob.ec/index.php/estadisticas>. [Último acceso: 28 Marzo 2020].
22. CONASET, Hacia Vías Urbanas más Seguras: Medidas correctivas de bajo costo aplicadas en ciudades Chilenas, Santiago: Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito: Secretaría Ejecutiva, 2005.
23. A. Guillermo, Mejoras en la seguridad vial con medidas de bajo costo, Lima: Pontifica Universidad Catolica de Perú, 2018.
24. Pan American Health Organization, Status of Road Safety in the Region of the Americas, Washington, D.C: PAHO, 2019.
25. A. Gómez, V. Orbe y Y. Campos, «Morbilidad y mortalidad por accidentes de tránsito según componentes temporales, Ecuador,» Killkana Salud y Bienestar, vol. III, n° 1, pp. 9-16, 2019.

PLAN DEL CIERRE DE LA RELAVERA COMUNITARIA "EL TABLÓN", PROVINCIA DEL ORO, ECUADOR.

Closure plan for the "El Tablon" community tailing dam, El Oro province, Ecuador.

Núñez Romero Jorge Alberto* , Burbano Morillo Danny Santiago , Jácome Calderón Juan Francisco .

Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Quito, Ecuador.

*jorge_a_nunez_r@hotmail.com

Resumen

Se estableció un plan de cierre para la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), ubicada en la provincia de El Oro – Ecuador, afectada por problemas técnicos durante la operación en relación a; la metodología constructiva en lo que concierne a la depositación del relave conformando plataformas inestables que sobrepasan la altura del dique ($\pm 25\text{m}$), además del daño del sistema integral del drenaje de fondo, el impacto visual y paisajístico. Se desarrollan dos aspectos: el primero es la elaboración de un modelo geológico – geotécnico de la relavera mediante información obtenida de: 2085 m de líneas de tomografía eléctrica, 1390 m de líneas de sísmica de refracción, 100 m de sondeos eléctricos verticales y 150 m de sondeos con recuperación de núcleos, aproximadamente 20 m de calicatas y estudios in situ. Segundo, se proponen obras que mitiguen los daños que produce el mal manejo de la relavera como: la estabilización de las plataformas con el relleno hasta una cota de cierre (696 m.s.n.m.); la implementación de técnicas de fitorremediación, reforestación y la construcción de canales de desvío. Finalmente, es importante insistir en el diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua con lixiviado.

Palabras claves: Cierre de relavera, relave, fitorremediación, estabilidad, auscultación, compactación.

Abstract

A closure plan was established for the El Tablón community tailing dam (RCET in Spanish) located in the province of El Oro-Ecuador, affected by technical problems during the operation in relation to: the constructive methodology regarding the deposition of the tailings forming unstable platforms that exceed the height of the dike ($\pm 25\text{m}$), in addition to the damage to the integral system of the bottom drainage, the visual and landscape impact. Two fundamental aspects are developed; The first is the elaboration of a geological-geotechnical model of the tailings dam, through the information obtained from: 2,085 m of electrical tomography lines, 1,390 m of refraction seismic lines, 100 m of vertical electrical soundings and 150 m of drilling with core recovery, approximately 20 m of pits and in-situ studies. Second, works are proposed to mitigate the damage caused by mismanagement of the tailings as: the stabilization of the platforms with the filling up to a closing level (696m.s.n.m.); the implementation of phytoremediation techniques, reforestation and the construction of diversion channels. Finally, it is important to insist on the need for the design and construction of a water treatment plant with leachate.

Keywords: Tailings closure, tailings, phytoremediation, stability, auscultation, compaction.

Fecha de recepción: 05-04-2021

Fecha de aceptación: 08-11-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

Según datos calculados hasta el año 2002, en el mundo existen alrededor de 3500 presas de relaves, de las cuales entre 1915 y 2010 se contabilizan hasta 251 accidentes donde 221 fueron publicados en los Boletines del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD), es decir que han representado una relevancia importante; por el impacto ambiental o económico ocasionado en el lugar de operación (1). Proyecciones realizadas por expertos del Centro para la Ciencia en la Participación del Público de Montana y gestores del medio ambiente en Maine – EEUU, indican que las roturas de relaves “muy serias” se registrarían a partir de 2011 una por año, teniéndose registro de 5 desastres hasta 2016; las cuales representan el derramamiento de al menos 1 millón de metros cúbicos de residuos mineros (2).

Según portales de noticias como New York Times y Deutsche Welle, los accidentes como los ocurridos en el distrito de Minas Gerais en 2015 (Marianas) y 2019 (Brumadinho) en Brasil, se han catalogado como los desastres ambientales de mayor trascendencia en Latinoamérica en los últimos 10 años, ocasionando alrededor de 280 muertes, más de 100 kilómetros cuadrados de áreas contaminadas, además de 84.367 demandas y un monto superior a 700 millones en multas para las empresas mineras (3,4).

Según, Oldecop (1) las causas más relevantes para el fallo de las presas de relaves, son: deslizamiento del talud, terremotos, desbordamiento, problemas de cimentación, sistema de drenaje, falla por problemas en las estructuras auxiliares, erosión del dique, subsidencias o colapso del terreno.

Kieran (2) destaca que la reducción de costos y el método de construcción es el factor determinante en casi todas las causas de inestabilidad de las relaveras, donde las empresas mineras buscan mantener ganancias en el mercado de los minerales reduciendo así el costo de monitoreo y control ambiental durante y post operaciones.

El Consejo Internacional de Minería y Metales, (5) indica que en cada región donde se construyen estas estructuras debe existir regulaciones y

manuales que se apliquen a cabalidad en miras a impedir cualquier desastre ambiental y procurar la preservación del ecosistema. Manuales de manejo de relaves mineros aplicados en Perú y Chile, referentes mundiales en minería, promueven la importancia de aplicar prácticas responsables en todas las fases mineras mitigando la degradación ambiental que la actividad minera produce (6).

También es necesario tener en mente que, se ha mencionado que accidentes en relaveras como: Represa Bento Rodrigues en Minas Gerais, Brasil o el ocurrido en Barranco Colorado, Zhumiral, Azuay-Ecuador han sido provocados por acción de “venganza humana” de personas que conocían de esas infraestructuras al detalle (4).

La construcción de la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET) inicia en el 2013, en uno de los distritos mineros más antiguos del Ecuador (Piñas – Zaruma – Portovelo), donde operan alrededor de 85 plantas de procesamiento mineral para la obtención de oro. Por varios años las plantas de beneficio, a pesar de contar con permisos ambientales, descargaban material de relave con alto contenido de metales pesados al río Calera – Amarillo, siendo el afluente principal de la cuenca Puyango – Tumbes. Esto provocó una demanda internacional por parte de la República del Perú, al constatar contaminación de metales pesados en las aguas del río Tumbes, utilizada para el riego y uso doméstico de sus pobladores. (7)

A partir del 2012 el gobierno ecuatoriano se comprometió en dar una solución inmediata a la problemática detectada en el cantón Portovelo y plantea como acción emergente la construcción de la Relavera Comunitaria El Tablón para acoger un volumen aproximado de 5' 565 248 m³. Los estudios estuvieron a cargo del INIGEMM en el año 2012 y la construcción fue ejecutada entre enero de 2013 y marzo 2014 por el consorcio APR. En mayo de 2014 la relavera entro en operación con la siguiente infraestructura: dique de materiales sueltos compactado, drenes principales, laterales, piscina desarenadora, infraestructura de bombeo que permiten según el diseño, controlar el relave y sus lixiviados. (Figura 1)



Figura 1. a) Vista panorámica de la presa (mayo 2014), b) Construcción del sub-dren principal y lateral, c) Estructura drenante para recoger agua con lixiviado. d) Caja hidráulica de distribución de agua con lixiviado y de escorrentía.

Las problemáticas en relación al diseño y operación son; incertidumbre en la construcción del dique, no cuenta con planos As - built, se desconoce el tratamiento de la cimentación del dique y la implementación de estructura drenante en el cuerpo del dique. Los estribos donde se asientan los diques, son de material deformable (saprolito), este problema geológico podría provocar que uno de los estribos falle o se deslice el cuerpo del dique, derivando en la descarga acelerada del relave hacia la Quebrada el Salado, río Amarillo y río Tumbes (Perú).

La depositación de los relaves es anti - técnica, se realiza vertidos desde el borde superior hacia el vaso; conformando 3 plataformas sin compactar donde la cota de las plataformas están sobre los 20 m de la cota de la cabecera del dique, los taludes falsos de las plataformas (volteo de material) presentan indicios de inestabilidad por la falta de compactación y erosión por escorrentía superficial, provocando además el daño de la estructura drenante principal y secundaria (rotura) con el ingreso de relave al sistema drenante, dificultando el paso del agua de escorrentía.

El diseño para manejar el agua con lixiviado y el agua freática no contemplo la construcción de una planta de tratamiento de agua de lixiviado y el monitoreo del agua freática que se descarga a la quebrada El Salado. El impacto visual y paisajístico que genera la cobertura de relave y la carencia de un proceso metodológico de construcción para el depósito técnico de las arenas de relave. (Figura. 2, 3, 4, 5)



Figura 2. Año 2015, a) Vertido de relave desde la presa, b) Acumulación de agua dentro del vaso, evidenciando el mal funcionamiento de la estructura drenante, c) Terminal del tubo drenante sin conexión a caja hidráulica de recolección de agua de lixiviados. (8)



Figura 3. Año 2016, a) Nube de polvo de relave (polución), b) Terminal del tubo donde se muestrea el agua que desemboca en la quebrada Salado, c) Piscina desarenadora con agua de lixiviado en donde no existe un tratamiento para mejorar la calidad química. (9)



Figura 4. Año 2017, a) Erosión por agua de escorrentía sobre relaves dispuestos en la base sin compactación b) Derrame de relaves en la vía por inadecuado transporte, c) Plataforma artificial N° 3 conformada por volteo de relave desde la vía perimetral hacia el vaso. Además, disposición de relaves sin compactación en la base.



Figura 5. Año 2019, a) Vista panorámica del dique y 3 plataformas cuya cota superior supera ($\pm 25m$) a la cota del dique. b) Trabajos de volteo de material conformando taludes susceptibles a movimientos en masa y erosión. c) Falta de mantenimiento de infraestructura drenante. d) La administración de la relavera no exige cubrir el balde de las volquetas con lona (derrame de relave en vías).

En consecuencia, esta investigación se destina al diseño de un plan de cierre para la RCET el cual minimice el foco de contaminación evidenciado en la quebrada El Salado a través de modelos geológicos - geotécnicos para la identificación de zonas inestables, modelos de depositación, planes de auscultación, aplicación de un método de fitorremediación, diseño de áreas recreativas y reforestación, que en conjunto permitan mitigar el impacto ambiental y crear una zona ecológicamente sustentable y turísticamente atractiva.

Para esto se cuenta con información bibliográfica en el ámbito geológico, geotécnico y operacional donde los modelos de estabilidad se fundamentan en; topografía escala 1:1000, 2085 m de líneas de tomografía eléctrica, 1390 m de líneas de sísmica de refracción, 150 m de sondeos de recuperación de núcleos, más de 100 m de sondeos eléctricos verticales (10), aproximadamente 20 m de calicatas (11). Por otra parte, levantamientos in - situ con la recolección de datos geotécnicos, estructurales usando equipos portables (martillo

de Schmidt, penetrómetro y veleta de corte). La recolección de muestras de roca, suelo y relave permitió determinar en laboratorio sus parámetros índices, físico – mecánicos y químicos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de este proyecto se aplicó la siguiente metodología resumida en pasos:

1.- *Recopilación bibliográfica de estudios ejecutados*, se realiza un diagnóstico de documentos especializados con información de trabajos topográficos, geológicos, geotécnicos, hidrológicos, hidrogeológicos y ambientales sobre la relavera.

2.- *Entrevista a testigos*, se obtiene información a través de testimonios de técnicos y operadores de la RCET en relación a datos operativos y de relevancia técnica para la investigación.

3.- *Interpretación de imágenes satelitales*, se generan mapas temáticos que permitan visualizar los elementos constructivos de la RCET y la distribución espacial de zonas de depositación.

4.- *Estudios geotécnicos in – situ en roca, suelo y relave*, se levantaron estaciones geomecánicas y la resistencia de la roca mediante el uso del martillo de Schmidt. En suelo y relave se determinaron las propiedades resistentes mediante el uso de equipos portables (veleta de corte y penetrómetro).

5.- *Muestreo de campo*, se tomaron muestras selectivas de roca y relave para análisis de laboratorio. En roca se determinó la resistencia a la compresión simple de la matriz. En relave se ejecutaron ensayos de densidad, humedad, edométrico, corte directo y Proctor modificado. Además, se determinó el PH de muestras de agua de lixiviado en la planta desarenadora y en la quebrada El Salado.

6.- *Modelo geológico – geotécnico*, a partir de la información de estudios ejecutados y complementada con el trabajo de campo, se elaboran mapas

y perfiles que detallan gráficamente las características geológico – geotécnicas de las diferentes litologías presentes en la zona de la RCET.

7.- *Perfiles longitudinales y transversales para determinar la estabilidad de las plataformas de relave*, con la referencia de los perfiles geológico – geotécnicos se incluyeron las plataformas de relave y se ejecuta una simulación para comprobar o descartar su estabilidad.

8.- *Propuesta para el relleno hasta una cota de seguridad predeterminedada*, se diseñan modelos de depositación para el relave de la RCET, que garanticen la estabilidad del vaso y la seguridad del dique.

9.- *Diseño del plan de cierre*, se planifican obras para estabilizar física y químicamente al relave, mitigar su impacto visual, ambiental y la propuesta de uso turístico a la zona de la RCET.

III. RESULTADOS

Para el diseño del cierre técnico de la RCET, se desarrollaron varios estudios en relación al modelo geológico, la determinación de parámetros resistentes del macizo rocoso (roca fresca y roca meteorizada) y de los relaves. Además, se desarrolla un resumen de resultados en cuanto a estudios ejecutados para determinar la calidad química del agua.

Modelo geológico - geotécnico

La distribución espacial de la lito-estratigrafía se la interpreto mediante el modelamiento de 3 secciones geológico – geotécnicas (Figura 6), donde se incluyó investigaciones directas e indirectas como; 150 m de recuperación de testigos distribuidos en 6 sondeos, el contraste litológico diferenciado mediante 1390 m de sísmica de refracción, 2085 m de tomografía eléctrica (10) y geo – travesías donde se evidencio que la predominancia litológica es de un ortogneis de moderada a extremada meteorización (suelo residual), intruídos por diques pegmatíticos, dioríticos y andesíticos (12). (Tabla 1)

Unidad Geológica	Espesor (m)	RQD (%)	Meteoriz.	RMR (Valorización)	Resist. Eléctrica ($\Omega - m$)	Conduct. Eléctrica (m/s)
Saprolito	15 - 25	Regular (75 - 51)	Alta	Mala (40 - 21)	300 - 700	140 - 500
Macizo rocoso (MRX MET.)	>25	Regular (75 - 51)	Moderada	Regular (60 - 41)	700 - 50000	> 2700

Tabla 1. Características geotécnicas y geofísicas de las unidades lito-estratigráficas de la RCET.

En relación a la geología estructural, la roca metamórfica presenta un rumbo preferencial N60°O con buzamiento fuerte de 78° hacia el SO (Ver Figura 6), el macizo presenta 3 familias de discontinuidades donde el levantamiento de 37

estaciones geomecánicas concluye que la calidad del macizo rocoso general, según la clasificación geomecánica de Bieniawski, 1985, se encuentra entre una roca clase III (Moderada) y roca IV (Mala) (13).

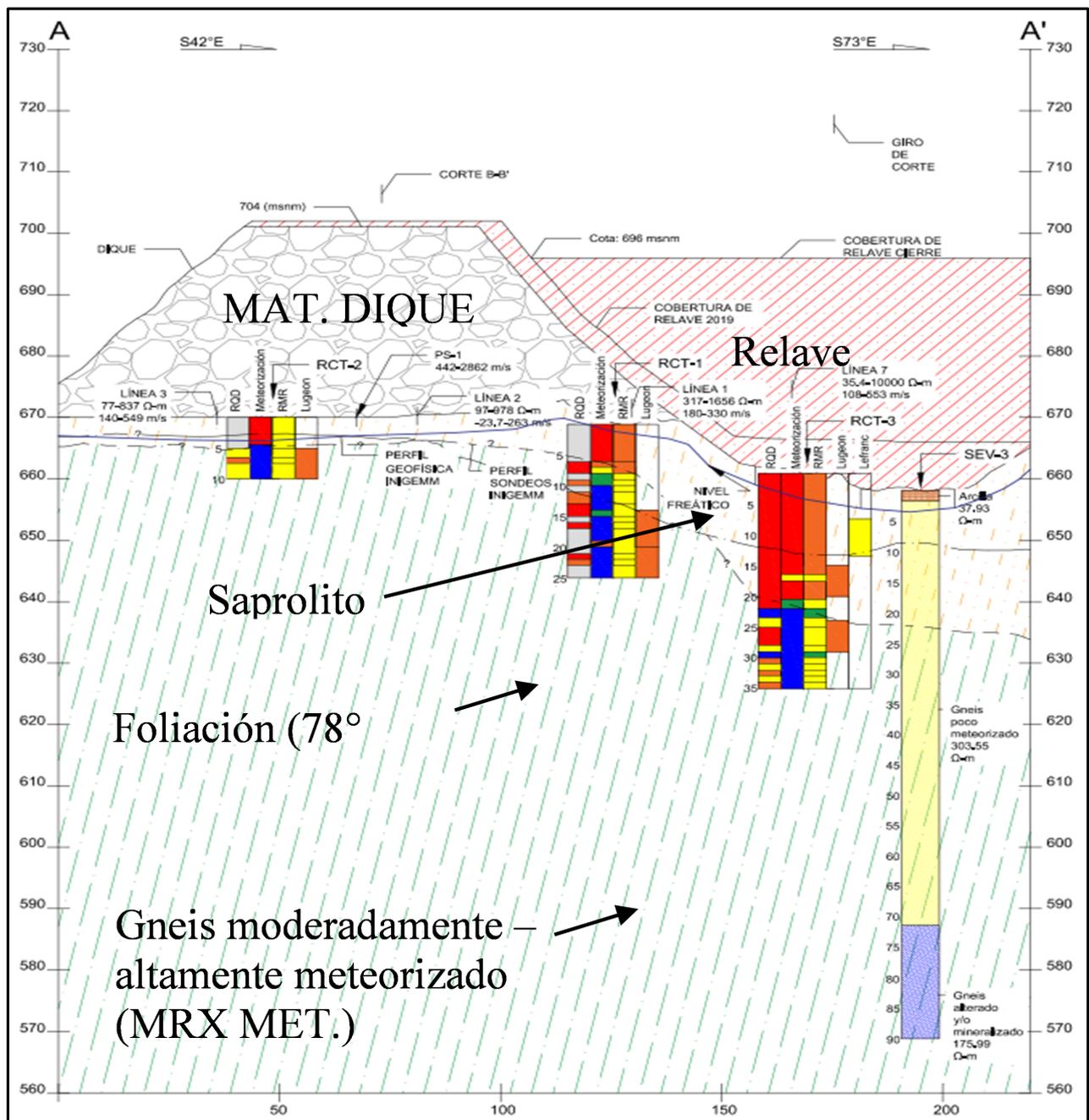


Figura 6. Sección geológico-geotécnica, donde se interpreta la calidad del macizo rocoso y niveles de meteorización en profundidad, con el uso de perforaciones y geofísica. Nota: Material de relave (MRV), material que conforma el dique (MAT. DIQUE), gneis moderadamente - altamente meteorizado (MRX MET.)

Parámetros físico mecánicos del macizo rocoso, relave y materiales que conforman el dique. En la Tabla 2 se resume los resultados de ensayos geotécnicos realizados en material de relave (muestreados para las 3 plataformas; PT1, PT2

Y PT3) y macizo rocoso. Con asterisco (*) se identifica parámetros bibliográficos, con doble asterisco (**) se identifica parámetros resistentes y deformaciones calculados mediante el criterio empírico de Hoek – Brown (14).

Muestra	Densidad (γ) KN/m ³	Cohesión (c) KN/m ²	Ángulo de fricción (ϕ)	Humedad (%)	SUCS	AASHTO
Saprolito	25*	156**	35**	10*	GW*	A – 1*
Roca MET.	25*	240**	44*	10*	GW*	A – 1*
Relave – PT1	20	40	54.16	11.4	SP-SM	A – 4
Relave – PT2	19.92	60	37.57	11.4	SP	A – 4
Relave – PT3	20.04	50	49.09	12.1	SM	A – 4
Mat. Dique	25*	156*	35*	–	–	–

Tabla 2. Propiedades físico mecánicas de saprolito, macizo rocoso (MRX), relave (MRV) y materiales del dique.

Nota: Con el símbolo (*) se indica valores bibliográficos y con el (**) se indica valores obtenidos mediante el cálculo de criterio de rotura de Hoek & Brown del software RocData. PT# (Plataforma).

Análisis de calidad química del agua de lixiviado.

La Figura 7 se relaciona; el promedio de 18 metales analizados en 22 muestras de agua de quebradas, piscina desarenadora del Tablón (recolección entre el 2015 hasta el 2019) con los límites máximos permisibles de la Normativa TULSMA Tabla 3 Anexo 1, Acuerdo Ministerial 097- A (15), donde 13 metales incumplen las concentraciones establecidas, a excepción de metales como la plata, arsénico, bario, berilo, cobalto y vanadio.

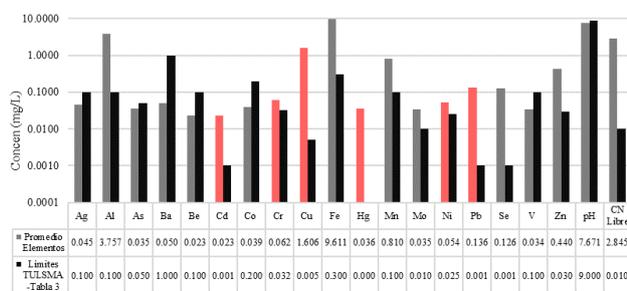


Figura 7. Comparación de concentraciones de elementos presentes en agua de lixiviado con los límites permisibles de la Normativa Ambiental TULSMA (Tabla 3). El resultado de cada elemento es el promedio del análisis de 20 muestras de agua tomadas en la Relavera el Tablón. (INIGEMM, 2015; IIGE, 2019).

Con rojo (Figura 7) se resalta algunos metales pesados que provocan efectos adversos en la salud humana, al sobrepasar el umbral de toxicidad. Por ejemplo; cadmio causa efectos carcinógenos; el cromo destruye las células del organismo derivando en cáncer; el cobre causa lesión renal, asma pulmonar; el mercurio produce parálisis, deformidad y enfermedades neuronales; el níquel origina cáncer pulmonar; el plomo provoca daño al sistema nervioso y enfermedades renales

vasculares. (17-21)

III. DISCUSIÓN

Análisis de Estabilidad

El modelo geológico – geotécnico y los resultados de laboratorio permitieron modelar perfiles de estabilidad (equilibrio límite) pseudo – estáticos a través de las tres plataformas de relave concluyendo que la inestabilidad de los taludes artificiales presenta una rotura circular con un factor de seguridad promedio de 0.58. (Figura 8)

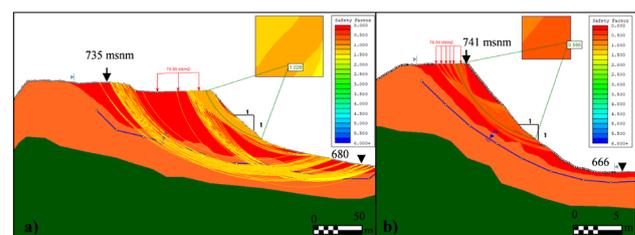


Figura 8. a) y b) Perfiles de estabilidad pseudo – estáticos en las plataformas 1 (FS: 0.595) y 2 (FS: 1.028). En verde se delimita el gneis moderada a altamente meteorizado, en naranja el saprolito y en rojo se muestra la conformación de las plataformas de relave. En azul se esquematiza el nivel freático.

Para ofrecer mayor estabilidad al vaso se plantearon dos alternativas, considerando que hasta el 2019 en la relavera se han depositado 2'044.798,00 m³, es decir; el 37% de llenado, proyectando un tiempo de vida útil de 10 años (2029).

La primera alternativa considera el retiro de las tres plataformas y realizar el vertido de material desde cotas inferiores hasta cotas superiores (cota de cierre: 696 m s.n.m., Fig. 9) en fases ascendentes iniciando desde la cola de la relavera hacia el

dique, donde la disposición de relave se debería configurar formando tongadas (5m x 4m x 0.5m) de material con una humedad que favorezca su máxima compactación.

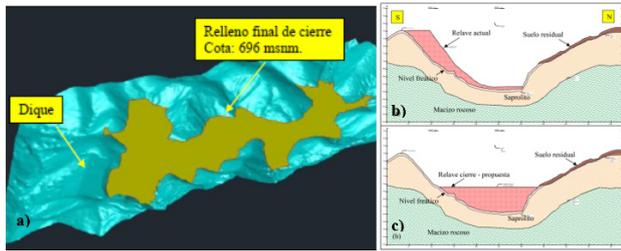


Figura 9. a) Vista isométrica SO de la RCET con el relleno de relave propuesto para el cierre (cota: 696 m.s.n.m.) b) Perfil trasversal (N-S) donde se evidencia la morfología del relleno de relave actual. c) Perfil trasversal (N-S) donde se evidencia la propuesta del relleno de relave hasta la cota 696 m.s.n.m.).

La segunda alternativa plantea como alternativa el construir 2 diques secundarios transversales al eje de la relavera conformados por relave y cemento, permitiendo controlar asentamientos diferenciales y el desplazamiento de los materiales hacia aguas abajo con el fin de no comprometer la estabilidad del dique principal. Para el cierre de la relavera (alternativas 1 y 2) se propone mantener una cota de relleno máxima en la 696 m.s.n.m. (Figura 10)

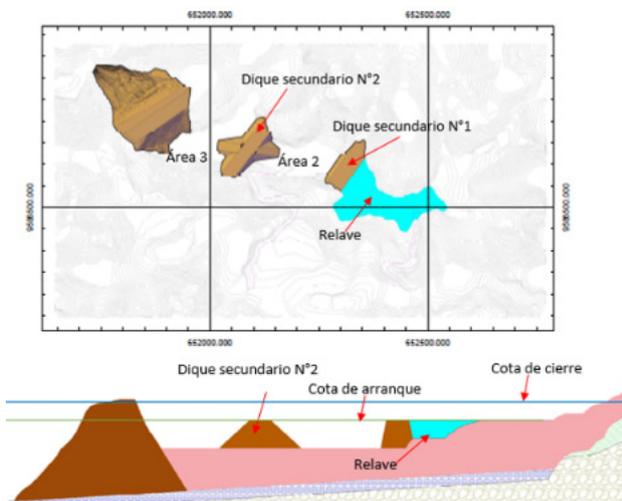


Figura 10. Vista en planta y perfil de la RCET, donde se ubican 2 diques secundarios. Fuente: Cobos, (22)

Obras de Cierre

Para disminuir el impacto ambiental y visual generado por el relave en la zona de la RCET se proponen varias obras, entre las cuales se tiene; el recubrimiento del vaso con 20 cm de arcilla para tapar al relave y sembrar especies fitorremediasoras. La fitorremediación consiste en la siembra

de plantas con capacidades de bio – acumulación de metales pesados, se utilizarán especies como la sierrilla sensitiva (*Mimosa pudica*) y tabaquillo (*Nicotiana glauca*) (23,24). Por otro lado, se plantea la reforestación al contorno al vaso de la relavera con el fin de devolver a la zona sus rasgos paisajísticos (25).

Es imperante la construcción de un canal de desvío perimetral que ayudará a conducir el agua de escorrentía del vaso, complementando las obras de estabilización de las plataformas de relave. El diseño de un parque en la parte central del vaso de la relavera que incluya elementos que generen un atractivo turístico para los pobladores de las comunidades aledañas. Finalmente, proponen medidas de auscultación con la instalación de una red de monitoreo topográfica, piezómetros Casagrande al pie del dique principal e inclinómetros en zonas susceptibles a movimientos en masa. (Figura 12).

Una de las obras más importantes es el diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua de lixiviado conexas a la piscina desarenadora, que minimice el pasivo ambiental por la descarga de agua con elementos pesados (26).

Con el fin de minimizar el impacto ambiental, del agua de lixiviado producto de los residuos mineros, se plantea el diseño de una planta de tratamiento de aguas de lixiviado. En la figura 11 se observa, la ubicación espacial de la presa de materiales sueltos compactada, vaso de deposición de relave, estructura drenante (subdren principal y subdren secundario) y la ubicación donde se plantea desarrolla el proyecto de implementación de una planta de tratamiento de aguas de lixiviado.

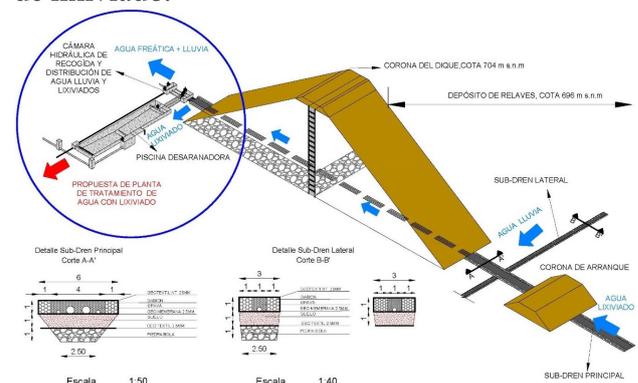


Figura 11. Vista Isométrica, donde se ubica la zona para implementar la planta de tratamiento de aguas de lixiviado.

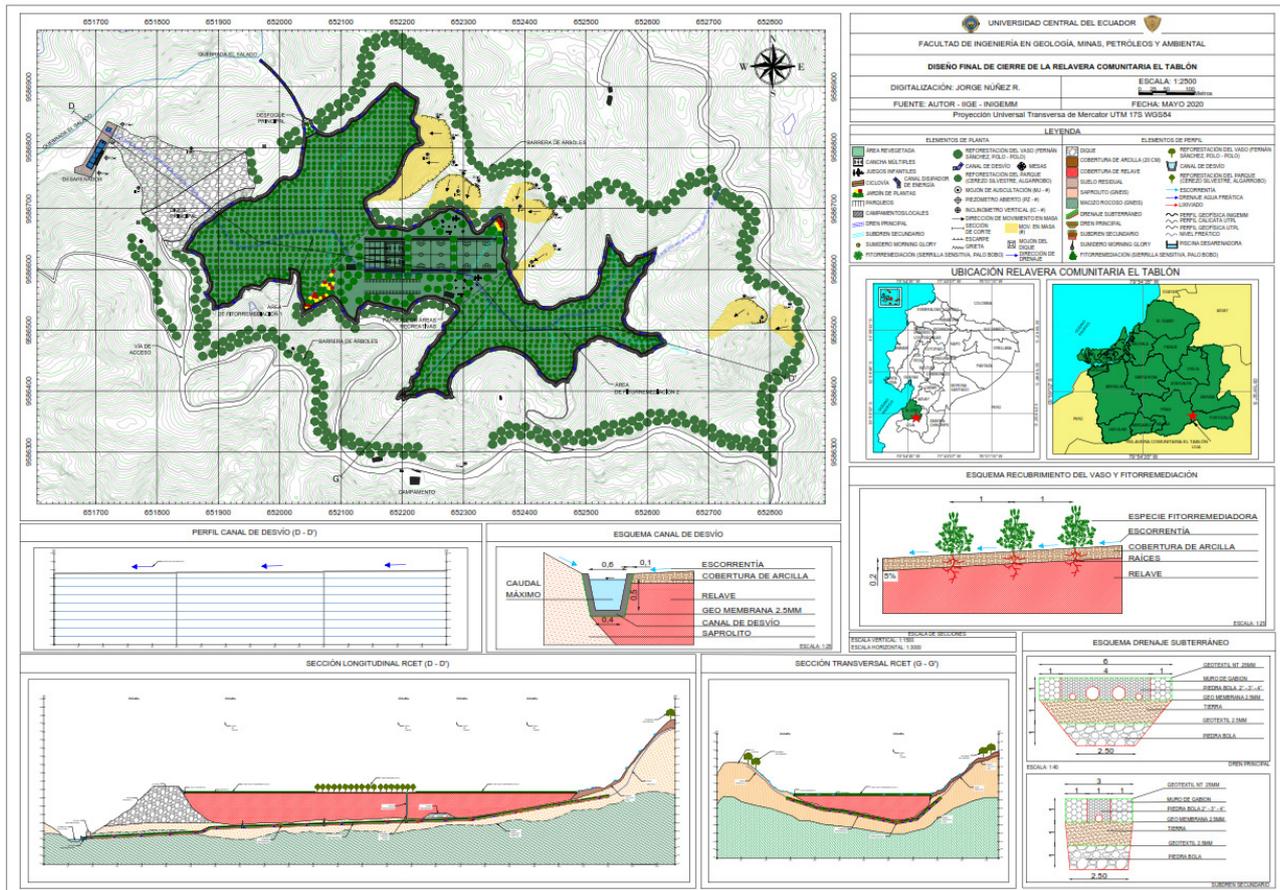


Figura 11. Diseño de cierre de la RCET

IV. CONCLUSIONES

La RCET, desde su operación (mayo 2014) hasta octubre del 2019, no cuenta con una planificación de depositación técnicamente establecida, evidenciando las siguientes problemáticas:

- La RCET no cuenta con normativas internas de operación en relación al carguío, transporte y depositación del relave.
- La polución y la alteración paisajística es uno de los problemas más evidentes en la relavera, los cuales son divisados desde el poblado de Zaruma.
- Mal funcionamiento del sistema de drenaje principal y lateral.
- Contaminación por agua con lixiviado en la quebrada El Salado, donde existe una elevación abrupta de concentración en metales pesados como Al, Ba, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, que evidencian la falta de una planta de tratamiento de agua de lixiviado.

- No se respetó la cota de diseño de relleno (706 m.s.n.m.) donde las plataformas 1, 2 y 3 alcanzan alturas superiores manteniendo una diferencia aproximada de 25 m.

- Se observó inestabilidad en los taludes falsos de las plataformas 1, 2 y 3, por no contar con una compactación adecuada, donde el vertido de las arenas se las realiza por volteo hacia el vaso de la relavera.

- Los problemas de inestabilidad son evidentes en el vaso de la relavera con la formación de múltiples movimientos en masa del tipo rotacional.

- Falta de auscultación geotécnica en la presa (cuerpo y estribos) y en las laderas que presentan inestabilidad.

- Falta de monitoreo ambiental en lo que concierne al control de parámetros establecidos en la norma TULSMA de calidad de agua y sólidos.

El levantamiento geológico de detalle, estudios directos e indirectos, permitieron la configura-

ción del modelo geológico – geotécnico, identificando la distribución espacial de dos unidades lito – estratigráficas donde el gneis moderadamente meteorizado se ubica como basamento y suprayacendo a este, en forma discontinua, se desarrolla material saprolítico (suelo residual) con una potencia variable entre 15 – 25m.

El diseño de cierre se realizó en miras a mitigar y mejorar las condiciones actuales en las que se encuentra la RCET (2019), para lo cual: se plantea un modelo de cierre técnico de la relavera que incluye:

- Es imperante el diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua con lixiviado.
- Fitorremediación para mitigar la contaminación producida por el relave, con el uso de plantas endémicas bioacumuladoras (*Mimosa pudica* y *Nicotiana glauca*).
- El relleno técnico hasta la cota de cierre 696 m.s.n.m. a través del peinado de las plataformas

de relave (F.S.: 0.58) colocando el material a un mismo nivel con el objeto de proporcionar estabilidad a la presa de relaves.

- Se diseñó un canal de desvío de aguas pluviales para minimizar la acumulación de agua dentro de la relavera
- Generar una barrera perimétrica con reforestación para mitigar el impacto visual y paisajístico.
- El diseño de un parque con áreas recreativas para darle un uso turístico a la zona de la relavera y que constituya un beneficio para la comunidad del sector El Tablón.
- Implantar un sistema de monitoreo geotécnico para controlar las deformaciones en la presa, laderas y taludes de accesos viales.
- Ubicar perforaciones al pie de la presa con la instalación de piezómetros Casagrande con el fin de realizar un monitoreo periódico de la calidad del agua freática.

Referencias

1. Oldecop L, Linares R. Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial : causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Rev del Inst Investig la Fac Ing Geológica, Minera, Met y Geográfica* [Internet]. 2009;12:7–25. Available from: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/351>
2. Kieran P. Las presas de desechos de las mineras crecen en tamaño y en riesgos. *Wall Str J* [Internet]. 2016;10:5. Available from: <https://www.wsj.com/articles/las-represas-de-las-grandes-mineras-crecen-en-tamano-y-en-riesgos-1459790091>
3. de Carvalho DW. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: Analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law. *Rev Estud Const Hermeneut e Teor do Direito* [Internet]. 2020;12(2):227–38. Available from: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3659904
4. Costa BS. Acceso a la información digital en brasil en casos de accidentes: el ejemplo de la tragedia de Mariana. *Veredas do Direito, Belo Horiz* [Internet]. 2017;14:77–98. Available from: <https://doi.org/10.18623/rvd.v14i30.1126>
5. ICMM. Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera. *Glob Trailing* [Internet]. 2020;42. Available from: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
6. MINMINAS. Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros. Ministerio de Minas y Energía. 2005;12:42. Available from: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relave-minero.pdf>
7. Asanza AS. El Impacto de la Minería en el Distrito Minero Zaruma - Portovelo, y el Manejo de los Relaves Producidos en las Plantas de Beneficio, Ubicadas a lo Largo de los Ríos Calera y Amarillo de la Cuenca Binacional Puyango - Tumbes [Internet]. Universidad de Guayaquil; 2015. Available from: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/EC_9147f2ee97d90bafd372d404553dcd13
8. INIGEMM. Inspección Diagnóstica de la Relavera Comunitaria “El Tablón” Portovelo, Provincia de El Oro. Quito-Ecuador; 2015.
9. INIGEMM. Inspección Geotécnica en la Operación de la Relavera Comunitaria “El Tablón”

Portovelo, Provincia de El Oro. Quito-Ecuador; 2016.

10. INIGEMM. Estudios Complementarios para el Diseño de la Presa “El Tablón”, en el Distrito Minero Zaruma-Portovelo. Quito-Ecuador; 2013.
11. Guamán J. Estudio y Diseño de un Depósito de Relaves para el Almacenamiento de Relaves del Plan de Manejo de las Plantas de Beneficio en el Sector Minero Portovelo [Internet]. UTPL; 2009. Available from: <https://library.co/document/7qvk1rz5-estudio-diseno-deposito-relaves-almacenamiento-relaves-beneficio-portovelo.html>
12. Núñez J. Plan del cierre de relavera comunitaria “El Tablón”, ubicada en el sector El Tablón, cantón Portovelo, provincia del Oro [Internet]. Universidad Central del Ecuador; 2020. Available from: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22292>
13. Carrillo M, Linkimer L, Rodríguez Á, Zúñiga H. Clasificación geomecánica y análisis estabilidad de taludes del macizo rocoso coris, Cartago, Costa Rica. *Rev Geológica América Cent.* 2002;26:91–6.
14. Hoek E, Carranza-torres C. El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002 Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. RocScience Inc [Internet]. 2002;(March 2016):1–8. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/255644086>
15. MAE. Norma de la Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para suelos contaminados. Minist del Ambient del Ecuador Recur Suelo, Libr VI Anexo 2 [Internet]. 2020;341–70. Available from: <https://maeorellana.files.wordpress.com/2015/11/anexo-2-suelo.pdf>
16. IIGE. Diagnóstico del Estado Actual de la Estabilidad y Operación de la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), Portovelo; Provincia de El Oro. Quito-Ecuador; 2019.
17. Argudín MA, Hofer A, Butaye P. Heavy metal resistance in bacteria from animals. *Res Vet Sci* [Internet]. 2019;122:1–57. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.11.007>
18. Morais Vasconcelos P, Branco R, Romeu F. Chromium resistance strategies and toxicity : what makes *Ochrobactrum tritici* 5bv11 a strain highly resistant. *Biometals* (2011) [Internet]. 2011;24:401–10. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10534-011-9446-1>
19. Li R, Wu H, Ding J, Li N, Fu W, Gan L, et al. Transgenic merA and merB expression reduces mercury contamination in vegetables and grains grown in mercury-contaminated soil. *Plant Cell Rep.* 2020;39(10):1369–80.
20. Maurya PK, Malik DS, Yadav KK, Kumar A, Kumar S, Kamyab H. Bioaccumulation and potential sources of heavy metal contamination in fish species in River Ganga basin: Possible human health risks evaluation. *Toxicol Reports* [Internet]. 2019;6(January):472–81. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.05.012>
21. Nesler A, DalCorso G, Fasani E, Manara A, Di Sansebastiano G Pietro, Argese E, et al. Functional components of the bacterial CzcCBA efflux system reduce cadmium uptake and accumulation in transgenic tobacco plants. *N Biotechnol* [Internet]. 2017;35:54–61. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbt.2016.11.006>
22. Cobos I. Propuesta para la guía metodológica de operación, control y mantenimiento de la relavera comunitaria El Tablón, ubicada en el cantón Portovelo, Provincia de El Oro [Internet]. Universidad Central del Ecuador; 2021. Available from: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/23464/1/UCE-FIGEMPA-COBOS ISAAC.pdf>
23. Delgado-lópez AE, González-ramírez CA. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Trop Subtrop Agroecosystems* [Internet]. 2011;14(1870–0462):597–612. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
24. Falasca S, Ulberich A. La maleza *Nicotiana glauca* (Graham) como cultivo energético en sectores áridos y semiáridos de Argentina. *Zo Áridas* [Internet]. 1814;15(1):148–68. Available from: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/35364#:~:text=Está acimatada a climas áridos,insecticidas y apto para biodiesel.>
25. Molina Y. Reforestation as Environmental Strategy for the Conservation of rivers and streams. 2019;13:128–99. Available from: https://redib.org/Record/oai_articulo2507701-reforestation-environmental-strategy-conservation-rivers-streams
26. Beltrán-rodríguez LN, Larrahondo JM, Cobos D. Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for Colombian practice. *Bol ciencias la Tierra* [Internet]. 2018;44(1):5–20. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-36302018000200005&lng=en&nrn=iso&tlng=es

DESARROLLO DE ADOQUINES A PARTIR DE LOS RELAVES DE MINA.

Development of pavers from mine tailings.

Jácome Calderón Juan Francisco* , Burbano Morillo Danny Santiago , Núñez Romero Jorge Alberto .

Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Quito, Ecuador.

*juancho_jacome@hotmail.es

Resumen

El constante desarrollo minero ha generado una gran cantidad de pasivos ambientales, especialmente relaves mineros (residuos mineros), almacenados en relaveras, la mayoría de los cuales son abandonados después de su vida útil, sin mantener un control químico y físico, generando contaminación ambiental. El desarrollo de adoquines empleando los relaves de mina empieza con los análisis: físicos, mineralógicos y químicos de las arenas de relave, para determinar si el material es apto como agregado. Una vez analizado el relave, se realizó prototipos de adoquines usando diferentes dosificaciones reemplazando el polvo de piedra con el relave y así determinar las mejores características de resistencia física apegados a la normativa INEN 3040 e INEN 1488 1986. Se determinó que la dosificación adecuada como agregado de relave es reemplazando en un 70% al polvo de piedra en la fabricación de adoquines. Se concluye que mortero diseñado en base a arena de relave, cemento y agregados representa un ahorro al momento de gestionar estos residuos en relación a la construcción de nuevas relaveras. Se obtuvo una resistencia a la tracción de 3MPa, cuyo valor se encuentra ligado al alto contenido de cuarzo ($\pm 80\%$), propio de la paragénesis mineral del yacimiento.

Palabras clave: Relave, adoquín, resistencia, pasivo ambiental, drenaje ácido.

Abstract

The constant mining development has generated a large number of environmental liabilities, especially mine tailings (mining waste), stored in tailings, most of which are abandoned after their useful life, without maintaining chemical and physical control, generating environmental contamination. The development of pavers using mine tailings begins with physical, mineralogical and chemical analyses of the tailings sands to determine if the material is suitable as aggregate. Once the tailings were analyzed, prototypes of pavers were made using different dosages, replacing the stone powder with the tailings in order to determine the best physical resistance characteristics according to INEN 3040 and INEN 1488 1986 standards. It was determined that the adequate dosage as tailings aggregate is replacing 70% of the stone dust in the manufacture of pavers. It is concluded that mortar designed based on tailings sand, cement and aggregates represents a saving at the time of managing these wastes in relation to the construction of new tailings. A tensile strength of 3MPa was obtained, whose value is linked to the high quartz content ($\pm 80\%$), typical of the mineral paragenesis of the deposit.

Keywords: Tailings, paver, resistance, environmental liability, acid drainage.

Fecha de recepción: 05-04-2021

Fecha de aceptación: 08-11-2021

Fecha de publicación: 31-01-2022

I. INTRODUCCIÓN

La explotación minera en Sudamérica se ha realizado ya por los Incas desde el tiempo Pre-Colombino, pero los datos muestran que desde el

año 1556 se ha encontrado la primera contaminación causada por la explotación minera, principalmente por el uso de agua y el depósito de sus desechos (1). A partir del año 1800 la tecnificación del procesamiento de minerales en

el mundo causo que las partículas remanentes y relaves empezaron a ser acumulados en sectores convenientes para el sector minero de ese tiempo, principalmente en lugares cercanos a arroyos y ríos para que el agua arrastre el material (2). De esta manera para el año 1900 inició con el florecimiento de más distritos mineros se aumentó gradualmente la descarga descontrolada de relaves y la construcción de las primeras piscinas para almacenar relaves (3,4).

Entre los principales desafíos globales críticos que pueden poner en riesgo a las presentes y futuras generaciones, se encuentran: la degradación de ecosistemas, calentamiento global y agotamiento de recursos naturales (5,6). Es por ello que la gestión ambientalmente racional de los desechos, entre estos los relaves, siendo los residuos finos y agua resultantes de procesos de lixiviación y concentración de minerales debe ser considerada una de las principales preocupaciones para mantener la calidad del ambiente y de la vida humana en la actualidad (7).

Es por eso que la investigación de uso de los relaves como material para fabricar elementos de construcción, busca una solución al problema de la mayoría de empresas mineras del país, por la falta de espacios para depositar los residuos del procesamiento mineral (8).

Falta de Investigación sobre el uso o aprovechamiento de los relaves de la mina “Agro-Industrial El Corazón-Ecuador”, a partir de ensayos de laboratorio, limitan la toma de decisiones sobre su utilización en varios sectores de la industria como por ejemplo en la construcción y obras civiles (9). Además, la generación diaria de relaves producto del procesamiento mineral, deriva en una constante búsqueda de soluciones óptimas para la gestión y almacenamiento de estos residuos.

Al buscar nuevas alternativas para los relaves, que no sea su confinamiento y abandono, la minería obliga a tomar decisiones que sean amigables en el entorno socio-ambiental desde la extracción mineral hasta la recuperación del metal valioso (10), de esta manera el beneficio iría más allá de la rentabilidad económica para la empresa

y se llegaría a un apoyo social con nuevas ideas y estrategias enfocadas a la gestión de los residuos mineros (11).

De esta forma, en base a una caracterización física, química y mineralógica de los relaves de mina se promueve la investigación y estudio de la factibilidad de usar estos desechos mineros como agregados en la fabricación de adoquines y así buscar una solución a la falta de áreas para la construcción de nuevas relaveras (12). Un factor determinante que condiciona el aprovechamiento de los relaves en la fabricación de los adoquines, es la resistencia física, donde la dosificación adecuada permite obtener un producto acorde a la normativa ecuatoriana INEN 3040 2016 (13, 14). La fase de experimentación incluye 48 muestras de relaves (proceso de cianuración) obtenidos de la empresa Agroindustrial El Corazón, mina que se ubica al Nor-Occidente de la ciudad de Quito-Ecuador (Figura 1); de las cuales se obtuvo 60 adoquines divididos en 3 tipos de dosificaciones, que fueron ensayados hasta obtener el adoquín que cumple con los lineamientos de la normativa INEN 3040 e INEN 1488 1986 (15).

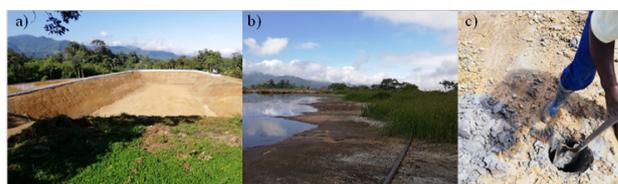


Figura 1. a) Vista panorámica de la construcción de las relaveras en Agroindustrial El Corazón b) Estado actual de la relavera #9 c) Malla de muestreo de Relaves.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de investigación se basa en el análisis de las características físicos-químicas y mineralógicas de la materia prima (relaves) y del producto resultante (adoquines).

En la Figura 2 se detalla el proceso metodológico iniciando por; topografía de la relavera, insumo que permite el cálculo de volumen, malla de muestreo, técnica empleada para obtener las arenas de relave las cuales pasaron por un tratamiento de homogeneización y cuarteo hasta obtener muestras selectivas que posteriormente pasaron por un análisis de laboratorio determinando así: la granulometría, peso específico, hu-

medad, Test ABA y difracción de rayos X.

El Test ABA es de mucha importancia en el ámbito minero debido que el resultado de los mismos es una predicción sobre la posibilidad de que genere drenaje ácido una roca o una mina, a partir de resultados de laboratorio que determina el porcentaje de contenido de sulfatos o sulfuros; permitiendo planificar el control ambiental en la industria minera (16, 17). El ensayo básicamente consiste en la posibilidad de generar drenaje ácido del material en relación a la posibilidad del mismo material de neutralizar el posible drenaje ácido.

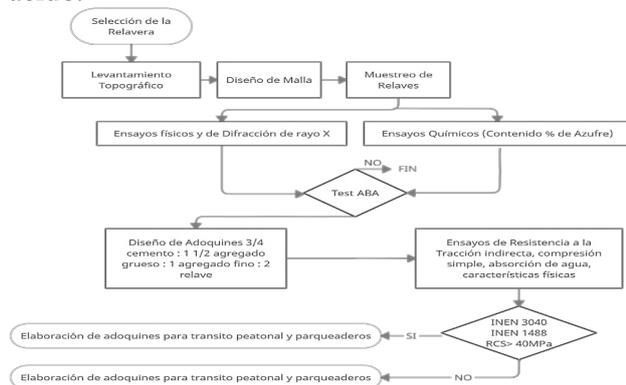


Figura 2. Flujo grama de muestreo y Ensayos a relaves

Los resultados favorables obtenidos de laboratorio en relación a sus propiedades físico (granulometría) y químicas (menor presencia de sulfuros) permitieron tomar decisiones para el empleo de los relaves en la fabricación de adoquines tipo centauro.

Los adoquines para cumplir la resistencia requerida fueron fabricados en base a una dosificación calculada de la mezcla de cemento, agua, agregado grueso y agregado fino (polvo de piedra). La relación de agregados que intervienen en la fabricación del adoquín se condiciona al uso de agregado fino o polvo de piedra con las siguientes 3 variaciones: reemplazando en un 30%, un 50% y un 70% de la cantidad agregado fino por relave. La dosificación que presente mejores propiedades físicas será la utilizada para la fabricación del producto en base a la normativa INEN 3040 del año 2016.

En la tabla 1 se especifica la dosificación en volumen utilizada en la fabricación de los diferentes prototipos.

	Mezcla 1 (relave 30%)	Mezcla 2 (relave 50%)	Mezcla 3 (relave 70%)
Cemento	¾	¾	¾
Agregado grueso	1 ½	1 ½	1 ½
Agregado fino	2	1 ½	1
Relave	1	1 ½	2

Tabla 1. Dosificación utilizada en los diferentes prototipos.

Los adoquines tipo centauro fabricados bajo las relaciones anteriormente citadas cumplieron con los ensayos enmarcados en la normativa INEN 3040 2016; que incluye ensayos de tracción indirecta, absorción total de agua (permeabilidad) y características físicas.

Por otro lado, Yugsi, (18) menciona que, a partir de los resultados de la tracción indirecta medida en los adoquines, se puede obtener la resistencia a la compresión mediante la ecuación de Adam M. Nevill (1).

$$f_c = (f_t / 0.3)^{3/2} \quad (1)$$

Donde:

f_t = Resistencia a la tracción indirecta.

f_c = Resistencia a la compresión simple.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del Relave

En la tabla 2 se detalla promedio de ensayos de laboratorio; mineralógico, granulométrico e índices, obtenidos de un total de 48 muestras de relave tomados dentro de una configuración de una malla de 5m x 5m, alcanzando una profundidad promedio de 1.5m.

Descripción		Cantidad	Medida
MINERALOGÍA	Cuarzo	78.8	%
	Caolinita	10.6	%
	Plagioclasas	4.2	%
	Moscovita	3.8	%
	Hematita	1.6	%
	Anatasa	1	%
Peso Específico		2.6	g/cm3
GRANULOMETRÍA	Arena Fina	41.6	%
	Limo - Arcilla	58.4	%
Humedad		18.82	%

Tabla 2. Resumen de propiedades mineralógicas y físicas.

Test ABA

Las muestras representativas de los relaves fueron enviadas al Laboratorio GRUNTEC de don-

de los resultados se reflejan en la tabla 3.

Especies de Azufre	
Azufre total en Sulfato %	0.13
Potencial de Neutralización por Carbonato kgCaCO ₃ /t	4.7

Tabla 3. Resultados TEST ABA
Fuente: GRUENTEC, 2019

Aplicando la ecuación (2) para determinar la posible generación de drenaje ácido por parte de los relaves y por ende de los productos que se espera obtener (19). Los resultados son los siguientes:

$$31.25 \times S\% = APP \quad (2)$$

$$31.25 \times 0.13 = 4.063$$

Dando como resultado los siguientes datos.

APP (acid production potential) = 4.063

NP (neutralization potential) = 4.7

A partir de los resultados obtenidos de APP y NP, se calcula dos medidas del TEST ABA los cuales son PNN y la relación N/APP (3, 4).

$$PNN = NP - APP \quad (3)$$

$$PNN = 4.7 - 4.063$$

$$PNN = 0.64$$

$$NP/APP = 4.7/4.063 = 1.16 \quad (4)$$

Los valores obtenidos se interpretan con la tabla 4 del Test ABA.

PNN	PN/PA	INTERPRETACIÓN
>20	>3	Bajo o Nulo potencial de Generación de ácido
<20	1 a 3	*Potencial Marginal de generación de ácido
Negativo	<1	Alto Potencial de generación de ácido
-20 y 20	Interpretación dificultosa	Bajo riesgo de formar drenaje ácido
	Entre 1 y 3	Zona de incertidumbre

Tabla 4. Interpretación TEST ABA

Nota: (*) resultado de Test ABA

Fuente: U.S Environmental Protection Agency, 1994.

El porcentaje de minerales presentes en el relave se determinó mediante en el ensayo de difracción de Rayos X, donde se observa que el cuarzo y la caolinita predominan en el material, evidenciando la alteración argílica insipiente del yacimiento (20, 21, 22), esto crea la posibilidad de utilización del relave al no generar un drenaje ácido, sumado a la poca o nula presencia de óxidos, sulfuros y sulfatos (23).

Sumado a lo anteriormente expuesto, el Test

ABA dio como resultado un “potencial marginal” de generar drenaje ácido por parte de los relaves, proporcionando una mayor seguridad en la toma de la decisión para el uso de los relaves que fueron estudiados. Con este resultado se presume que al aumentar más carbonato al relave (cemento) permite una efectiva inertización de las arenas de relave, en consecuencia, el adoquín diseñado no provocará un pasivo ambiental (24). En base a los resultados químicos favorables del uso de relaves, se procedió a elaborar 3 prototipos de adoquines con diferentes dosificaciones (cemento + agregado grueso + agregado fino + relave) donde la resistencia a la tracción indirecta es el parámetro guía para la selección de la opción más adecuada (25).

En la tabla 5 se indica las principales características físicas de los 3 diferentes prototipos de adoquines, es importante mencionar que el número de ensayos dependió de los requeridos por la normativa actual INEN 3040 (2016).

Prototipo	% de Relave	Tipo de Ensayo	Valor	Unidad
1	Adoquín con un 70% en reemplazo de agregado fino	Tracción Indirecta	3	MPa
		Resistencia a Compresión	31.62	MPa
		Absorción Total de Agua	8.83	%
2	Adoquín con un 50% en reemplazo de agregado fino	Tracción Indirecta	2.4	MPa
		Resistencia a Compresión	22.62	MPa
		Absorción Total de Agua	8.6	%
3	Adoquín con un 30% en reemplazo de agregado fino	Tracción Indirecta	2.7	MPa
		Resistencia a Compresión	27	MPa
		Absorción Total de Agua	7.83	%

Tabla 5. Resultados de características mecánicas para diferentes dosificaciones de relave en reemplazo al agregado fino (polvo de piedra).

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva EPN, 2019.

Los resultados de tracción indirecta ejecutados en los adoquines fabricados con un 70% de relave en reemplazo del agregado fino, presentan una resistencia a la tracción de 3MPa y una resistencia a la compresión 31.62MPa. Si bien este resultado no cumple con el valor mínimo promedio de resistencia a la tracción (3.6 MPa) que exige la normativa INEN 3040, el resultado de resistencia a compresión simple (31.62 MPa) sobrepasa el valor requerido dentro de los establecido en los lineamientos de la normativa INEN 1488, la cual menciona que los adoquines elaborados para el

uso de vías de tráfico peatonal y para estacionamientos deben cumplir el requerimiento de resistencia a la compresión de 20MPa y 30MPa respectivamente medidos a los 28 días.

Con lo expuesto en los acápites anteriores, en base a los resultados químicos, físicos y mineralógicos, resulta factible el uso de los relaves en la fabricación de adoquines para ser usados en beneficio de la comunidad o de las instalaciones del campamento de la empresa. Por otro lado, para lograr satisfactoriamente la fabricación de los adoquines se planea la siguiente metodología (Figura 3):

1. Secado de piscina de relaves.
2. Extracción y transporte del relave hacia el lugar de acopio.
3. Secado natural del relave para eliminar exceso de humedad.
4. Dosificación de los agregados en la mezcladora.
5. Vibro-prensado de adoquines.
6. Secado al aire libre por 28 días de los adoquines.



Figura 3. a) Secado natural del relave, b) Dosificación en la mezcladora, c) Vibro-prensado en moldes personalizados de adoquines, d) Secado al aire libre de los adoquines.

Uno de los objetivos de la empresa para el empleo de los relaves como agregado en la fabricación de adoquines, es usar estos elementos de apoyo en la mejora de las vías que son parte del campamento. Finalmente, en la Figura 4 se muestra la aplicación de los adoquines en la mejora en la red vial de tránsito peatonal en el interior del predio donde se desarrolla la mina. El área a intervenir con el uso de adoquines de relave es de 3 311 m², lo que equivale al evacuar una piscina de las 15 existentes en la empresa minera. En las siguientes figuras se observa la mejora que tendrían las vías.



Figura 4. Vista panorámica de la mejora de las vías peatonales, sector del comedor. a) vía lastrada, b) vía con la implementación de adoquines de relave.

IV. CONCLUSIONES

El uso de arenas de relave para la fabricación de adoquines fue factible en relación al cumplimiento de la norma INEN 3040 obteniendo como resultado una resistencia a la tracción indirecta de hasta 3MPa, los prototipos pueden ser utilizados en zonas de tránsito peatonal y en zonas de estacionamiento. La dosificación para conformar a mezcla fue de $\frac{3}{4}$: $1 \frac{1}{2}$: 1 : 2 (cemento, agregado grueso, agregado fino, relave).

Mineralógicamente, el cuarzo es el mineral que predomina en los relaves, se presenta en porcentajes mayores al 75% en todas las muestras y en base a los resultados de los adoquines prototipos, la presencia de este mineral ayudó a mejorar las propiedades físico mecánicas de los adoquines. Los relaves no muestran un potencial alto para generar drenaje ácido según los ensayos ABA (Acid-Base Accounting) realizados, por lo que no fue necesario un procedimiento adicional para eliminar elementos que pudieran causar un pasivo ambiental.

El aprovechamiento de los relaves con su uso en la fabricación de adoquines resulta factible en el ámbito económico, la fabricación de un adoquín alcanza un costo de USD 0.32. Como dato referencial la empresa al aprovechar el relave en la fabricación de adoquines ahorraría un aproximado de USD 95 000 por la construcción de una relavera. En el contexto social la empresa generaría plazas de trabajo además de mitigar el pasivo ambiental por la generación de drenaje ácido (9). Desde el punto de vista técnico evitaría el invertir en estudios de prefactibilidad, factibilidad, construcción, cierre y monitoreo de las relaveras, con la puesta en marcha de un proyecto usando la metodología planteada en la investigación se llegaría a una gestión óptima de los residuos mineros.

Referencias

1. Pérez J. La minería colonial americana bajo la dominación española [Internet]. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Madrid; 2006. Available from: <https://mdc.ulpgc.es/cgi-bin/showfile.exe?CISO-ROOT=/bolmc&CISOPTR=130&filename=131.pdf>
2. Terram. La Minería y su Pasivo Ambiental. Análisis de Políticas Públicas [Internet]. 2003;24(12):1-16. Available from: https://www.terram.cl/descargar/recursos_naturales/mineria/app_analisis_de_politicas_publicas/APP-24-La-mineria-y-su-pasivo-ambiental.pdf
3. Dore E. Alternativas Latinoamericanas: Una interpretación socio-ecológica de la Historia minera Latinoamericana. *Ecol política*. 1994;79(7):49-68.
4. MINMINAS. Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros. Ministerio de Minas y Energía. 2005;12:42. Available from: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relave-minero.pdf>
5. González Sánchez Y, Fernández Díaz Y, Gutiérrez Soto T. El cambio climático y sus efectos en la salud. *Rev Cubana Hig Epidemiol* [Internet]. 2013;51(3):331-7. Available from: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf?sequence=1
6. Vilela W, Espinsza M, Bravo A. La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Rev Int Adm* [Internet]. 2020;8(8):215-33. Available from: <file:///C:/Users/Pc/Downloads/2437-Artículo-7410-1-10-20201130.pdf>
7. Soto R. Reaprovechamiento de relaves. *Petroenergía* [Internet]. 2019;07:1-32. Available from: <https://www.petroenergia.info/revista-online-julio-2020>
8. Romero AA, Medina R, Puente L, Flores SL, Guadalupe E, De E, et al. Los residuos sólidos mineros del proceso de flotación de minerales en la cuenca del río Santa - Áncash. *Rev del Inst Investig la Fac minas, Metal y ciencias geográficas*. 2008;11(21):14-8.
9. Calderón JF. Desarrollo de adoquines, a partir de relaves de mina de la empresa minera "Agro-Industrial el Corazón" [Internet]. Universidad Central del Ecuador; 2020. Available from: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21255>
10. INAPI. Recuperación de metales valiosos desde residuos mineros [Internet]. Chile; 2021. Available from: https://www.inapi.cl/docs/default-source/2021/centro-de-documentacion/informes/informe-tecnologías-de-dominio-público/informe_dp_122.pdf?sfvrsn=e6ee5a40_0
11. Beltrán-rodríguez LN, Larrahondo JM, Cobos D. Emerging technologies for tailings disposal : opportunities for Colombian practice. *Bol ciencias la Tierra* [Internet]. 2018;44:5-20.
12. Silvana F, Romero A. Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Ind Data* [Internet]. 2010;13(1):75-82. Available from: <redalyc.org/pdf/816/81619984010.pdf>
13. Viveros MC. Aprovechamiento de relaves como agregados para la fabricación de adoquines - caso de estudio de relaves procedentes de la Planta de beneficio Campanillas. Quito-Ecuador; 2020.
14. Servicio Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 3040: Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo, Quito-Ecuador. 2016;45.
15. Servicio Ecuatoriano de Normalización. NTE INEN 1488: Adoquines. Requisitos, Quito -Ecuador. 1986;4.
16. Aduviri O. Técnicas De Prevención Y Control De La Generación Ácida En Minería. *Medio Ambiente y Minería* [Internet]. 2018;4(4):24-31. Available from: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522018000100003
17. White W, Lapakko K, Cox R. Static-test methods most commonly used to predict acid mine drainage: Practical Guidelines for Use and Interpretation. *Environ Geochemistry Miner Depos Part A Theory Backgr*. 2016;7A(June):325-38.
18. Yugsi A. Análisis de las propiedades mecánicas de adoquines elaborados con hormigón y polvillo de caucho de neumáticos reciclados y su correlación con adoquines convencionales [Internet]. Universidad Central del Ecuador; 2018.
19. Agency U. EP. Acid Mine Drainage Prediction [Internet]. 1994. p. 52. Available from: <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/amd.pdf>
20. Carles J, Joaquín A, De B, Geológica S, Melgarejo JC, Proenza JA, et al. Técnicas de caracteri-

- zación mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Bol Soc Geológica Mex [Internet]. 2010;62:1–23. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/943/94315961002.pdf>
21. Huaman FE, Urbano G, Flores L. Caracterización preliminar de residuos de minería aluvial en la región Madre de Dios – Perú. Rev Cuba Química. 2020;32(2):1–13.
 22. Cecioni AJ, Dick LA. Geología del yacimiento epitermal de oro y plata can can, franja de maricunga, precordillera de copiapo, Chile. Rev Geológica Chile [Internet]. 1992;19(1):3–17. Available from: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/RGC19-3.pdf>
 23. Romero AA, Flores SL, Medina R. Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. Rev del Inst Investig FIGMMG. 2008;11(11):13–6.
 24. Morillo B, Santiago D, Privado I, Privado I. Análisis tenso deformacional de las obras de remediación implementadas para estabilizar la subsidencia minera bajo la Escuela La Inmaculada, Zaruma-Ecuador. FIGEMPA Investig y Desarro [Internet]. 2021;12:1–14. Available from: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/3054/4262>
 25. Torres H, Patricio D, Cuasapaz G. La resistencia a la compresión y el desgaste en adoquines de concreto. Rev Arbitr Venez del Núcleo LUZ- Costa Orient del Lago. 2021;16(12):481–506.





Perfiles



esPOCH