

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

FIGMMA

JULIO 2021 | N.º 1 | vol. 11



AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

RECTOR Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, Ph. D.

VICERRECTOR ACADÉMICO Y DE POSGRADO Dra. María Augusta Espín, Ph. D.

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, DOCTORADOS E INNOVACIÓN Dra. María Mercedes Gavilánez, Ph. D.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO Econ. Marco Posso Zumárraga

SECRETARIA GENERAL Dra. Paulina Armendáriz de Estrella

PROCURADOR Dr. Ramiro Acosta Cerón

Edición general | Gustavo Pazmiño

Diseño y diagramación | Christian Echeverría

Edición de textos | Marcelo Acuña

Portada | Marco González

IMPRESIÓN | Editorial Universitaria

Año 2021, VOL. 11, N.º 1

Frecuencia: semestral

ISSN-i 1390-7042

ISSN-e 2602-8484

Año de inicio: 2000

Idioma: español

revista.figempa@uce.edu.ec

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG>

Ciudadela Universitaria, calle Jerónimo Leyton y Gatto Sobral

+593 2 2550 588 / 2566-226 ext. 118 / +593 9 98776225

REVISTA CIENTÍFICA INDEXADA EN LATINDEX

La revista FIGEMPA Investigación y Desarrollo está destinada a la difusión de resultados de investigaciones y estudios técnicos realizados por profesores, profesionales y estudiantes de grado y posgrado de las universidades y expertos nacionales e internacionales en áreas vinculadas a Ciencias de la Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales, Energía, Geología, Ingeniería Minera, Ingeniería Petrolera, Tecnología, Ciencias de la Tierra, Investigación, Seguridad y al Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales No Renovables. Es un espacio interdisciplinario de discusión tanto en aspectos teóricos como de aplicación en las áreas indicadas. Los criterios vertidos en los artículos son de estricta responsabilidad de sus autores. El pensamiento de la revista se expresa en el editorial.



Los contenidos pueden usarse libremente, sin fines comerciales y siempre y cuando se cite la fuente. Si se hacen cambios de cualquier tipo, debe guardarse el espíritu de libre acceso al contenido.

EN LA PORTADA

CLOUD CATCHER, Scotland, 2012

Mirrored stainless Steel

[<https://n9.cl/o4g7o>]

Julio del 2021, una época de pandemia y del espejismo de la vuelta a la «normalidad», si bien el progreso científico nos permite tener esperanza, esto tiene un reverso, y es que se produce el espejismo imperiosamente. Que esto cambiaría en poco tiempo, no iba a ser así y no lo será. Nos toca, como civilización, renacer, renovar, ser resilientes, resucitar a una «nueva vida» que sale del desastre, mantener la fe y la esperanza en medio de un baile con la incertidumbre que genera la pandemia, el confinamiento, estados de alerta y de excepción, se relajan las medidas y las endurecen, se aprueban vacunas de las que no sabemos su eficacia, podremos viajar, juntarnos con los abuelos o los padres, volver con los amigos, el colapso sanitario y la muerte de conocidos, de familiares o desconocidos, nada cambiará tan pronto, debemos hacernos a la idea que esto en el mejor de los casos durará algunos años.

Habrá oasis de días en los que el trabajo presencial será seguro y fingiremos que tomar transporte público no da miedo. Ahora hay vacunas y mascarillas homologadas. Un año y meses después las cifras son terribles, se ha normalizado el horror y la muerte. El coronavirus sigue circulando por el mundo. El progreso científico nos ha permitido tener esperanza. Hay quien lleva un año haciendo planes para cuando vuelva la normalidad, como si ésta estuviese ahí al lado, como si fuese verdad que se puede volver atrás, sin secuelas, como si esto solo fuese una mala noche; lo que ha provocado hastío, fatiga e inquietud. La ciencia y la fe nos ha permitido ser lo suficientemente optimistas; debemos tener una espiritualidad en la que debemos llorar, no reprimir lo que sentimos, atrevernos a decirlo, es un gran coraje que alimenta el alma y no quedarnos en esa superficie donde todo es una caricatura, cristal, light; desenmascaremos nuestras mentiras y ayudémonos a andar en verdad, seamos responsables de nuestro futuro sin señalar a otros. Vivamos esta pandemia, no te escondas, atraviesa con amor esta oscuridad, debemos vivir los problemas, no solo resolverlos, no pretendas pasar la página y decir todo ya pasó. Belleza y bondad veo en nosotros; también egoísmo y vanidad, pero eso no es todo, veo algo más difícil de gobernar que el bien y el mal y es la paradoja y la contradicción de que somos un alma poliédrica en la que vivimos acelerada o lentamente y no pactemos, la contradicción es el criterio de lo real.

Resurrexit, sicut dixit, Alleluia!

CUERPO EDITORIAL

CONSEJO EDITORIAL

Gustavo Pinto Arteaga Director-Editor General	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental-UCE- Ecuador grpinto@uce.edu.ec
José Anderez Álvarez Asesor Científico	Universidad de los Andes-Venezuela anderezalvarez@gmail.com
Félix Andueza Leal Asesor científico	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petró- leos y Ambiental-UCE-Ecuador fdandueza@uce.edu.ec
Neil Banerjee Asesor Minas	Western University-Canadá neil.banerjee@uwo.ca
Carolina Bernal Carrera Coordinadora Minas	Escuela Politécnica Nacional-Ecuador isabel.bernal@epn.edu.ec
Susana Cadena Vela Asesora Tecnológica	Facultad de Ciencias Administrativas-UCE- Ecuador scadena@uce.edu.ec
Luz María Castañeda de León Asesora Tecnológica	Universidad Nacional Autónoma de México-México luzcast@unam.mx
Ernesto De la Torre Chauvín Coordinador Procesos	Escuela Politécnica Nacional-Ecuador ernesto.delatorre@epn.edu.ec
Juan José Del Valle Asesor científico	J3M Global-España jjdelvalle@j3mglobal.com
Arturo Egüez Delgado Coordinador Geología	Escuela Politécnica Nacional-Ecuador arturo.eguez@epn.edu.ec
Octavio Islas Asesor científico	Tecnológico de Monterrey-México joseoctavio.islas@gmail.com
Gerardo Medina Ramírez Asesor científico	Universidad de los Andes-Venezuela medinag47@gmail.com
Alicia Ramírez Orellana Economista en Energía	Universidad de Almería-España aramirez@ual.es
Viviana Sánchez Torres Asesora científica	Universidad Industrial de Santander-Colombia visantor@uis.edu.co
Ovadia Shoham Asesor en Hidrocarburos	Universidad de Tulsa-USA ovadia-shoham@utulsa.edu

Juan Solano Mora Consultor independiente-Ecuador
Secretario de redacción solmor37@hotmail.com
Francisco Viteri Santamaría Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petró-
leos y Ambiental-UCE-Ecuador
Editor asociado frviteri@uce.edu.ec
Johnny Zambrano Escuela Politécnica Nacional-Ecuador
Coordinador Hidrocarburos johnny.zambrano@epn.edu.ec

COMITÉ DE ÉTICA

Gustavo Pinto Arteaga Facultad de Ingeniería en Geología, Minas,
Petróleos y Ambiental-UCE
grpinto@uce.edu.ec
Marco González Escudero Facultad de Ingeniería en Geología, Minas,
Petróleos y Ambiental-UCE
magonzaleze@uce.edu.ec
Jorge Ortiz Herrera Facultad de Ingeniería en Geología, Minas,
Petróleos y Ambiental-UCE
jdortiz@uce.edu.ec
Susana Cadena Vela Facultad de Ciencias Administrativas-UCE
scadena@uce.edu.ec
Xavier Lastra Bravo Facultad de Ciencias Agrícolas-UCE
xblastra@uce.edu.ec

COMITÉ EDITOR

Marco González Escudero Facultad de Ingeniería en Geología, Minas,
Petróleos y Ambiental-UCE
magonzaleze@uce.edu.ec
Christian Ortiz Villarreal Consultor independiente
khryss2406@gmail.com
Gabriel Armas Arroba Facultad de Ingeniería en Geología, Minas,
Petróleos y Ambiental-UCE
ggarmas@uce.edu.ec

COMITÉ CIENTÍFICO

Ernesto De La Torre Escuela Politécnica Nacional
ernesto.delatorre@epn.edu.ec
Johnny Zambrano Escuela Politécnica Nacional
johnny.zambrano@epn.edu.ec

Carolina Bernal Carrera	Escuela Politécnica Nacional isabel.bernal@epn.edu.ec
Boroshily Castro Merizalde	Universidad Central del Ecuador gbcastro@uce.edu.ec
Fernando Novillo Logroño	Universidad Central del Ecuador fnovillo@uce.edu.ec
Alberto Castillo	Consultor independiente ajcastillo@uce.edu.ec
Ovadia Shoham	Tulsa University ovadia-shoham@utulsa.edu
Félix Andueza Leal	Universidad Central del Ecuador fdandueza@uce.edu.ec
Jorge Ortiz Herrera	Universidad Central del Ecuador jdortiz@uce.edu.ec

COMITÉ INTERNACIONAL

José Anderez Álvarez	Universidad de los Andes-Venezuela anderezalvarez@gmail.com
Neil Banerjee	Western University-Canadá neil.banerjee@uwo.ca
Luz María Castañeda de León	Universidad Nacional Autónoma de México-México luzcast@unam.mx
Juan José Del Valle	J3M Global-España jjdelvalle@j3mglobal.com
Octavio Islas	Tecnológico de Monterrey-México joseoctavio.islas@gmail.com
Gerardo Medina Ramírez	Universidad de los Andes-Venezuela medinag47@gmail.com
Viviana Sánchez Torres	Universidad Industrial de Santander-Colombia visantor@uis.edu.co
Ovadia Shoham	Universidad de Tulsa-USA ovadia-shoham@utulsa.edu

EVALUADORES PARES INTERNOS

Galo Albán Soria	gfalban@uce.edu.ec
Félix Andueza Leal	fdandueza@uce.edu.ec

Susana Arciniegas Ortega srarciniegas@uce.edu.ec
Jhon Bolaños Moreano jebolanosm@uce.edu.ec
Danny Burbano Morillo dsburbano@uce.edu.ec
Jorge Bustillos Arequipa jebustillos@uce.edu.ec
David Carrera Villacrés dvcarrera@uce.edu.ec
César Chávez Orozco cachavezo@uce.edu.ec
Bolívar Enríquez Vallejo bgenriquez@uce.edu.ec
Diana Fabara Salazar dkfabara@uce.edu.ec
Marco González Escudero magonzaleze@uce.edu.ec
Ramiro Guerrón Varela erguerron@uce.edu.ec
Sergio Lira González salira@uce.edu.ec
Marcelo Llerena Carrera gmllerenac@uce.edu.ec
Darío Lozada Fiallos ddlozada@uce.edu.ec
Fernando Lucero Calvache falucero@uce.edu.ec
Carlos Ordoñez Campain cordonez@uce.edu.ec
Gustavo Pinto Arteaga grpinto@uce.edu.ec
Marlon Ponce Zambrano mrponce@uce.edu.ec
Gorky Ruiz Paspuel agruizp@uce.edu.ec
Richard Torres Villacís rhtorres@uce.edu.ec
Luis Villacís Buenaño lfwillacis@uce.edu.ec
Francisco Viteri Santamaría frviteri@uce.edu.ec
Daniel Philco Carrión dephilco@uce.edu.ec
Fernando Novillo Logroño fnovillo@uce.edu.ec
Marco Rosero Espín mvrosero@uce.edu.ec
Jaime Gutiérrez Padilla jhgutierrez@uce.edu.ec
Boroshilov Castro Merizalde gbcastro@uce.edu.ec
Pedro Almagro Blanco palmagro@uce.edu.ec
Roberth Enríquez Reyes renriquez@uce.edu.ec
Moisés Logroño Galárraga rlogrono@uce.edu.ec
Jorge Viteri Moya jrviteri@uce.edu.ec
Carlos Ortega Tejada caortega@uce.edu.ec
Maggy Díaz Altamirano madiaz@uce.edu.ec
Xavier Lastra Bravo xblastra@uce.edu.ec
Antonio Rea Toapanta arrea@uce.edu.ec

Jenny Martínez Benítez jemartinez@uce.edu.ec
Elvia Victoria Cabrera evcabreram@uce.edu.ec
Edward Jiménez Calderón ehjimenez@uce.edu.ec
Andrés Cevallos Serrano lacevalloss@uce.edu.ec
Danilo García Cáceres dvgarciac@uce.edu.ec

EVALUADORES PARES EXTERNOS

Antonio García Amate Universidad de Almería-España
aga237@inlumine.ual.es

Jorge Erazo B. Consultor
jorgeerazob@yahoo.com

Johnny Zambrano Escuela Politécnica Nacional-Ecuador
johnny.zambrano@epn.edu.ec

Carolina Bernal Escuela Politécnica Nacional-Ecuador
isabel.bernal@epn.edu.ec

Luis Mejía Vallejo Consultor
luismejiavallejo@gmail.com

Christian Vallejo Consultor
cristian.vallejo@geostrats.com

Ernesto de la Torre Escuela Politécnica Nacional
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Pablo Djabayan Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH
pdjabayan@gmail.com

Gerardo Medina Universidad de los Andes-Venezuela
medinag47@gmail.com

Fabián Rodríguez Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE
ffrodriguez3@espe.edu.ec

Lucía Jiménez Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE
lejimenez@espe.edu.ec

Sabino Menolasina Universidad de los Andes-Venezuela
menolasina1960@gmail.com

Edwin León INIGEMM
edwin.leon@geoinvestigacion.gob.ec

Bernardo Brito	Consultor bernardo.brito@geostrats.com
Ana Gabriela Haro	Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE agharo@espe.edu.ec
Pablo Caiza Sánchez	Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE pecaiza1@espe.edu.ec
Diego Jaya	Consultor independiente dyajafierro@hotmail.com
José Rodas Cabrera	Petroamazonas jrodasster@gmail.com
Fernando Reyes Cisneros	Consultor rrramirofer9@gmail.com
Alberto Castillo Alejandro	Consultor ajcastillo@uce.edu.ec

VALORES Y PRINCIPIOS

HUMILDAD

Cualidad de la persona que reconoce la igualdad entre los seres humanos. Es una actitud relacionada con la virtud de la modestia. De allí que ser humilde no implica dejarse humillar, pues no supone una renuncia a la dignidad propia como personas. [Fuente: <https://n9.cl/0hehg>]

PERSEVERANCIA

Valor humano fundamental que permite al individuo continuar, no rendirse a pesar de dificultades, obstáculos, frustración, desánimo, aburrimiento que se presenten. La perseverancia ayuda o aumenta la probabilidad de alcanzar metas difíciles y a apreciar más los logros obtenidos. [Fuente: <https://n9.cl/jtzyu>]

AMABILIDAD

Valor social que se funda en el respeto y afecto en nuestra forma de relacionarnos, esencial para la convivencia en sociedad. La armonía de nuestro entorno social en gran medida viene determinada por el nivel de amabilidad sobre el cual hayamos fundado esas relaciones. [Fuente: <https://n9.cl/dx249>]

ADAPTACIÓN

Capacidad de superación personal y flexibilidad mental para asumir las circunstancias de la vida. Es una capacidad que se adquiere a través de la práctica del propio vivir, es un proceso de reacomodación o ajuste de las personas a otro entorno al cual no están acostumbrados. La adaptación social significa los cambios que deben operarse en una persona originados en las distintas circunstancias que se modifican en su entorno y las exigencias que ese medio le impone. [Fuente: <https://n9.cl/x8q7a>]

MENSAJE**HACIA LA PUBLICACIÓN CIENTÍFICA**

En la historia de la universidad se puede evidenciar la importancia de la escritura como actividad habitual del quehacer de la educación superior, como espacio generador de conocimiento que se trasmite o se difunde a través de textos que se producen en diferentes formatos como libro, artículo de difusión, artículo científico, entre otros. Éstos evidencian el trabajo realizado como parte del proceso de formación profesional y de posgrado, pero sobre todo por la investigación que se realiza en estos espacios. En efecto, esta búsqueda continua de nuevas fronteras de conocimiento impulsado por el deseo del ser humano del conocimiento de denomina investigación.

La redacción científica es un instrumento de difusión del conocimiento desarrollada por interrelación humana en procesos sistematizados y documentados en torno a buscar soluciones a problemas que afectan a la sociedad y que transitan desde la apropiación de lo conocido hacia la experimentación y generación de nuevo conocimiento. Este proceso característico de la educación superior muchas veces ha sido descuidado, existen datos que evidencian que en el Ecuador hay un bajo número de publicaciones en relación con el crecimiento de la población universitaria. La normativa creada y modificada para el efecto ha tratado de forzar esta actividad natural del quehacer universitario, ocasionando muchas veces solamente el escribir con el fin de publicar, no publicar el resultado de un proceso consiente de investigación y de generación de conocimiento.

El reto de publicar ciencia en un mundo cada vez más digital tiene varias aristas; para ello, la UNESCO, en su publicación Recomendaciones para una ciencia abierta, recomienda reflexiona sobre: 1. la necesidad de abordar nuevo desafíos que afectan a la sociedad como el cambio climático, la salud, la equidad y otros de similar interés; 2. el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación como requisito para generar soluciones que satisfagan al ser humano y de esa forma aprovechar las oportunidades que brinda el conocimiento; y 3. el potencial que representa la expansión de las tecnologías de la información, las comunicaciones y la interconexión mundial, para acelerar el progreso de la humanidad, reducir la brecha digital y crear las sociedades del conocimiento.

La revista FIGEMPA invita a una reflexión acerca de los procesos de investigación y la publicación científica, que en un mundo digital nos ha obligado a ser resilientes en un entorno de pandemia. El investigador requiere generar información verificable, de calidad en una era donde las noticias falsas inundan las redes, la academia es la llamada a brindar ese espacio seguro de acceso a una información confiable para la sociedad.

Ing. Susana Cadena Vela, Ph. D.

EDITORIAL

RENACER

La palabra renacer está integrada por el prefijo re-, que significa reiteración y por el vocablo latín nasci, cuyo sentido es nacer. Es decir, renacer es volver a nacer, a cobrar vida, lo cual no solo se aplica en sentido literal, sino también a aquella circunstancia en la cual resurgimos después de una dificultad, nos revitalizamos y volvemos a comenzar. En las circunstancias actuales de pandemia, de crisis sanitaria, económica, social y ética, renacer se ha convertido en un imperativo.

En este contexto, la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental ha asumido significativos retos en lo concerniente al fortalecimiento institucional, esfuerzo que ha requerido por parte de todos quienes conformamos la facultad distintas aproximaciones a los dilemas a los cuales se enfrenta nuestra sociedad. Partiendo de la identificación de estos grandes problemas, hemos redefinido el rol que debemos asumir autoridades, docentes, estudiantes, empleados y trabajadores en este momento trascendental para el país, fundamentada en una adecuada actitud y promoviendo la participación y compromiso de todos quienes hacemos la FIGEMPA.

Renacer implica además la posibilidad de transformar y de construir de manera colectiva mejores opciones para el desarrollo institucional y social, en donde nuestro principal capital es el talento humano: la sabiduría de nuestros docentes, la rebeldía de nuestros jóvenes, el compromiso y vocación de servicio de nuestros trabajadores. Nuestra facultad se ha propuesto inspirar un cambio positivo, donde la juventud que se está formando sea consciente de sus derechos y obligaciones y defiendan su libertad, exijan respeto a su individualidad y se comprometan con la justicia social, la democracia y la igualdad.

Renacer siempre va a implicar nuevos retos, nuevos escenarios y sobre todo una oportunidad para consolidar esa conciencia crítica que ha sido promotora de los grandes cambios de la humanidad. Aprendamos a vivir el aquí y ahora porque es cuando construimos nuestro futuro, todo lo que necesitamos es pasión para ejercer nuestra libertad con grandes dosis de dignidad, inteligencia y valentía.

En los momentos actuales, el país requiere de iniciativas y propuestas de todos los sectores para salir de la crisis, por lo que es importante, entre otras cosas, fortalecer el sistema de educación superior del Estado dotándole de recursos para mejorar la calidad de la enseñanza, la investigación y la vinculación con la sociedad, y optimizar el aprovechamiento sustentable y sostenible de los recursos energéticos, principalmente los hidrocarburos y recursos minerales, para lo que la academia debe formar y perfeccionar al talento humano que permita ayudar a alcanzar los objetivos de desarrollo sustentable, proyectándoles a las carreras y programas de posgrados para las necesidades del futuro. FIGEMPA comprometida con la vida y el desarrollo.

Ing. Gustavo Pinto
DIRECTOR DE REVISTA FIGEMPA

TECNIREPORTAJES

MAESTRÍAS Y SEMINARIOS

Programas de maestrías y de especialización

La Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental ofrece los siguientes programas de Especialización y Maestrías:

E **SPECIALIZACIONES**

ESPECIALIDAD EN AUDITORÍA Y PERITAJE AMBIENTAL

Titulación: Especialista en Auditoría y Peritaje Ambiental

El programa está dirigido a profesionales con título de tercer nivel en los campos del conocimiento de las Ciencias Sociales, Periodismo, Información y Derecho; Ciencias Naturales, Matemáticas y Estadística e Ingeniería, Industria y Construcción. El objetivo es formar profesionales con sólidos conocimientos y herramientas de aplicabilidad posprofesional y con competencias avanzadas para el análisis de conceptos, objetivos, requisitos, alcances, procedimientos y aplicaciones de la Auditoría Ambiental bajo el enfoque de las normas ISO 14001:2015, con la finalidad de dar cumplimiento a la normativa ambiental vigente en el Ecuador; además de ello, instruir en el perfeccionamiento de la elaboración de informes y metodología en Peritaje Ambiental, que garanticen la conservación de la diversidad de ecosistemas y su posible vulneración.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 6 meses más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 2500

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

ESPECIALIZACIÓN EN AUDITORÍA Y PERITAJE EN HIDROCARBUROS

Titulación: Especialista en Auditoría y Peritaje en Hidrocarburos

La especialización en peritaje petrolero está abierta a toda persona vinculada al sector petrolero que tenga título en ingeniería, leyes, economía o afines. El objetivo del programa de especialización en Peritaje Petrolero es formar profesionales con una instrucción sólida en los campos que están en la malla curricular del programa. En tal virtud, se aspira a que los profesionales en su práctica profesional sean capaces de realizar un trabajo de peritaje y auditoría que aporte sustantivamente en el sistema de justicia del Ecuador, y a la empresa pública y privada.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 6 meses incluida titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 2500

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

ESPECIALIZACIÓN EN AUDITORÍA Y PERITAJE MINERO

Titulación: Especialista en Auditoría y Peritaje Minero

La especialidad está dirigida para profesionales con título de tercer nivel en Ingeniería en Minas, Geología, Geotecnia y Civil y tener al menos 2 años de experiencia en el campo geológico minero y de la construcción. El objetivo es contribuir con el desarrollo de una minería responsable en sus diferentes etapas, a través de la formación de profesionales capaces de verificar el cumplimiento de requisitos legales a los procesos productivos y de comercialización de minerales, así como también, en la formación de auditores y peritos mineros para la identificación de delitos y resolución de conflictos en las actividades referidas en las fases de la actividad minera a través de la aplicación de conocimientos, metodologías, procedimientos y herramientas de auditoría y peritaje, así como de la aplicación de la ISO 19011:2018

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 6 meses incluida titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 3000

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE YACIMIENTOS HIDROCARBURÍFEROS

Titulación: Especialista en Gerencia de Yacimientos Hidrocarburíferos

El programa va dirigido a ingenieros graduados en el área de Petróleos, Geología, Geofísica y profesionales vinculados directamente a la cadena de valor de los hidrocarburos que posean al menos de 2 años de experiencia. Permitirá fortalecer las habilidades de los profesionales en el área técnica de gestión en yacimientos, mediante el dominio profundo de las áreas de geociencias, ingeniería aplicada de yacimientos, simulación matemática y desarrollos de inteligencia artificial aplicados en la industria hidrocarburífera, mediante la metodología de resolución de casos e impartidos por docentes y profesionales de trayectoria que orienten al profesional a la toma oportuna de decisiones y soluciones integradas en el gerenciamiento de yacimientos con un alto sentido ético y de responsabilidad social.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: presencial

DURACIÓN: 9 meses más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 3000

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE HIDROCARBUROS

Titulación: Especialista en Ingeniería de Diseño y Construcción de Pozos de Hidrocarburos

El programa está diseñado para formar profesionales especializados en el diseño y construcción de pozos de hidrocarburos para la planificación, ejecución y dirección de operaciones de perforación aplicando las normativas nacionales e internacionales que rigen la industria hidrocarburífera en el Ecuador. Los aspirantes deben tener conocimientos de Ingeniería de Petróleos, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Química, Ingeniería Industrial y afines; capacidad de utilizar herramientas matemáticas y estadísticas para el análisis de las operaciones de perforación.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: presencial

DURACIÓN: 6 meses incluida titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 3000

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

Titulación: Especialista en Producción de Hidrocarburos

La especialización tiene por objetivo formar profesionales de la ingeniería afines al área petrolera y de carreras científicas de manera que alcancen el manejo global y específico de los conocimientos requeridos para el desarrollo de las distintas actividades vinculadas a la producción petrolera; es decir, estará en capacidad de operar, diseñar y optimizar los procesos y métodos de producción de hidrocarburos al igual que las facilidades de superficie para enfrentar los retos del mundo moderno cada vez más complejo y competitivo, contribuyendo al desarrollo de la matriz productiva, económica, energética y social del país.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: presencial

DURACIÓN: 6 meses incluida titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 3000

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

M AESTRÍAS

MAESTRÍA EN ECONOMÍA CIRCULAR CON ENFOQUE EN PRODUCCIÓN SOSTENIBLE

Titulación: Magíster en Economía Circular con enfoque en Producción Sostenible

El programa está dirigido a todas aquellas personas que realicen actividades en los sectores relacionados con la gestión medioambiental. Para cursar este máster, se requiere contar con título de tercer nivel y/o experiencia en Biotecnología, Economía, Química, Biología, Farmacia, Arquitectura, Marketing, Relaciones Públicas, Comunicación, Licenciados en Administración, Ciencias Políticas y Jurisprudencia, Ciencias Agrícolas e Ingeniería Ambiental, Civil, Mecánica, Electrónica, Geográfica, Industrial, Recursos Naturales o carreras afines.

El propósito es formar profesionales de cuarto nivel en el área de economía circular, preparados para diseñar y ejecutar estrategias innovadoras aplicables tanto en el sector público como privado con el fin de redefinir modelos productivos y enmarcarlos en el modelo circular, basado en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los compromisos internacionales en esta temática. Los profesionales se formarán con un enfoque de especialización en producción sostenible.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 1 año más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 5400

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

MAESTRÍA EN CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS

Nombre del título: Magíster en Cambio Climático y Recursos Hídricos

La maestría está dirigida para graduados en Ciencias Ambientales, Ingenieros Geógrafos, Químicos, Sistemas, Estadísticos, Matemáticos, Civiles, Biólogos y profesionales relacionados con el sector ambiental y en Ciencias de la Tierra (Geólogos y Mineros). El programa de maestría está encaminado a formar profesionales de cuarto nivel en el área de Cambio Climático, con competencias en mitigación y adaptación, preparados para aportar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los objetivos establecidos en la Estrategia Nacional de Cambio Climático y los compromisos internacionales en esta temática. Los profesionales se formarán con un enfoque de especialización en recursos hídricos y modelación.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: RPC-SO-22-N.º478-2020

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 15 módulos más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 5400

MATRÍCULA: 28 de mayo al 6 de junio de 2021

FECHA PREVISTA DE INICIO: 14 de junio de 2021

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Título: Magíster en Eficiencia Energética

El programa está dirigido a profesionales de tercer nivel de grado con titulación preferentemente en el campo amplio Ingeniería, Industria y Construcción, en los campos específicos: Ingeniería y profesiones afines; Industria y Producción; y Arquitectura y Construcción. El objetivo es formar en los profesionales, competencias en eficiencia energética y uso racional de la energía a través de la formulación, elaboración, análisis y evaluación de soluciones a los problemas en el área industrial y energética con una participación activa en el desarrollo sostenible de los sectores estratégicos del Ecuador.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: RPC-SO-02-N.º054-2021

MODALIDAD: semipresencial

DURACIÓN: 1 año más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 4900

INSCRIPCIONES: 7 al 22 de junio de 2021

MATRÍCULA: 19 al 27 de junio de 2021 y del 3 al 4 de agosto de 2021

FECHA PREVISTA DE INICIO: 6 de agosto de 2021

MAESTRÍA EN GEOTECNIA APLICADA

Titulación: Magíster en Geotecnia Aplicada

Esta maestría está dirigida a profesionales que cuenten con su título de tercer nivel en Ingeniería en Geología, Minas o Petróleos. El objetivo es formar profesionales con capacidad para gestionar, proyectar y desarrollar servicios adicionales vinculados al campo de la geotecnia que faciliten y brinden la toma de decisiones en el diseño, ejecución y operación de obras que requieran el componente geotécnico, para lograr la seguridad, calidad, confiabilidad y optimizar el servicio de dicha infraestructura a la población.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: RPC-SO-02-N.º527-2016

MODALIDAD: presencial (mientras se mantenga el distanciamiento social, e utilizarán plataformas virtuales para la impartición de módulos)

DURACIÓN: 18 módulos más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 5800

FECHA PREVISTA DE INICIO: segunda semana de junio de 2021

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE PROYECTOS MINEROS

Título: Magíster en Gestión de Proyectos Mineros

La maestría está dirigida a profesionales con el tercer nivel de grado de Ingeniería de Minas, Geología, Civil o afines. El objetivo es contribuir en el desarrollo de la minería en sus diferentes etapas, a través de la formación de profesionales capaces de trabajar en forma multi, inter y transdisciplinaria integrando y aplicando conocimientos, metodologías, procedimientos y herramientas tecnológicas altamente especializadas para solucionar los problemas en las ramas de la ingeniería de minas, obras civiles subterráneas, cielo abierto y áreas afines.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: RPC-SO-02-N.º152-2020

MODALIDAD: presencial (mientras dure la emergencia sanitaria, será virtual)

DURACIÓN: 12 módulos más titulación

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 5800

FECHA PREVISTA DE INICIO: segunda semana de junio de 2021

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS, MENCIÓN RECUPERACIÓN MEJORADA

Titulación: Magíster en Ingeniería de Petróleos, mención Recuperación Mejorada

La maestría está dirigida a profesionales con título de tercer nivel de Ingeniería en Petróleos, Geología, Geofísica, Mecánica, Química Electrónica o carreras afines. El objetivo es contribuir en la investigación y en las soluciones para incrementar las reservas remanentes de los yacimientos explotados en el Ecuador, generando competencias para la formación especializada de profesionales capaces de aplicar métodos de recuperación mejorada en forma multi, inter y transdisciplinaria en la extracción de petróleo.

RESOLUCIÓN APROBACIÓN DEL CES: en trámite

MODALIDAD: presencial (mientras se mantenga el distanciamiento social, e utilizarán plataformas virtuales para la impartición de módulos)

DURACIÓN: 1 año más titulación (12 módulos)

COSTO: inscripción, USD 80; matrícula, USD 7500

FECHA PREVISTA DE INICIO: último trimestre de 2021

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES HIDROCARBURÍFERAS

El Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas (IIH) de la Universidad Central del Ecuador es un organismo de investigación, desarrollo y transferencia de tecnología que aporta a la sostenibilidad en las áreas de geociencias, hidrocarburos y energía. Las líneas de investigación son abordadas a partir del debate científico e informado sobre la problemática resultante de la interacción de los sistemas socioeconómicos y los ecosistemas en diferentes niveles y escalas, que resumo a continuación.

La extracción masiva de fuentes primarias de energía de alta calidad, después de la madurez de la revolución industrial, marcó el modernismo. La opulencia en la forma de vida de las sociedades y el fácil acceso a los recursos energéticos generaron la peligrosa suposición de un crecimiento económico infinito que ahora se ha convertido en una amenaza. Finalmente, estamos aprendiendo que la disponibilidad de recursos es limitada, lo cual ponen riesgo la sostenibilidad de la dinámica social.

Luego de los compromisos sobre el cambio climático a nivel global adquiridos en la COP 21 en París (2015), la atención de los diferentes actores de la gobernanza Estado-economía y sociedad civil sobre el uso sostenible de la energía y los recursos continúa en desarrollo. La seguridad por el abastecimiento de energía y sus efectos ambientales son los principales problemas que enfrenta los sistemas socioeconómicos, impulsados por el continuo crecimiento poblacional, aunque recientemente ralentizado por la covid-19 y la demanda de bienestar de los países desarrollados y en vías de desarrollo que siguen ejerciendo una mayor presión sobre los ecosistemas por la provisión de recursos energéticos.

El concepto de peak oil en las tendencias de producción de petróleo de alta calidad ahora está bien establecido. Esto se refleja en la dinámica hacia la extracción de reservas de petróleo no convencionales y de menor calidad que exigen mayores flujos de materiales y energía para su aprovechamiento. Al mismo tiempo, el desarrollo de energías renovables tampoco está exentas de problemas ambientales y de gestión que hacen que su uso sea cuestionable y aún no esté disponible en todas las áreas geográficas. No todas las energías tienen la misma calidad y costos ambientales, al igual que no se puede generalizar su uso. Esto hace que la planificación energética y de materiales sea un desafío, mucho más allá del progreso tecnológico logrado o alcanzable.

El IIH propone el desarrollo de la investigación bajo una comprensión más profunda de estos aspectos cruciales, incluidas las formas de abordar nuestros patrones de producción y consumo, para colaborar al debate de sostenibilidad más allá de la ilusión de una disponibilidad energética ilimitada y una solución tecnológica.

Rony Parra, Ph. D.

ÍNDICE

CONTENIDO

Modelos de depósitos tipo VHMS para las divisiones de la Cordillera Real: Alao y Salado.....	2
Huella química de elementos identificadores en los distritos mineros Nambija y Zaruma – Portovelo.....	12
Cañoneo auto desprendible, análisis de presión y caudal transiente, en la optimización de la completación inicial y producción definitiva de pozos	21
Comportamiento del margen de refinación en el sector hidrocarburífero del Ecuador en el 2018.....	30
Diseño sostenible de un proceso industrial local para la obtención de una bebida hidratante de hoja de tuna.....	40
Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador	50
Estudio cinético de la descomposición térmica del polietileno de alta densidad (hdpe) post consumo a diferentes tasas de calentamiento	61
Metodología para estimar indicadores claves de rendimiento en operaciones de perforación mediante análisis estadístico univariante	68
Calidad fisicoquímica del agua de la laguna Colta. Chimborazo, Ecuador	76



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

MODELOS DE DEPÓSITOS TIPO VHMS PARA LAS DIVISIONES DE LA CORDILLERA REAL: ALAO Y SALADO

VHMS deposit models for the cordillera Real divisions: Alao and Salado

Kevin D. Calero
kdcadero@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4888-8056>

Laura J. Albacura
ljalbacura@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador

Stalin Solano
spsolano@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-5780>

Francisco Viteri
frviteri@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador

Recibido: octubre de 2020

Aprobado: mayo de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

doi: 10.29166/revfig.v1i2.2664

RESUMEN

La cordillera Real comprende terrenos alóctonos y autóctonos acrecionados al continente, representados de oeste a este por las divisiones litotectónicas Guamote, Alao, Loja, Salado y Zamora. En este estudio se realiza la identificación de los posibles depósitos tipo VHMS (sulfuros masivos volcanogénicos) relacionados a las divisiones Alao y Salado, basado en estudios previos de petrología, petrografía y evolución de estas divisiones. Los parámetros que se utilizaron para comparar los tipos de modelos VHMS con los posibles depósitos de las divisiones mencionadas son: entorno geológico y tectónico, rocas encajantes, características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos, alteración y características geoquímicas. De esta manera se puede establecer que los depósitos de la unidad Pelitetec no se asocian a modelo alguno de depósitos VHMS, al existir diferencias con respecto a la litología y geoquímica. Por el contrario, el modelo asociado a un depósito VHMS tipo Kuroko coincide con las características de un depósito VHMS en la unidad Alao-Paute. A su vez se asoció depósitos de la división Salado a un depósito de VHMS tipo besshi, al encontrar similitudes en cuanto al entorno geológico-tectónico, mineralogía y semejanza de las huellas geoquímicas, sin embargo, las características de formación y evolución de la división Salado ha dificultado el desarrollo completo de estos VHMS tipo Besshi, pero no se descarta la existencia de los mismos.

ABSTRACT

The Cordillera Real comprises autochthonous and allochthonous land accreted to the continent, represented from west to east by the lithotectonic divisions Guamote, Alao, Loja, Salado and Zamora Divisions. (Litherland, *et al.* 1994). This work describes the possible VHMS (Volcanogenic Massive Sulphide) deposits present in the Alao and Salado divisions, based on previous studies of petrology, petrography and evolution of these divisions. The parameters used to compare VHMS model types with possible deposits of the divisions are: geological environment, tectonic framework, nesting rocks, associated rocks, textural and mineralogical characteristics of massive bodies, alteration and geochemical characteristics. In this way, it can be established that the deposits of the Pelitetec Unit are not associated with a VHMS deposit as there are differences with respect to lithology and geochemistry. In contrast, the model associated with a Kuroko-type VHMS deposit coincides with the characteristics of a VHMS

PALABRAS CLAVE Cordillera Real, vhms, evolución, tipo Beshi, división Salado.

KEYWORDS Cordillera Real, VHMS, Evolution, Beshi Type, Salado.

deposit in the Alao-Paute Unit. In turn, deposits from the Salado Division were associated with a Besshi-type VHMS deposit, finding similarities in terms of the geological-tectonic environment, mineralogy and similarity of the geochemical traces, however, the formation and evolution characteristics of the Salado Division has hindered the full development of these Besshi-type VHMS, but their existence is not ruled out.

INTRODUCCIÓN

En la cordillera Real del Ecuador (ver Figura 1), se han identificado divisiones litotectónicas definidas de oeste a este como las divisiones Guamote, Alao, Loja, Salado y Zamora (Litherland *et al.*, 1994), sus edades varían desde el Paleozoico hasta el Cretácico y su morfología es el resultado de la tectónica compresiva de una alternancia de terrenos alóctonos y autóctonos. Dentro de estas divisiones acrecionadas se han realizado varios estudios con respecto a evidenciar el potencial geológico-minero y probable desarrollo económico de la región, tomando en cuenta los rasgos morfoestructurales y los principales depósitos emplazados identificados en la cordillera, como los pórfidos de Cu-Au y epi-mesotermales relacionados con el emplazamiento plutónico y los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (vhms por sus siglas en inglés).

Los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos han sido poco explorados y/o desarrollados y considerados menos rentables por su tamaño, razón por la que no se han realizados programas de investigación a detalle en la cordillera Real.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DEPÓSITOS VHMS

La concentración de los VHMS se centra en plataforma oceánica, su particularidad es la evidencia de fumarolas/chimeneas submarinas ricas en sulfuros, en ocasiones se han formado por emplazamiento en los sedimentos cercanos a la superficie. Estos depósitos están constituidos por masas de varios tamaños de sulfuros masivos, entendiendo por masivos que contengan más del 60% de sulfuros en el total de la masa mineral (PRODEMINCA, 2000).

Su importancia en la minería es grande y destacan algunos aspectos que realzan su valor económico. Entre ellos están:

1. La diversidad de metales (Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Fe, Cd, Sb, Se, Co, Bi, Sn, Hg, entre otros).
2. No son complejos para el proceso de extracción minera, al tratarse de masas de sulfuros con poca ganga facilita su explotación a cielo abierto siempre y cuando no tengan una sobrecarga potente de secuencias volcánicas cuaternarias o de otro tipo litológico.

3. Recuperación de varios metales al existir enriquecimientos supergénicos de gran valor en oro.
4. La existencia de grupos de varias masas situadas en distritos restringidos, lo que facilita su exploración y reduce los gastos de explotación (PRODEMINCA, 2000).

Con esta referencia bibliográfica se podrá generar planes de exploración para determinar la posible existencia de depósitos relacionados a las divisiones Alao y Salado, haciendo alusión a su litología y a la favorable génesis de acuerdo con su evolución cuyos límites orientales marcan paleo-suturas de subducción jurásico-cretácicas.

METODOLOGÍA

El presente estudio se refiere a un análisis e investigación bibliográfica, por lo cual se recopiló información que nos permita entender la evolución, el entorno litológico y la tectónica de cada división; además de las características generales de los modelos VHMS.

El análisis de la información se realizó de forma comparativa entre depósitos tipo, ambientes marinos similares y la lito-estratigrafía de cada uno. La información recopilada se utilizó para interpretar y comparar las características generales de los principales modelos de VHMS con las divisiones más propicias para presentar estos depósitos.

CONTEXTO GEOLÓGICO GEOLOGÍA REGIONAL

División Alao (un arco de islas oceánico del Jurásico medio)

La división Alao comprende una secuencia de rocas metavolcánicas y metasedimentarias de edad jurásica diferenciadas por las unidades metamórficas Peltetec, Maguazo, Alao-Paute, y El Pan, aflorantes en las estribaciones occidentales de la cordillera y en ventanas dentro del valle Interandino (Litherland, *et al.*, 1994) (ver Figura 2).

La unidad Peltetec es un complejo ofiolítico desmembrado, conformado por gabros, serpentinitas, basaltos y se ha interpretado como un melange tectónico aflorante a lo largo de la vía Licto-Alao, sector en el que se ha descrito metagabros y metabasaltos.

Al este está limitada por la unidad Maguazo y al oeste por pizarras y filitas de la unidad Punín y Cebadas de la división Guamote. Hacia el norte del poblado de Peltetec, la secuencia ofiolítica está expuesta a lo largo del río Quishpe y alrededor de Penipe. A lo largo del río Blanco se ha identificado metabasaltos, serpentinitas, piroxenitas, hornblenditas, filitas negras y rocas volcánicas (Litherland *et al.*, 1994).

Spikings *et al.* (2015), mediante dataciones en metabasaltos y gabros por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, establecieron la edad de esta unidad como Cretácico temprano ($134,3 \pm 12,8$ Ma y $134,7 \pm 0,9$ Ma).

Rocas de la unidad Maguazo están representadas por turbidíticas y secuencias volcánicas (andesita-basalto) ligeramente metamorfoseadas, pizarras carbonáceas, ortocuarcitas y cherts (Aspden y Litherland, 1992). La presencia de fósiles en esta unidad señala una edad jurásica, interpretada como una secuencia marina (Litherland *et al.*, 1994).

En la unidad Alao-Paute, conformada por esquistos cloríticos y rocas verdes de composición andesítica-basáltica, ubicada al noreste de Cuenca, afloran metasedimentarias, filitas grafiticas-cuarcíferas y rocas con tremolita-clinzoisita (Aspden *et al.*, 1992). Dataciones de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ en circones presentan una edad de $163,7 \pm 1,6$ Ma (Spikings *et al.*, 2015).

La unidad El Pan se presenta como un cinturón elongado de 70 km de largo y hasta 7 km de ancho, con rumbo andino (NE-SO), litológicamente representada por esquistos cloríticos, grafitosos, filitas y rocas de protolito ígneo, verdes más masivos con actinolita \pm clinzoisita \pm epidota. Es considerada como una secuencia de tras-arco, del arco de islas Alao-Paute y de edad jurásica (Litherland *et al.*, 1994).

MODELO EVOLUTIVO DE LA DIVISIÓN ALAO

Se ha interpretado un evento tectónico entre 170-180 Ma, probablemente relacionado con la formación de un arco volcánico *in situ* con polaridad al oeste, formado al borde noroccidental de la placa continental sudamericana como lo manifiestan Cochrane (2013) y Spikings *et al.* (2015). En dicho arco se desarrollaron varios episodios volcánicos que dieron origen a una sucesión de rocas esencialmente basálticas y volcánicas sedimentarias de componentes andesíticos.

Litherland *et al.* (1994), describe que las rocas de la división Alao se formaron por un arco de islas oceánico durante el Jurásico medio y de origen alóctono, que posteriormente fue acrecionado al continente. Cochrane (2013) y Spikings *et al.* (2015), interpretan a esta unidad como parte de un arco formado sobre una zona de subducción buzando al este, a lo largo de una franja adelgazada de un margen continental, dan-

do lugar a rocas volcánicas máficas isotópicamente jóvenes y en cuyo arco alberga grandes volúmenes de areniscas ricas en cuarzo-circón-turmalina, además de edades U/Pb de los circones detríticos que revelan una derivación del cratón sudamericano.

División Salado (litologías de arco de islas y plutónicas)

La división Salado comprende rocas volcánicas basálticas, metamorfoseadas y metasedimentarias, se encuentra limitada al este por la falla Cosanga-Méndez y al oeste por la falla Llanganates, la cual la separa de la división Loja (ver Figura 3) (Litherland *et al.*, 1994). Se ha diferenciado las unidades Upano, Cuyuja y Cerro Hermoso y, además, se incluyen rocas plutónicas metamorfoseadas de los granitoides de azafrán.

La unidad Upano comprende rocas verdes andesíticas, esquistos cloríticos y metagrauwacas intercalados con esquistos pelíticos y grafitosos, las cuales forman un cinturón casi continuo de hasta 15 km a lo largo del borde oriental de la cordillera Real. El grado metamórfico varía de medio a bajo. La sección tipo está ubicada en la carretera Guamote-Macas en la margen derecha del río Upano. Existen afloramientos a lo largo de la carretera Papallacta-Baeza y en las secciones de los ríos Upano, Cosanga y Oyacachi. Los datos geocronológicos y paleontológicos le asignan una edad Mesozoica (Litherland *et al.*, 1994). La edad promedio de palinoflora (perinopollenites elatoides) en filitas indican una edad Jurásico inferior-Cretácico, mientras que una datación K/Ar tiene como resultado una edad de 54 ± 2 Ma considerada como una edad de reajuste (Litherland *et al.*, 1994). Dataciones realizadas por Cochrane (2013), indican una edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de $121,0 \pm 0,8$ Ma.

La unidad Cuyuja ocurre al norte de la cordillera Real, está expuesta en el sector de Cuyuja (sobre la carretera Papallacta-Baeza) y forma un cinturón de hasta 10 km de ancho dentro del denominado complejo de cabalgamientos (nappes) Cuyuja. Su litología comprende esquistos con grafito y moscovita, esquistos pelíticos, e intercalaciones de esquistos verde. Las edades obtenidas mediante el método de K/Ar en moscovitas y biotitas son 82 ± 3 Ma (Kennerley, 1980 en Litherland *et al.*, 1994) y 59 ± 2 Ma (Herbert & Pichler, 1983 en Litherland *et al.*, 1994), pero en la unidad Upano son consideradas como edades de reajuste. Sin embargo, su relación genética con el adyacente plutón Azafrán expondría para esta unidad una edad jurásica (Litherland *et al.*, 1994).

La unidad Cerro Hermoso es una secuencia carbonatada que aflora en un cinturón estrecho en Cerro Hermoso. Comprende un espesor de unos 450 m de

Figura 1. Mapa de ubicación de la cordillera Real. Los terrenos de la cordillera Real están comprendidos de grupos litológicos con edades que varían desde el Paleozoico hasta el Cretácico, representados de oeste a este por las divisiones Guamote, Alao, Loja, Salado y Zamora.

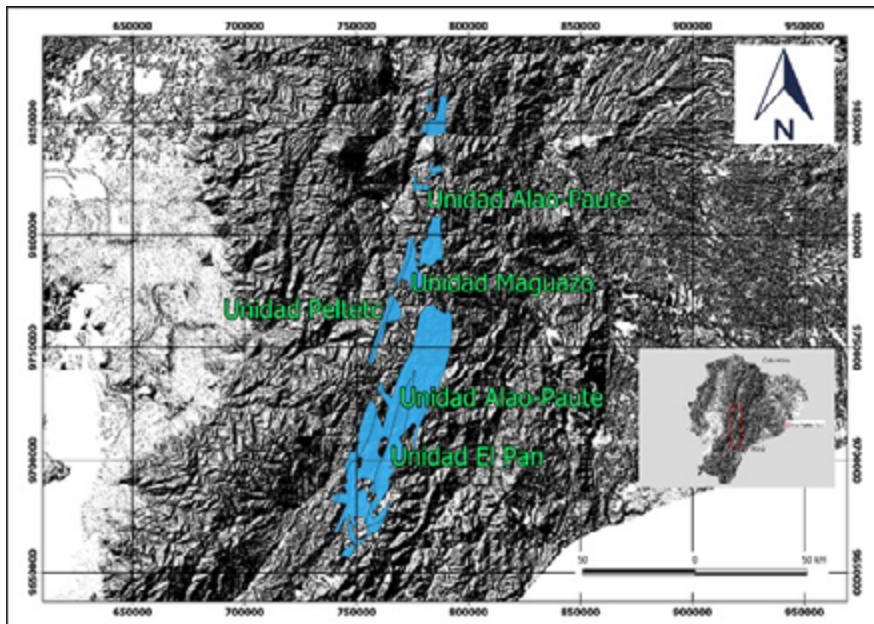
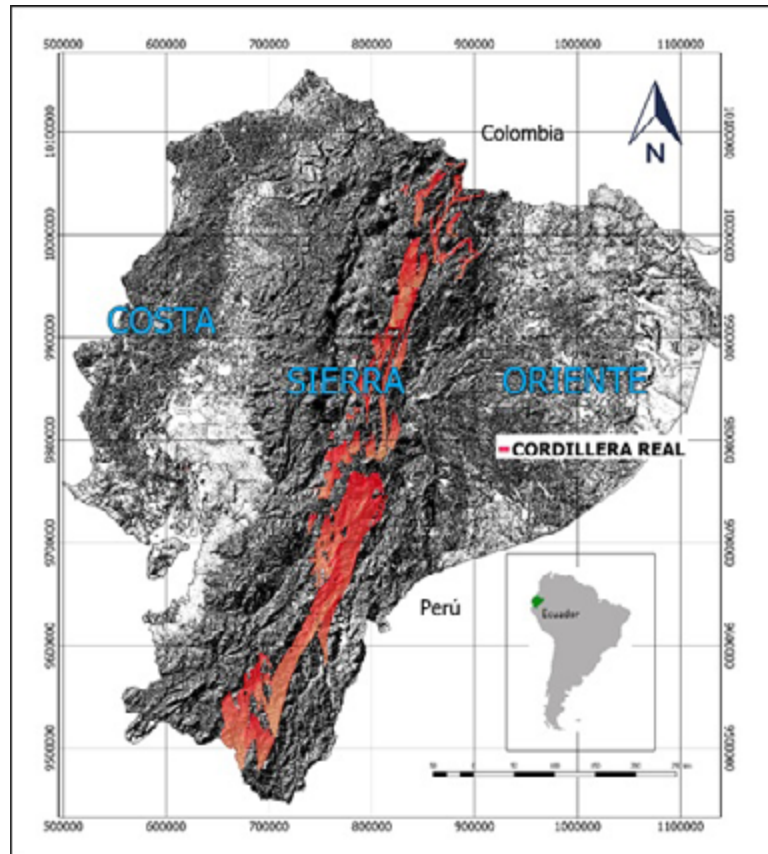


Figura 2. Mapa de ubicación y distribución de la unidad Alao en la cordillera Real. Este terreno comprende una secuencia de rocas metavolcánicas y metasedimentarias, pertenecientes a las subdivisiones metamórficas Peltetec, Alao-Paute, El Pan y Maguazo de edad jurásica.

calizas negras metamorizadas, filitas calcáreas negras y calco-arenitas, tiene un fuerte clivaje y microscópicamente presenta evidencias de fragmentos de concha y biotita recrystalizados. Está intruida por el plutón de Azafrán y la edad que se le asigna es Jurásico temprano a medio (Litherland *et al.*, 1994).

La unidad Azafrán constituye un cinturón de granitoides deformados, representados en el norte por los plutones Chingual y Sacha, en el sur por Azafrán. Su litología consiste en granodioritas y tonalitas hornbléndicas y biotíticas, de grano medio a grueso, variablemente deformadas y gnéicas, además de es-

tar presentes dioritas, hornblenditas y gabros. Varias dataciones por diversos métodos dan edades dependiendo de la deformación de las rocas como 50 Ma por K/Ar para una metadiorita, 120 ± 5 Ma por Rb/Sr para un metagranito y $142,7 \pm 2,9$ Ma por U/Pb en zircones de granitos (Litherland *et al.*, 1994). Análisis recientes muestran edades U/Pb de $140,7 \pm 0,7$ Ma y $143,5 \pm 1,3$ Ma, probablemente corresponde a la edad de la intrusión, en tanto las restantes se refieren posiblemente a eventos metamórficos tanto regionales como de contacto (Cochrane, 2013).

MODELO EVOLUTIVO DE LA DIVISIÓN SALADO

Tras la generación de granitos anatéticos tipo S y la apertura del rift triásico, relacionado a una fase extensiva donde se evidencia discordancias entre las capas rojas (reds beds) de la formación Sacha y los sedimentos marinos de la formación Santiago en la cuenca oriente, se inicia una etapa de volcanismo intraformacional durante gran parte del Jurásico con la generación del arco volcánico Misahuallí, asociada con actividad plutónica desarrollando cuerpos magmáticos tipo I (Aspden & Litherland, 1992). Este fenómeno está relacionado con un cambio en el marco geodinámico, el cual corresponde al arranque de la subducción andina evidenciada por el volcanismo calco-alcalino Misahuallí (Baby *et al.* 2004).

La división Salado interpretada por Litherland *et al.*, (1994) como un arco volcánico-plutónico situado junto al margen continental, probablemente fue contemporáneo con el arco continental de Misahuallí al este. La actividad volcánica generó tobas y flujos andesíticos en un ambiente marino inestable con subsistencia turbidítica relacionada y con periodos más estables de formación de carbonato marino. Los eventos ígneos y sedimentarios de la división Salado parecen relacionarse al Jurásico medio/superior.

DISCUSIÓN

DIVISIÓN ALAO-UNIDAD PELTETEC (DEPÓSITO DE SULFUROS MASIVOS TIPO CHIPRE)

Litherland *et al.* (1994), definen el entorno geológico de la unidad Peltetec como una secuencia ofiolítica, con metabasaltos, serpentinitas, piroxenitas, hornblenditas, filitas negras y volcanoclásticas, este entorno geológico coincide con el entorno geológico de los depósitos de sulfuros masivos tipo Chipre, definidos por Singer & Mosier (1986), que corresponden a una asociación ofiolítica (basaltos almohadillados, diques de diabasas, dunitas y harzburgitas tectonizadas y rocas metasedimentarias) (tabla 1).

Singer y Mosier (1986), definen que el marco tectóni-

co de un depósito de sulfuros masivos volcanogénicos tipo Chipre corresponde a estructuras de graben centro-oceánicas o extensionales tras-arco, esto se diferencia del marco tectónico de la unidad Peltetec, al ser interpretado por Litherland *et al.* (1994), como una sutura de acreción del terreno Alao en el evento Peltetec-Palenque, además se observan esfuerzos de transpresión y cabalgamientos.

Singer y Mosier (1986), establecen que las rocas encajantes en los depósitos tipo Chipre son basaltos almohadillados, brechas volcánicas básicas y sedimentos de grano fino, mientras que las rocas encajantes de la unidad Peltetec caracterizadas por Litherland *et al.* (1988), son areniscas verdes, pizarras negras y turbiditas, esto es un contraste para el modelo propuesto para esta unidad, ya que la litología es una secuencia sedimentaria de erosión de la proto-cordillera, para que este modelo se cumpla es necesario una roca encajante básica, asociado a piso oceánico con Cherts ricos en Fe y Mn.

Otros puntos que desfavorecen el modelo propuesto para la unidad Peltetec son las características texturales-mineralógicas, porque en la unidad Peltetec definida por Litherland *et al.*, (1988) no se encuentran sulfuros masivos o diseminados; y la alteración presente es una serpentización, mientras que en los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos tipo Chipre, definido por Singer y Mosier (1986), son abundantes cuarzo, calcedonia y clorita, junto con algo de illita talco y calcita.

Singer y Mosier, (1986) establecen que las características geoquímicas de un depósito de sulfuros masivos tipo Chipre, corresponden a la pérdida de Ca y Na, introducción y redistribución del Mn y Fe en la zona de vetillas mineralizadas (stockwork), mientras que en la subdivisión Peltetec presenta Cu-Ni \pm Co, Cr (ofiolita), Au (zona cizallada con vetas de cuarzo mesotermales) y polimetálicos (klippes de skarn) (PRODEMINCA, 2000) (ver Tabla 1).

Al comparar las características de la unidad con el modelo de depósito de VHMS, éstas son coincidentes en el contexto geológico, pero difieren con respecto a las rocas de caja, características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos de sulfuros, la alteración y características geoquímicas.

DIVISIÓN ALAO, UNIDAD ALAO-PAUTE (OCURRENCIA DEPÓSITO DE SULFUROS MASIVOS TIPO KUROKO)

Singer (1986); Singer y Mosier, (1986), caracterizan el entorno geológico de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko, el cual corresponde a una secuencia volcánico-sedimentaria con características de arco de islas

Tabla 1. Comparación de características geológicas

Características	VHMS tipo Chipre	Unidad Peltetec
Entorno geológico	Asociación ofiolítica	Secuencia ofiolítica
Marco tectónico	Grabens centro-oceánicos o extensionales tras-arco	Acreción del terreno Alao en el evento Peltetec-Palenque con corrimientos/ transpresión
Rocas encajantes	Basaltos almohadillados, brechas volcánicas básicas y sedimentos de grano fino	Areniscas verdes, pizarras negras y turbiditas
Características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos	Sulfuros dominantes: pirita ± calcopirita + esfalerita + magnetita Brechificados y recementados	No presenta cuerpos masivos de sulfuros
Características geoquímicas	Pérdida de Ca y Na. Introducción y redistribución del Mn y Fe en la zona de «stockwork»	Cu-Ni ± Co, Cr (ofiolita), Au (zona cizallada con vetas de cuarzo meso-termales), Polimetálicos (klippes de skarn)

Basado en Singer (1986a); Singer y Mosier (1986); Hoy (1995b), Litherland *et al.* (1994).

lo cual corresponde ampliamente al entorno evolutivo del arco de islas Alao, definido por Litherland *et al.* (1988).

El marco tectónico de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko, definido por Singer, 1986c; Singer y Mosier (1986b), corresponde a un arco de islas y, dentro de ellos, sectores con actividad tectónica extensional, mientras que la división Alao, el marco tectónico definido por Litherland *et al.* (1988), corresponde a un arco de islas acrecionado al continente con una tectónica transpresional, el cual ha sufrido una intensa deformación debido a la falla frente Baños y una tectónica regional de fallas posteriores de rumbo E-NE (tabla 2).

Las rocas encajantes de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko son volcánicas submarinas de composición félsica a intermedia (Singer, 1986c; Singer y Mosier, 1986b), mientras que las rocas encajantes de la unidad Alao-Paute, son esquistos verdes y metavolcanitas con albíta+epidota+clorita±cuarzo (Litherland *et al.*, 1994). Las rocas asociadas de estos depósitos coinciden en cuanto a secuencias básicas, andesíticas y sedimentarias.

Singer (1986); Singer y Mosier (1986), establecen las características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko. En la zona superior encontramos: pirita + esfalerita + calcopirita ± pirrotina ± galena ± barita

± tetraedrita + bornita, en las zonas marginales se ha identificado yeso/anhidrita, y en la zona inferior pirita + calcopirita ± esfalerita ± pirrotina ± magnetita. La textura es bandeada con pliegues de «slumping».

Las características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos en los depósitos de la Unidad Alao-Paute, caracterizados por Litherland *et al.* (1994), son cuerpos con una recristalización intensa, transformando a la pirita en cristales idiomorfos y subidiomorfos, sin embargo, se puede distinguir un bandeamiento paralelo. También se encuentra pirita masiva con una foliación N-S. Los cuerpos presentan del 60 al 95% de sulfuros (pirita ± calcopirita ± enstatita ± esfalerita ± bornita), bajos niveles de magnetita y los minerales que constituyen su matriz son cuarzo, sericita, moscovita y barita.

Singer (1986); Singer y Mosier (1986), establecen que las características geoquímicas de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko son Au y Pb altos en el gossan; enriquecidos en Mg y Zn y disminución del Na. En los depósitos se presentan Cu, Zn, Pb, Ba, As, Ag, Au, Se, Sn, Bi y Fe. En los depósitos de sulfuros masivos de la unidad Alao-Paute encontramos Fe, Cu, Pb, Zn ± Ag ± Au; en cuanto a la alteración en estos depósitos coinciden en presentar una mineralización stockwork y alteración sericítica. (PRODEMINCA, 2000) (ver Tabla 2).

Las características de la unidad Alao-Paute, coinciden con las características de un depósito de sulfuros masivos tipo Kuroko, esto está ampliamente descrito y corroborado por trabajos previos.

En la unidad Alao de la división Alao-Paute encontramos como ejemplo claro de depósito VHMS a Mina Pilas. Mina Pilas se encuentra ubicada a unos 15 km al NNE de Alao y comprende un lecho de pirita masiva intercalado entre esquistos sericiticos piritizados y esquistos de clorita piritizados. La pirita es aurífera y, aunque no se registran valores de metales base en el ensayo, la mineralización se considera un sulfuro masivo volcanogénico, por lo tanto, la mineralización de mina Pilas podría indicar un potencial para la mineralización de VHMS de metales base en otras partes de Alao Paute (Jamielita y Bolaños, 1993).

DIVISIÓN SALADO (DEPÓSITO DE SULFUROS MASIVOS TIPO BESSHI)

Litherland *et al.* (1988), definen que la división Salado es una secuencia de cuenca marginal, prisma de acreción y plataforma submarina marginal, por lo que se propone una asociación a un depósito de sulfuros masivos tipo Besshi por su afinidad. El entorno geológico de los depósitos de sulfuros masivos tipo Besshi corresponde a una secuencia sedimentaria clástica terrígena asociado con vulcanitas marinas y localmente rocas calcáreas que estarían relacionadas a las unidades Upano y Cerro hermoso.

El marco tectónico de un depósito de sulfuros masivos tipo Besshi caracterizado por Cox (1986) y Singer (1986) comprende terrenos metamórficos intensamente deformados, formación en cuencas de rift y arcos de islas o zonas traseras de arco. Al analizar la evolución de la división Salado propuesta por varios autores, se indica que corresponde a una cuenca marginal sobre un basamento continental con granitoides, que se formó durante la extensión de un rift semi desarrollado en el Triásico-Jurásico.

Cox (1986) y Singer (1986), caracterizan a las rocas encajantes de un depósito de sulfuros masivos tipo Besshi con sedimentos clásticos finamente laminados, tobas, brechas máficas tholeíticas y andesíticas con una asociación de pizarras negras, formaciones ferríticas (oxidadas) y cherts rojo, mientras que Litherland *et al.* (1994), definen que las rocas de la división Salado son esquistos pelíticos, meta-grauvacas con asociación de rocas verdes andesíticas, esquistos verdes y meta-grauvacas intercaladas con esquistos pelíticos y grafitosos (tabla 3).

Cox (1986) y Singer (1986), definen las características texturales y mineralógicas de los cuerpos

masivos de un depósito de sulfuros masivos tipo Besshi. Los sulfuros presentes son pirita + pirrotina + calcopirita + esfalerita \pm magnetita \pm galena \pm bornita \pm tetraedrita \pm cobaltita \pm cubanita \pm estannita \pm molibdenita. En la ganga se presenta cuarzo, carbonato, albita, mica, clorita, anfíbol y turmalina, finalmente la laminación es muy fina y se presenta pirita coliforme y framboidal.

En la división Salado se encuentra sulfuros diseminados predominantemente pirita, esta presenta dirección paralela a la esquistosidad (Litherland *et al.*, 1994). La alteración en los depósitos es difícil de reconocer a causa del metamorfismo, sin embargo, se presentan zonas de cloritización (Cox, 1986; Singer, 1986).

Las características geoquímicas establecidas para un depósito de sulfuros masivos tipo Besshi (Cox, 1986a; Singer, 1986b), corresponden a una huella geoquímica de Cu, Zn, Ag, Ni, Cr, Co y Co/Ni > 10 halos de Mn, mientras que en la división Salado encontramos Fe, Cu, Pb, Zn \pm Ag \pm Au (PRODEMINCA, 2000) (ver Tabla 3).

De acuerdo a las características mencionadas existe concordancia en cuanto al entorno geológico, al marco tectónico, a la litología y principalmente a la composición mineralógica, además de una similitud de las huellas geoquímicas, esto permite atribuir que el depósito de sulfuros masivos tipo Besshi, se correlaciona con los depósitos de sulfuros masivos de la división Salado, sin embargo, las características de formación y la evolución de esta unidad ha dificultado el desarrollo completo de estos depósitos, pero no se descarta la existencia de los mismos.

En la división Salado tenemos una evidente mineralización de sulfuros masivos volcanogénicos presentes en Guarumales, dentro de los esquistos micáceos negros, grises y verdes de las litologías de la subdivisión Upano, en la orilla oriental del río Paute, inmediatamente aguas abajo del puente Guarumales. La roca mineralizada está representada por esquistos micáceos blancos y verdes con más o menos pirita diseminada de granulometría fina a media (Jamielita & Bolaños, 1993).

Los valores geoquímicos del ensayo realizado por Jamielita & Bolaños, 1993, para muestras de este lugar dan hasta 1,32% en Cu, 7,97% de Pb y 12,32% de Zn, acompañado de valores altos o anomalías de Au, Ag, As, Sb, Bi, Cd, Ba, Mo, W y Sn. Por lo que Hutchinson, 1980 y Franklin *et al.*, 1981 consideran a esta mineralización como mineralización de sulfuros masivos volcanogénicos polimetálicos.

Tabla 2. Comparación de características geológicas

Características	vHMS tipo Kuroko	Unidad Alao-Paute
Entorno geológico	Secuencia volcano-sedimentaria con características de arco de islas oceánicas y cuenca marginal	Arco insular (antearco-arco de isla oceánica-retroarco)
Marco tectónico	Arcos de islas y dentro de ellos sectores con actividad tectónica extensional	Arco de isla acrecionado al continente con intensa deformación por la falla frente Baños y una tectónica regional de fallas posteriores de rumbo E-NE
Rocas encajantes	Rocas volcánicas submarinas de composición félsica a intermedia	Esquistos verdes y metavolcanitas con albita + epidota + clorita ± cuarzo
Características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos	Sulfuros dominantes: pirita + esfalerita + calcopirita, yeso/anhidrita, Textura bandeada con pliegues de «slumping».	Los cuerpos presentan recristalización intensa, pirita en cristales idiomorfos y subidiomorfos, bandeamiento paralelo
Características geoquímicas	Enriquecidos en Mg y Zn y disminución del Na. En los depósitos: Cu, Zn, Pb, Ba, As, Ag, Au, Se, Sn, Bi y Fe	Fe - Cu - Pb - Zn ± Ag ± Au (sulfuros masivos volcanogénicos)

Basado en Singer (1986a); Singer y Mosier (1986); Hoy (1995b); Litherland *et al.* (1994).

Tabla 3. Comparación de características geológicas

Características	vHMS tipo Besshi	División Salado
Entorno geológico	Secuencia sedimentaria clástica terrígena asociado con volcanitas marinas y localmente rocas calcáreas	Secuencia de cuenca arco de isla: cuenca marginal; prisma de acreción plataforma submarina marginal
Marco tectónico	Terrenos metamórficos intensamente deformados. Formación en cuencas de rift, en arcos de islas o zonas traseras de arco	Cuenca marginal de Jurásico inferior sobre basamento continental y con granitoides de edad Jurásico medio-superior
Rocas encajantes	Sedimentos clásticos finamente laminados y tobas y/o brechas máficas tholeíticas y andesíticas	Esquistos pelíticos y metagrauvascas
Características texturales y mineralógicas de los cuerpos masivos	Sulfuros: pirita + pirrotina + calcopirita + esfalerita ± magnetita ± galena; Laminación muy fina y presencia de pirita coliforme y framboidal	Sulfuros diseminados predominantemente pirita, presenta dirección paralelo a la esquistosidad
Características geoquímicas	Huella geoquímica de Cu, Zn, Ag, Ni, Cr, Co y Co/Ni > 10 halos de Mn	Fe - Cu - Pb - Zn ± Ag ± Au (Sulfuros masivos volcanogénicos)

Basado en Singer (1986a); Singer y Mosier (1986); Hoy (1995b); Litherland *et al.* (1994).

CONCLUSIONES

En la unidad Alao se registra un evento de rejuvenecimiento mediante el cual se propone que los fluidos cenozoicos sean canalizados a lo largo de fallas. Se interpreta que los depósitos polimetálicos de Ag-Cu-Zn-Pb relacionados al arco Alao-Paute presenta características muy favorables para el desarrollo de VHMS posiblemente de tipo Kuroko, relacionados a la formación del arco de isla, lo que se han constatado con varios depósitos muy rentables que se encuentran en explotación dentro de esta unidad. Por otro lado, tenemos la unidad Peltetec que con sus discrepancias en varios aspectos geológicos no puede presentar depósitos tipo VHMS.

La división Salado ha sido de mayor interés, ya que se ha discutido en cuanto a su evolución geológica y su entorno geológico, para el cual, basados en varios autores, interpretamos que pertenece a una cuenca marginal que se desarrolló en un ambiente extensivo, durante el funcionamiento del rift Triásico-Jurásico inferior, esta cuenca marginal tuvo el aporte de material volcánico del arco en funcionamiento Misahuallí y sedimentos terrígenos provenientes de la erosión del cratón sudamericano, por este motivo le asociamos un depósito VHMS tipo Besshi, pues este modelo es óptimo para cuencas de rift y arcos de islas o zonas traseras de arco, también tenemos una gran similitud en el marco tectónico presentando rocas metamórficas deformadas presentadas en las fajas sub horizontales de la unidad Cuyuja, otras características que favorecen a este modelo es la parte litológica con la presencia de rocas verdes de la unidad Upano, la presencia de rocas carbonatadas representadas en la unidad Cerro Hermoso y las huellas geoquímicas de Fe, Cu, Pb, Zn \pm Ag \pm Au, a pesar de ello, en la división Salado se encuentran sulfuros diseminados con predominancia de pirita siendo la única diferencia de mayor peso para este modelo, ya que el modelo presenta una paragénesis de pirita + pirrotina + calcopirita + esfalerita \pm magnetita \pm galena.

Por lo tanto, esta división es óptima para presentar depósitos tipo VHMS, en especial el tipo Besshi, gracias a todas las similitudes, sin embargo, la evolución general de la división Salado no favorece a la formación de grandes depósitos o depósitos económicamente rentables para su explotación, en contraste con esto no se descarta la existencia de depósitos tipo Besshi, pero en un tamaño o proporción reducida, se necesitan estudios a detalle y una exploración más completa en la división Salado y este trabajo es la iniciativa para realizarlos.

REFERENCIAS

- Aspden, J. A. y Litherland, M. 1992. Geología e historia colisional mesozoica de la cordillera Real, Ecuador. En W. G. Bonilla (ed.), *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 4(1), pp. 33-53.
- Baby, P., Rivadeneira, M. y Barragán, R. 2004. *La cuenca Oriente: geología y petróleo*. Convenio IFEA, IRD, Petroproducción, pp. 295.
- Best, M. 2003. *Igneous and metamorphic petrology* (2th ed). Melbourne: Blackwell.
- Bucher, K. and Grapes, R. 2011. *Petrogenesis of metamorphic rocks* (8th ed). London: Springer.
- Cochrane, R. S. 2013. *U/Pb thermochronology, geochronology and geochemistry of NW South America: rift to drift transition, active margin dynamics and implications for the volume balance of continents* (Tesis doctoral). Université de Genève, Faculté des sciences de l'Université de Genève, Cap (Sudáfrica).
- Cox, D. P. 1986. Descriptive model of Besshi massive sulfide. In Cox, D. P., and Singer, D. A. (eds.), *Mineral deposit models: U.S. Geological Survey Bulletin*, 1693, p. 136.
- Cox, D. P. and Singer, D. A. 1986. *Mineral deposit models: U. S. Geological Survey Bulletin*, 1693, p. 379.
- Filipek, L. H., Nordstrom, D. K. and Ficklin, W. H. 1987. Interaction of acid mine drainage with waters and sediments of West Squaw Creek in the West Shasta mining district, California. *Environmental Science and Technology*, 21(4), 388-396.
- Litherland, M. 1988. *Second annual report (March 1986-March 1987) of the Cordillera Real Geological Research Project, Ecuador*. British Geological Survey. Keyworth (in english) and of INEMIN, Quito (in spanish).
- Litherland, M., Aspden, J. and Jemielita, R. 1994. *The metamorphic belts of Ecuador* (first ed.). Keyworth: NERC.
- Pratt, W., Duque, P. and Ponce, M. 2005. An autochthonous geological model for the eastern Andes. *Tectonophysics*, 399, 251-278.
- Prodeminca. 2000. *Evaluación de distritos mineros del Ecuador, sulfuros masivos alojados en vulcanitas*, vol. 3. Quito: UCP Prodeminca Proyecto Mem Birf 36-55 Ec.
- Singer, D. A. 1986a. Descriptive model of Cyprus massive sulfide. In Cox, D. P., and Singer, D. A. (eds.), *Mineral deposit models: U. S. Geological Survey Bulletin*, 1693, p. 131.
- Singer, D. A. 1986b. Descriptive model of Kuroko massive sulfide. In Cox, D. P., and Singer, D. A. (eds.), *Mineral deposit models: U. S. Geological Survey Bulletin*, 1693, pp. 189-190.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagómez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., and Beate, B. 2015. The

geological history of northwestern South America:
from Pangaea to the early collision of the Caribbean

Large Igneous Province (290-75 Ma). Gondwana
Research (GR-01278), p. 45.



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

HUELLA QUÍMICA DE ELEMENTOS IDENTIFICADORES EN LOS DISTRITOS MINEROS NAMBIJA Y ZARUMA-PORTOVELO

Chemical footprint of identifying elements in the Nambija and Zaruma-Portovelo mining districts

Abdón Arturo Enríquez Almeida
 abdon.enriquez@geoenergia.gob.ec
 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE)
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7492-1625>

Manuel de Jesús Quezada Ochoa
 manuel.quezada@geoenergia.gob.ec
 Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE)
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0421-3006>

Recibido: marzo de 2020

Aprobado: mayo de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: [10.29166/revfig.v11i1.2181](https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2181)

RESUMEN

La procedencia del mineral el momento que llega al procesamiento es incierta, razón por la cual se busca metodologías que ayuden a identificar el lugar de extracción y, por ende, la legalidad del mismo. Para efectuar este estudio se tomaron diferentes muestras para efectuar análisis de laboratorio. Se cogieron 150 muestras durante la ejecución del proyecto Rehabilitación Nambija y 78 muestras del proyecto Trazabilidad del oro, desde los frentes de trabajo hasta las plantas de beneficio en Zaruma-Portovelo; ambos proyectos desarrollados por parte del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM). Con los resultados de 50 elementos se realizó una interpretación, verificando que hay una diferencia en la concentración de algunos elementos en cada distrito minero, esto se podría usar como indicadores de su procedencia. Así, por ejemplo, para Zaruma-Portovelo tenemos como indicadores Ag y Pb y para Nambija un grupo de tierras raras (Ce, Er, Gd, Lu, Nd, Y), además de otros elementos como el U, P y Zr.

ABSTRACT

The origin of the ore is uncertain when to get to the processing, for that reason, this study is looking for methodologies that help to identify the place of extraction and therefore the legality of it. So we took the results of 150 samples from the Nambija Rehabilitation Project and 78 samples of project Gold Traceability from The Work Fronts to the Profit Plants in Zaruma-Portovelo, by National Institute of Geological, Mining & Metallurgical Research (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, INIGEMM), which were analyzed in its lab. With the results of 50 elements an interpretation was made, verifying that there is a difference in concentration of some elements in each mining district, what could be used as indicators of its provenance is so for Zaruma-Portovelo it has Ag and Pb indicators and for Nambija a group of rare earths (Ce, Er, Gd, Lu, Nd, Y) in addition to other elements such as U, P and Zr.

PALABRAS CLAVE Concentración, elemento, indicador, muestreo.

KEYWORDS Concentration, element, indicator, sampling.

INTRODUCCIÓN

Para identificar la procedencia del oro, se optó por buscar elementos químicos que sean representativos en la mineralización de los yacimientos. Con este antecedente se consideraron los datos obtenidos en los proyectos Rehabilitación Nambija y Trazabilidad del oro en frentes de trabajo y plantas de beneficio de Zaruma-Portovelo, donde se obtuvieron 150 y 78 muestras tomadas en diferentes estructuras mineralizadas. Las muestras fueron enviadas a laboratorios químicos, donde se realizaron análisis de varios elementos en común, con los resultados se efectuó un análisis estadístico con el fin de determinar la tendencia de concentración que poseen elementos en particular para cada depósito minero. En el análisis no se consideró al oro, ya que éste es un mineral económicamente rentable para los mineros en los dos distritos mineros.

METODOLOGÍA

El presente estudio realizó un diagnóstico de la información encontrada en los proyectos Rehabilitación Nambija y Trazabilidad del oro desde los frentes de trabajo hasta las plantas de beneficio. Con estos insumos se pretendía encontrar diferencias entre los dos depósitos mineros. La ubicación de estas dos zonas mineras es en el sur del país. Nambija se encuentra en la provincia de Zamora Chinchipe, Zaruma-Portovelo en la provincia de El Oro. Además, se debe mencionar que ambas zonas tienen diferentes génesis de formación de la mineralización.

GEOLOGÍA

Geológicamente, el distrito minero Zaruma-Portovelo se encuentra sobre el complejo metamórfico El Oro, la zona de estudio está conformada por tobas, andesitas y en algunos casos dacitas.

Pratt *et al.* (1997) indican que la mayor parte del área relacionada con la zona de interés se encuentra sobreyacida por la unidad Portovelo. La serie que conforma la referida unidad geológica está compuesta por rocas de origen volcánico, como basalto y andesita, con cristales predominantes de plagioclasa, anfíbol y augita; así como en menor porcentaje por tobas andesíticas muy meteorizadas y tobas dacíticas. En cambio, Bonilla (2009) indica que la mineralización presente en el distrito corresponde a un epitermal de sulfuración intermedia con presencia de Au-Ag ± (Cu, Pb, Zn) pertenecientes a los metales base, así tenemos la presencia de sulfuros como pirita, calcopirita, galena, esfalerita. Además de otros minerales como carbonatos, silicatos (cuarzo, adularia, entre otros).

Por otra parte, en el distrito minero Nambija afloran rocas volcano-sedimentarias de edad jurásica, de color verdoso, con presencia de alteraciones hidrotermales (silicificación, carbonatación, epidotización y presencia de granates), las que se encuentran relacionadas con el *skarn*, sobreyaciendo a éstas se encuentran rocas volcano-sedimentarias con alteraciones de caolín y arcilla (Litherland *et al.*, 1994).

En el distrito mencionado podemos encontrar granodioritas, diques pequeños de tonalitas-dioríticas, y muy puntualmente lavas andesíticas y basálticas. El mineral de interés en Nambija es el oro, pero se encuentran asociaciones porfídicas de Cu-Au y Cu-Mo. El oro se lo encuentra libre de forma diseminada y con purezas superiores a 90% dentro de la zona del *skarn*. Este elemento se lo halla relacionado con vetillas o bolsionadas de cuarzo y menos frecuente con sulfuros, entre los que tenemos pirita y en menor proporción calcopirita, pirrotina, esfalerita y galena. Minerales de hierro como magnetita y hematita

Como se ha señalado anteriormente, las rocas tipo *skarn* se han formado en diferentes fases, que han afectado de manera variable a los horizontes estratigráficos que se encuentran preservados.

MUESTREO

Los muestreos en los dos casos se realizaron por medio de canal chip (chip *sampling*), para lo cual se realizó un corte de 2" de ancho y 1" de profundidad perpendicularmente a la estructura mineralizada, la roca extraída fue colocada en plásticos limpios con el fin de realizar el cuarteo y poder extraer muestras con un peso de alrededor de 1 kg.

Del distrito minero Nambija, en los bloques pertenecientes a la concesión minera Asonambile, se extrajeron 150 muestras en el *skarn*; en cambio en Zaruma-Portovelo se extrajeron 78 muestras de las vetas ubicadas en las concesiones: Bomba de Pachapamba, San Antonio, Palacios, Jorupe, Tres Reyes, Miranda, entre otras.

Posteriormente, las muestras fueron enviadas al laboratorio químico con su respectivo control de calidad (QA/QC), donde se incorporaron muestras duplicadas, estándares y blancos, además, fueron embaladas, etiquetadas y transportadas. Cada envío portaba su respectiva cadena de custodia (ver Figuras 1a y 1b).

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Las muestras obtenidas en los frentes de operación de los dos distritos mineros fueron analizadas en laboratorios certificados con el fin de obtener los resultados requeridos para su análisis.

El análisis se lo realizó para los siguientes elementos: Au, Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Hf, K, La, Li, Lu, Mg, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr. Se debe considerar que en los resultados estos elementos son similares para los dos casos de estudio.

De los elementos antes mencionados, el Au fue analizado por ensayo al fuego, pero éste no se consideró ya que se presentaba en los dos distritos mineros y es el metal económico para los mineros en ambos yacimientos. En cambio, para el resto de elementos se solicitó un análisis por ICP-OES e ICP-MS, análisis que entregó los resultados en ppm, mg/kg; lo que es similar a tener g/ton, que es un término más empleado en minería.

INTERPRETACIÓN

Con los resultados entregados por los laboratorios de las muestras tomadas en los distritos mineros, se realizó un análisis a 48 elementos, tomando en consideración la concentración de cada elemento para cada distrito minero. Los resultados se evidenciaron por medio del análisis de los datos interpretados, usando estadística descriptiva, y la representación en gráficos de dispersión y asociación de elementos.

Con la interpretación se definió la presencia de concentraciones propias de cada distrito minero, lo que es evidente en la distribución de la nube de puntos de los gráficos de dispersión, tal como lo indica Gehisy (2017).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico de los 48 elementos, con el fin de estudiar los resultados de las muestras y poder ir determinando elementos que poseen una gran variación de los resultados en cada uno de ellos.

Aplicando estadística descriptiva a los resultados de las muestras por cada elemento en los dos distritos mineros, se observa variaciones de media (valor promedio), mediana y moda. Con estos valores podemos determinar la diferencia en los promedios de concentración de un elemento en el mineral de cada distrito; por ejemplo, en el análisis de plata, se observa que la media de la concentración obtenida en Zaruma-Portovelo es muy superior a la obtenida en Nambija. Igualmente, los resultados de la desviación estándar son elevados en Zaruma-Portovelo, lo que indica que los resultados de las muestras de plata poseen una mayor dispersión con relación a la media, lo que indica

que tienen valores muy variables con relación al promedio (ver Tablas 1 y 2).

Otro ejemplo es el erbio (Er), del cual se puede evidenciar un valor promedio alto (media) en Nambija y una mayor dispersión de elementos en los valores representados por la desviación estándar y varianza. Con los datos obtenidos y considerando la amplitud y, por ende, las clases de cada grupo de muestras, se elaboraron los histogramas, los cuales nos indican el número de muestras y su distribución para cada clase; por ejemplo, para el Pb (ver Figuras 2 y 3).

Con los datos entregados por la estadística descriptiva y los histogramas de frecuencias, se definieron las características de concentración que tienen los elementos, mismos que son verificados con los gráficos de dispersión (Figura 4 y Figura 5), con los cuales se deduce que hay elementos con ciertos valores en sus resultados, que se pueden diferenciar en las concentraciones entre los dos depósitos mineros y es así que se describe:

Plata (Ag)

La plata presenta una mayor concentración en el distrito minero Zaruma-Portovelo, con valores que superan los 8,4 g/ton (valor máximo de Nambija) en un 74% de las muestras obtenidas. Aunque hay que considerar que en este distrito también tenemos muestras con resultados de efecto pepita encontrando valores de hasta 200 g/ton.

Cerio (Ce)

El cerio se presenta con una mayor concentración en el distrito minero Nambija, con valores que superan los 21,61 g/ton, lo que corresponde al 67% de la población de muestras. Razón por la que, el cerio podría ser un elemento indicador del distrito minero Nambija, cuando supera la concentración máxima del otro yacimiento.

Erbio (Er)

Esta tierra rara presenta una mayor concentración en el distrito Nambija, el valor máximo presente en Zaruma-Portovelo es de 1,53 g/ton, mismo que es superado por el 77% de las muestras tomadas en Nambija.

Gadolinio (Gd)

El gadolinio presenta una mayor concentración en el distrito minero Nambija, con valores superiores a los 2,36 g/ton, correspondiente al 79% de muestras obtenidas en este distrito que son mayores al valor máximo del distrito Zaruma-Portovelo. Además, en Nambija se observó valores de efecto pepita superiores a 10 g/ton.



Figura 1. (a) Toma de muestra. (b) Material listo para el cuarteo

Tabla 1. Estadística descriptiva del Ag

Estadística descriptiva	Ag Nambija	Ag Zaruma
Media	1,47	28,15
Error típico	0,12	3,79
Mediana	1,10	15,64
Moda	0,8	101
Desviación estándar	1,42	33,49
Varianza de la muestra	2,01	1121,62
Curtosis	9,84	10,89
Coefficiente de asimetría	2,94	2,77
Rango	8,30	210,28
Mínimo	0,10	0,60
Máximo	8,40	210,88
Suma	219,80	2195,42
Cuenta	150	78
Nivel de confianza (95,0%)	0,23	7,55

Tabla 2. Estadística descriptiva del Er

Estadística descriptiva	Ag Nambija	Ag Zaruma
Media	2,36	0,54
Error típico	0,11	0,04
Mediana	2,07	0,49
Moda	2,07	0,01
Desviación estándar	1,29	0,37
Varianza de la muestra	1,66	0,14
Curtosis	13,43	-0,37
Coefficiente de asimetría	2,64	0,53
Rango	10,74	1,52
Mínimo	0,24	0,01
Máximo	10,98	1,53
Suma	354,46	41,94
Cuenta	150	78
Nivel de confianza (95,0%)	0,21	0,08

Lutecio (Lu)

En el caso del Lutecio los análisis de las muestras tomadas en Zaruma-Portovelo, están bajo el límite de detección, presentado por el laboratorio y solo 1 muestra de las 78 tomadas presentó un valor de 0,13 g/ton; además, los datos de concentraciones superiores en el distrito minero Nambija corresponden al 90%, razón por la cual, la presencia de este elemento, sea como traza o ultra traza, nos indica que su procedencia es Nambija.

Neodimio (Nd)

La concentración de este elemento en el distrito minero Nambija, presenta valores sobre el 75% del valor máximo obtenido en Zaruma-Portovelo de 10,81 g/ton, la mayor concentración se presentaría al sur oriente del país.

Fósforo (P)

El fósforo tiene una mayor presencia en el distrito minero Nambija, la media que presentan estos valores es casi 6 veces mayor que la presentada en Zaruma-Portovelo. Además, presentan un 55% de valores superiores al máximo de Zaruma-Portovelo, que es de 600 g/ton, considerando que éste es un valor de efecto pepita en este distrito y los valores estarían bajo los 400 g/ton.

Plomo (Pb)

Así como la plata, de igual forma el plomo presenta una mayor concentración en el distrito minero Zaruma Portovelo, con valores superiores a 180 g/ton, que corresponden al 76% de la población de muestras (ver Figuras 4 y 5). Además, estadísticamente el valor promedio que se presenta en el distrito minero Zaruma-Portovelo es de 1892 g/ton, cuyo valor es 125 veces mayor a las concentraciones presentes en Nambija, por tal motivo, concentraciones mayores definen una procedencia.

Uranio (U)

Este elemento radiactivo se encuentra en los dos depósitos mineros, pero con una mayor concentración en Nambija, con valores sobre 0,45 g/ton, correspondiente al 89% de las muestras tomadas en este distrito. Además, en Nambija presenta valores de hasta 9,3 g/ton de acuerdo a los resultados obtenidos

Itrio (Y)

Continuando con elementos del grupo de tierras raras, tenemos al itrio, el cual presenta un comporta-

miento similar a las anteriores; por ende, es un indicador para determinar que la procedencia es el distrito minero Nambija. El valor máximo de este elemento en el distrito Zaruma es de 11,30 g/ton, pero las concentraciones mayores a este valor en Nambija corresponden a un 77% de muestras.

Zirconio (Zr)

Este elemento presenta mayores valores de concentración en el distrito minero Nambija, con un 61% de valores sobre la concentración máxima de Zaruma-Portovelo. Razón por la cual podemos definir como un elemento que, considerando cierta concentración o ley, puede ser indicador de que su procedencia es Nambija (ver Figuras 6 a y b). Con el análisis de dispersión se puede observar algunas asociaciones de elementos que se relacionan en cada distrito minero, es así que en Zaruma-Portovelo las concentraciones de Ag-Pb son indicadores de su procedencia, lo que se relacionaría con la mineralogía que presenta el depósito y la concentración promedio de estos elementos, tal como lo indica la figura 6.

Para el distrito minero Nambija se puede ver que en los elementos que poseen una alta concentración con relación a los valores promedios, se contemplaría una asociación de tierras raras, tal como lo indica la figura 7 (ver Figura 7).

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis realizado, se puede verificar la existencia de diferentes concentraciones de elementos químicos en cada uno de los depósitos minerales

Con el análisis realizado es posible determinar ciertos elementos como indicadores de la procedencia del mineral, es así que en Zaruma-Portovelo, la asociación Ag-Pb, con valores superiores de plata (> 8,4 g/ton) y plomo (> 181 g/ton), tienen una alta probabilidad de que su origen sea Zaruma-Portovelo (ver Tabla 3).

En cambio, la presencia de tierras raras con concentraciones mayores a Ce (>22 g/ton), Er (> 1,6g/ton), Gd (> 2,4 g/ton), Nd (> 10,81 g/ton), Y (> 11,3 g/ton), además de la presencia de Lu, nos indica que la probabilidad de que el origen sea Nambija es muy alta, además de otros elementos como el uranio (> 0,91 g/ton) y zirconio (> 74g/ton) que complementarían esta decisión.

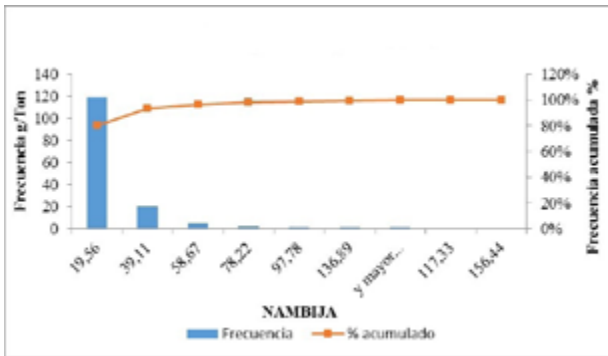


Figura 2. Histograma de frecuencias del Pb, distrito Nambija

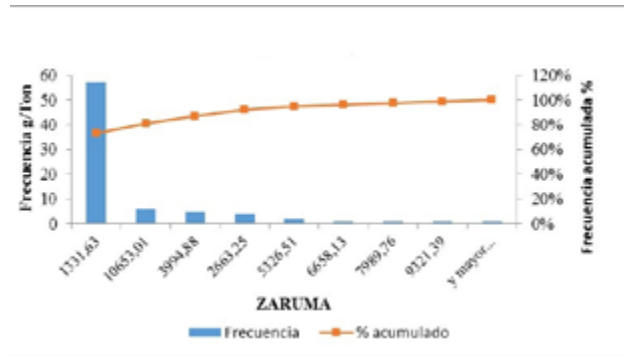


Figura 3. Histograma de frecuencias del Pb, distrito Zaruma-Portovelo

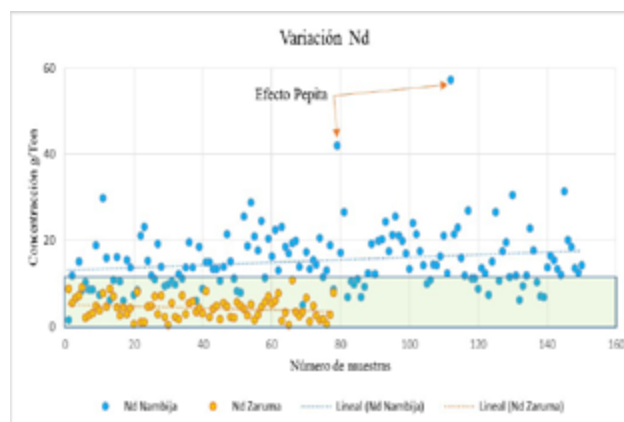
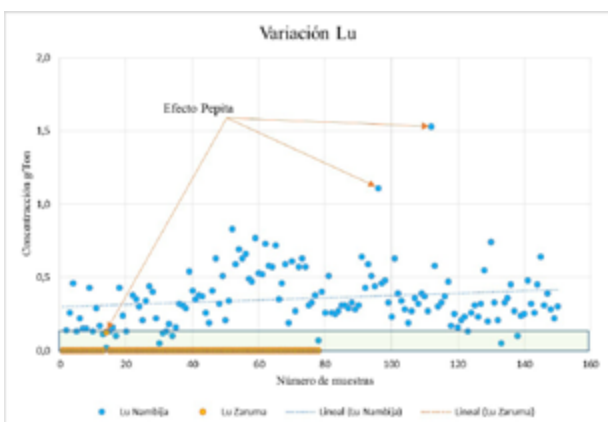
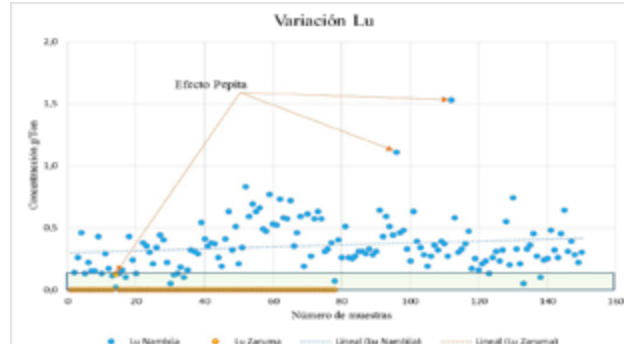
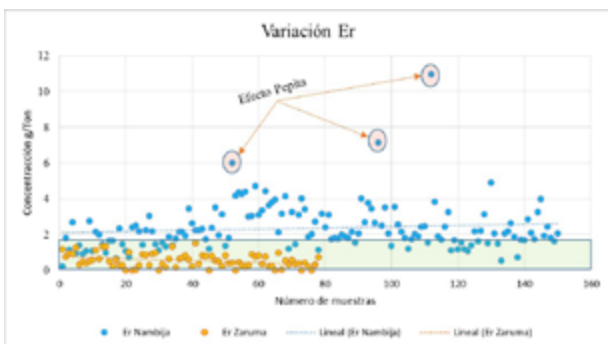
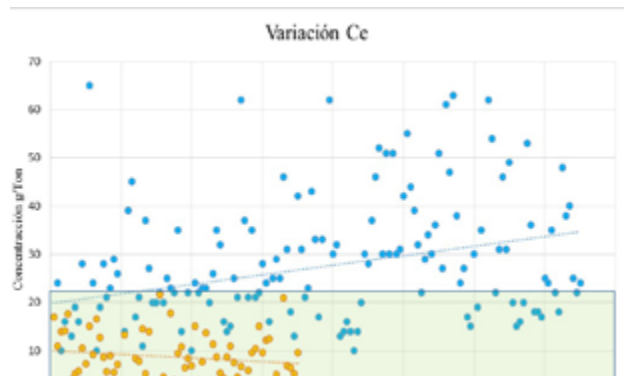


Figura 4. Gráficos de dispersión en relación a la concentración de los elementos: Ag, Ce, Er, Gd, Lu y Nd



Figura 5. Gráficos de dispersión en relación a la concentración de los elementos: P, Pb, U, Y y Zr

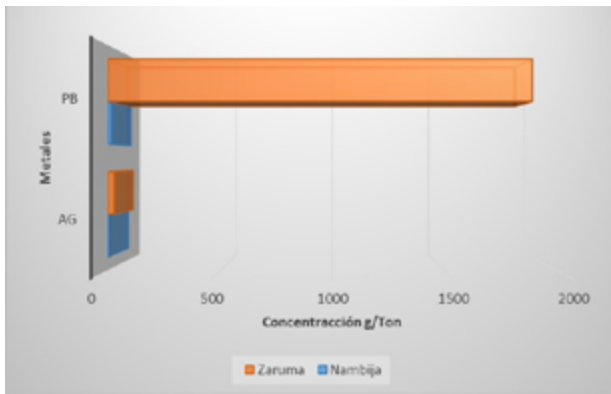


Figura 6a. Asociación de Ag-Pb, con mayor concentración en Zaruma-Portovelo

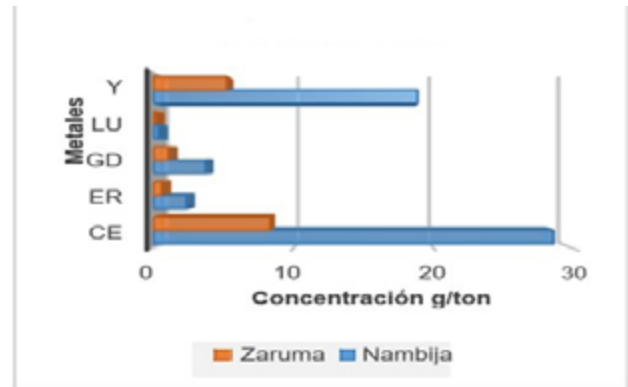


Figura 6b. Asociación de Ce, Er, Gd, Lu e Y, con mayor concentración en Nambija.

Tabla 3. Elementos identificadores por mayor concentración de los distritos Zaruma-Portovelo y Nambija.

Elemento	Concentración	Zaruma-Portovelo	Nambija
Plata (Ag)	8,4 g/ton	↑	
Cerio (Ce)	22 g/ton		↑
Erbio (Er)	1,6 g/ton		↑
Gadolinio (Gd)	2,4 g/ton		↑
Lutencio (Lu)	0,13 g/ton		↑
Neodimio (Nd)	10,81 g/ton		↑
Fósforo (P)	600 g/ton		↑
Uranio (U)	0,91 g/ton		↑
Plomo (Pb)	181 g/ton	↑	
Itrio (Y)	11,30 g/ton		↑
Zirconio (Zr)	74 g/ton		↑

REFERENCIAS

- ACDI-INEMIN. 1987. *Informe de prefactibilidad geológico metalogénico de la zona sur del yacimiento aurífero de Nambija*. Quito: INEMIN.
- Aperin, M. 2013. *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos*. Buenos Aires, Argentina: Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN).
- Bonilla, W. 2009. *Metalogenia del distrito minero Zaruma-Portovelo, República del Ecuador*. Universidad de Buenos Aires. Portovelo.
- British Geological Survey-Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero y Metalúrgico. 1997. *Mapa geológico de la cordillera Occidental del Ecuador entre 3-4 °S, escala 1:200000*. Quito.
- Delgado, A. E. 2015. *Proyecto rehabilitación Nambija*. Quito: INIGEMM.

- Gallegos, J. 2018. *Estos son los metales preciosos que acompañan al oro como los más valiosos y caros del mundo*. Recuperado de <https://oroinformacion.com/estos-son-los-metales-preciosos-que-acompanan-al-oro-como-los-mas-valiosos-y-caros-del-mundo/>
- Ingeoexpert. 2017. *Tipos de muestreo en minería*. Recuperado de: <https://ingeoexpert.com/blog/articulo/tipos-muestreo-mineria/>
- INIGEMM. 2018. *Proyecto de trazabilidad del oro desde los frentes de explotación a las plantas de beneficio en Zaruma-Portovelo*. Quito: INIGEMM.
- Laboratorio de Técnicas Instrumentales UVa. 2016. *Espectroscopía de plasma ICP-OES*. Recuperado de: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectroscopa-de-plasma-icp-oes>
- PRODEMINCA. 2000. *Evaluación de distritos mineros del*

Ecuador: potencial minero metálico y guías de exploración (vol. 1). Quito, Ecuador: Ministerio de Energía y Minas. Salazar, C. y Del Castillo, S. 2018. *Fundamentos básicos de estadística* (pp. 36-116). Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13720/3/Fundamentos%20B%C3%A1sicos%20de%20Estad%C3%ADstica-Libro.pdf> Universidad Complutense de Madrid. (s. f.). *Inductively coupled plasma optical emission spectrometry*. Recuperado de: [\[metria-de-emision-con-fuente-de-ionizacion-icp-oes\]\(https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/espectrometria-de-emision-con-fuente-de-ionizacion-icp-oes\) Universidad de Burgos. 2019. *Espectrometría de masas de plasma \(ICP-MS\)*. Recuperado de: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>](https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/espectro-</p></div><div data-bbox=)



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

CAÑONEO AUTODESPRENDIBLE, ANÁLISIS DE PRESIÓN Y CAUDAL TRANSIENTE, EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMPLETACIÓN INICIAL Y PRODUCCIÓN DEFINITIVA DE POZOS

Well completion optimization using automatic-release guns, pressure and rate transient analysis

Dorian Jaramillo
 djaramillo@enap.com.ec
 ENAP-Sipac
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-8912>

Recibido: julio de 2020
 Aprobado: mayo de 2021
 ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: [10.29166/revfig.v11i1.2417](https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.2417)

RESUMEN

Se presenta una iniciativa operativa para la completación y evaluación inicial de reservorios que utiliza los conceptos del análisis de declinación de presión y caudal transiente para el cálculo del potencial de pozo y solicitud de tasa al Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR), sin la necesidad de realizar una prueba de restauración de presión y reduciendo el tiempo para la puesta en producción definitiva. El procedimiento se basa en el uso de cañones autodesprendibles, BHA, con equipos BES y sensores de presión con transmisión en tiempo real. Previo a la activación de los cañones, se desplaza la BES, se evacúa el fluido para generar el «bajo balance» y, una vez que los cañones se activan, el pozo entra en fase de surgencia y, por equilibrio hidrostático, se alcanza condiciones cercanas a la presión estática de reservorio. Luego de 12 h del cañoneo, se enciende el equipo BES a frecuencia y con parámetros de superficie constantes. Los datos de presión y caudal permiten calcular el potencial de pozo. El uso de tecnologías de cañoneo autodesprendible y equipos BES con sensores de presión y monitoreo en «real time», permite diseñar una propuesta diferente para la evaluación inicial de pozos, previo a la solicitud de fijación de tasa por parte del MERNNR en el Ecuador. La propuesta tradicional incluía el uso de BHA de evaluación con bomba jet más el uso de memorias para el build up. Bajo esta metodología se lograba estimar el potencial del pozo antes de bajar la completación definitiva (BES en la mayoría de casos). El tiempo promedio transcurrido entre la terminación del registro de cemento y la puesta en producción definitiva era de +/- 16 días asumiendo que se usa el mismo equipo de perforación en la completación lo cual resulta costoso. En el caso de usar un rig de reacondicionamiento para la fase de completación, se debe considerar el tiempo asociado al cambio de rig (+/- 15 días). El objetivo de ENAP desde el 2018 fue optimizar los tiempos de completación y determinar el potencial del pozo para obtener la fijación de tasa por parte del MERNNR. El resultado obtenido permitió reducir a 7 días el tiempo entre la culminación del registro de cemento y la puesta en producción definitiva.

ABSTRACT

An operational initiative for the initial completion and evaluation of reservoirs is presented. It uses the concepts of pressure and rate transient analysis to calculate well potential and rate request to the Ministry of Energy and Non-Re-

PALABRAS CLAVE Completación de pozos, análisis de presión transiente, caudal transiente, declinación de presión, bajo balance.

KEYWORDS Well Completion, pressure transient analysis, rate transient analysis, pressure drawdown, bajo balance.

newable Natural Resources (MERNNR), without the need to perform a Build Up test and reducing the time to definitive well commissioning. The procedure is based on the use of automatic-release guns, BHA's with ESP equipment and pressure sensors with real-time transmission. Prior to the activation of the guns, the ESP is installed, the well fluid is evacuated to generate « Low Balance Conditions» and once the cannons are activated, the well enters to the emerging phase and by hydrostatic balance conditions, the well pressure is approaching to the static reservoir pressure. After 12h of the gunfire, the ESP equipment is turned on with constant surface parameters. The pressure and flow data allow to calculate the well potential. The use of automatic-release gun technologies and ESP equipment with "real time" pressure monitoring allows to design a different proposal for the initial evaluation of wells, prior to the request for maximum oil rate setting by MERNNR in Ecuador. The traditional proposal included the use of BHA's jet pump evaluation and memory gauge for Build Up Test. Under this methodology it was possible to estimate the potential of the well before installing final completion (ESP in most cases). The average time elapsed between the cement log and the well commissioning was +/- 16 days assuming that the same drilling rig is used in the completion which is costly. In case of using a Workover Rig for the completion phase, the time associated increases (+/- 15 days). ENAP's goal since 2018 was to optimize completion times and determine the well potential to obtain maximum oil rate setting by MERNNR. The result was to reduce the time between the completion of the cement register and the definitive production to 7 days.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la completación inicial de un pozo es evaluar el potencial productivo del reservorio previo a su entrada en producción definitiva. En Ecuador, el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) solicita a las empresas operadoras, los datos de producción y presión para la fijación de una tasa máxima de producción en cada reservorio. Bajo este contexto, es una práctica común el uso de técnicas convencionales como el TCP para cañoneo, evaluación y prueba de restauración de presión (BUP) previo a bajar la completación final, que en la mayoría de los casos es un sistema de bombeo eléctrico sumergible (BES). La llegada de los sistemas de cañoneo autodesprendibles permitió cañonear el intervalo de interés con el equipo BES en fondo, y evitar la fase de control de pozo luego de cañonear con un BHA intermedio. Con este avance, los tiempos de cañoneo y evaluación se optimizaron de forma importante, sin embargo, la restauración de presión aún representaba tiempos de cierre de pozo prolongados, ya que las completaciones con equipos BES no disponen de cierre en fondo, generando tiempos altos de almacenamiento y donde la respuesta del reservorio (flujo radial infinito-IARF) se logra visualizar en al-

gunos casos hasta la hora 80. ENAP como parte del proceso de mejora continua en sus prácticas operativas durante el 2018, realizó un cambio en la completación inicial de reservorios, implementando una fase de surgencia poscañoneo seguido de una prueba de drawdown las que, juntas, permiten obtener datos de presión estática, permeabilidad, daño y límites, sin la necesidad de realizar un BUP, reduciendo los tiempos de espera para la puesta en producción definitiva en un 56% (considerando que la completación se hace con el mismo rig de perforación) y logrando obtener la aprobación de tasas de producción por parte del MERNNR.

METODOLOGÍA DEL PROBLEMA

Para toda empresa operadora, la puesta en producción definitiva de un pozo es un hito de mucha importancia, optimizar el tiempo entre la cementación del pozo y el arranque del equipo de levantamiento artificial ha resultado en un impacto positivo en las operaciones de ENAP en Ecuador, obteniendo a la par la fijación de tasa del MERNNR. La decisión de cómo evaluar y completar inicialmente un pozo nuevo, es resultado de la interpretación de registros eléctricos, y las condiciones de presión existentes en los reser-

vorios identificados. En el caso de completaciones simples (una capa), junto con la identificación del intervalo a abrir se debe decidir si se usará un BHA-TCP para cañoneo o cañoneo-evaluación (jet-MTU) previo a la bajada del equipo BES

Durante la intervención de un pozo de baja presión se debe evitar en lo posible las operaciones de control y circulación, debido a que en yacimientos depletados con una profundidad promedio entre 9000-9500 pies la columna hidrostática está entre 3800-4100 psia, en comparación con las presiones de yacimiento que van desde 1400-2500 psia, estas condiciones de «overbalance» permiten el influjo del fluido de control hacia el yacimiento alterando las condiciones iniciales de la roca, los efectos van desde daño de formación hasta cambios en la mojabilidad. Otra operación no deseada es tener que apagar el equipo BES para tomar un BUP, esta actividad genera desgaste en el equipo e impacta en el run life y los tiempos de cierre son marcadamente mayores cuando se usa una BES para un BUP en comparación con las memorias y las válvulas de cierre en fondo.

El tiempo requerido para superar los regímenes de almacenamiento y transición pueden superar las 30 h en una prueba de BUP con BES, y para el mismo intervalo de tiempo se puede observar hasta los límites del yacimiento en una prueba con cierre en fondo (BHA-JET+MTU). La desventaja del cierre en fondo es que requiere de un BHA de evaluación distinto del BHA final de completación, lo que implica controlar el pozo durante el cambio de BHA. La siguiente figura compara la respuesta de un BUP con cierre en fondo (BHA-TCP-JET-MTU) y un BUP con equipo BES (ver Figura 1).

Entonces la pregunta surge, ¿se pueden obtener datos de presión estática, daño, permeabilidad y límites, sin la necesidad de cerrar el pozo para BUP y a la vez reducir el tiempo para la puesta en producción definitiva de un pozo nuevo?

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Cañoneo de pozos: Es el proceso de crear un camino de flujo entre la región del wellbore a través de la pared del casing y la capa de cemento hacia la zona del reservorio productor (Jawad, 2012).

Bajo balance estático y dinámico: La detonación de las cargas libera energía que pulveriza los granos de la roca, creando una zona aplastada de baja permeabilidad (crushed zone) alrededor del túnel de perforación que obstaculiza el movimiento de fluido (ver Figura 2). El dejar fluir el pozo luego de la detonación ayuda en la limpieza de los punzados debido al diferencial de presión entre el yacimiento y el wellbore,

de esta manera el cañoneo en condiciones de bajo balance (UB) es una técnica probada para mejorar la productividad del yacimiento (Jawad, 2012).

El bajo balance empleado en una operación de cañoneo puede ser de dos tipos: estático y dinámico. El primero está en función del nivel de fluido presente en la tubería de producción, que ejerce una presión hidrostática previo al accionamiento de los cañones. El bajo balance dinámico se genera por la acción de cámaras de vacío incorporadas a la sarta del TCP, estas cámaras generan un efecto de succión en fracciones de segundo, el flujo generado del reservorio hacia el wellbore es mayor al provocado por el UB estático obteniéndose una mejor limpieza del túnel perforado (Jawad, 2012).

Régimen transiente: Asume que la respuesta de presión en superficie no está afectada por la presencia de un límite en el yacimiento, es decir, se considera un yacimiento infinito. El régimen transiente se puede dividir en dos subregímenes (Kuiper, 2009):

Régimen dominado por el almacenamiento: donde la dinámica del wellbore domina a la del yacimiento durante la respuesta de presión. Durante este régimen, se asume que la respuesta de presión no contiene ninguna información acerca del reservorio, solo del wellbore (Kuiper, 2009).

Régimen de flujo infinito: Describe la respuesta de presión del reservorio cuando se asume que la dinámica del yacimiento domina sobre la del wellbore y no existe influencia significativa de los límites. Bajo este régimen se asume también que el radio del wellbore es insignificante en comparación con el yacimiento aparentemente infinito (Kuiper, 2009).

Análisis de declinación de presión (drawdown analysis, DDA): La apertura o cierre de un pozo genera un disturbio de presión que viaja a lo largo del yacimiento. Al principio, la caída de presión es especialmente rápida, pero con el tiempo cambia su comportamiento y su caída se vuelve más moderada. Mas allá de un cierto punto, la curva de presión se vuelve lineal. Este punto divide la curva en dos partes, periodo transiente y periodo estable o pseudo estable (ver Figura 3).

Una prueba de declinación es simplemente una serie de medidas de presión durante el periodo de flujo de un pozo que produce a tasa constante. Usualmente el pozo se cierra antes del flujo por un periodo de tiempo largo para permitir que la presión se iguale a lo largo de la formación (alcanzar presión estática) (Chaudhry, 2004).

Este tipo de pruebas permiten analizar el comportamiento del yacimiento, determinan la permeabilidad y el daño de formación además de los límites y las

condiciones de frontera, en caso de pozos fracturados el análisis de declinación de presión permite conocer la longitud de fractura (ver Figura 4).

Idealmente, el pozo se cierra hasta que alcance la presión estática del yacimiento antes de la prueba. Este requisito se consigue en yacimientos nuevos, pero a menudo es difícil o impráctico de lograr en yacimientos desarrollados (Escobar, 2010).

La presión medida en el wellbore puede ser expresado en la siguiente ecuación:

$$P_{wf} = P_i - \frac{quB}{4\pi kh} \left[-Ei \left(-\frac{\phi U C_{tr_w}^2}{4kt} \right) \right] \dots \text{Ec. (1)}$$

La ecuación para el factor S (daño de formación) es la siguiente:

$$\Delta P_{skin} = \left(\frac{qu}{2\pi kh} \right) S \dots \text{Ec. (2)}$$

Usando el principio de superposición:

$$P_{wf} = P_i - \frac{quB}{4\pi kh} \left[-Ei \left(-\frac{\phi U C_{tr_w}^2}{4kt} \right) + 2S \right] \dots \text{Ec. (3)}$$

Si se considera:

$$\left(-\frac{\phi U C_{tr_w}^2}{4kt} \right) < 0.01 \dots \text{Ec. (4)}$$

Entonces:

$$P_{wf} = P_i - \frac{quB}{4\pi kh} \left[\log \left(\frac{kt}{\phi U C_{tr_w}^2} \right) - 0.80907 + 2S \right] \dots \text{Ec. (5)}$$

Esta ecuación resulta en un gráfico lineal de P_{wf} como función del logaritmo de tiempo, la pendiente de esta línea recta es:

$$m = \frac{quB}{4\pi kh} \text{ de la cual se puede obtener kh:}$$

$$kh = \frac{quB}{4\pi m}, \text{ finalmente se reescribe la ecuación 5:}$$

$$P_{wf} = P_i - \frac{162.6 quB}{kh} \left[\log \left(\frac{kt}{\phi U C_{tr_w}^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right] \dots \text{Ec. (6)}$$

$$\text{Donde } m = \frac{162.6 quB}{kh} \dots \text{Ec. (7)}$$

La gráfica típica de presión versus logaritmo de tiempo para un drawdown se muestra en la figura 5 y junto a ésta también se muestra su curva correlacionable

para un build up llamada gráfica de Horner (ver Figura 5).

Una de las principales desventajas de este tipo de prueba es la dificultad de mantener la tasa constante en superficie, sin alterar condiciones del equipo en fondo, diámetros de tubería, estranguladores, etc. (Jelmert, 2013).

- Análisis de caudal transiente (rate transient analysis, RTA).

RTA es una extensión de las pruebas de pozo (well testing) y del análisis transiente de presión (PTA), básicamente combina la ley de Darcy, las ecuaciones de estado y el balance de materia. Mientras el pozo está produciendo, se puede obtener mucha información sin la necesidad de cerrarlo, con el fin de caracterizar y obtener el diagnóstico de yacimientos (Hesham, 2019).

Las bases del análisis transiente de caudal son las ecuaciones tradicionales de declinación de producción de Arps (1945) (ver Figuras 6 y 7).

El análisis de declinación tradicional es aplicable solamente cuando el flujo está dominado por las condiciones de límite. Fetkovich usó las ecuaciones de flujo analíticas para generar curvas tipo para el flujo transiente y las combinó con las ecuaciones de declinación empíricas de Arps. Las curvas tipo resultantes abarcaron toda la vida productiva del pozo caracterizadas por las siguientes ecuaciones (ver Figura 8):

Caudal adimensional:

$$q_{Dd} = q_D \left[\ln \left(\frac{re}{r_{wa}} \right) - \frac{1}{2} \right] \dots \text{Ec. (8)}$$

Tiempo adimensional:

$$t = \frac{t_D}{\frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{re}{r_{wa}} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \left[\ln \left(\frac{re}{r_{wa}} \right) - \frac{1}{2} \right]} \dots \text{Ec. (9)}$$

La parte izquierda de la curva de Fetkovich describe el flujo transiente. En la curvas tipo de Fetkovich el flujo transiente es representado por un set de curvas que representan diferentes tamaños de reservorio (re/rw). Desde esta parte de las curvas tipo se puede estimar las características del reservorio (permeabilidad, daño y radio efectivo del pozo (Mohamed Aly, 1980).

La parte de la derecha de las curvas tipo describe los efectos de límite donde Fetkovich combinó su solución con las ecuaciones de Arps usando las ecuaciones de caudal y tiempo adimensional y demostró que el caudal adimensional es exponencialmente dependiente del tiempo adimensional (Mohamed Aly, 1980).

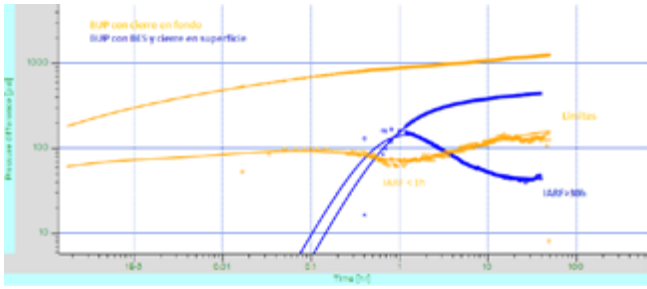


Figura 1. Log-log plot, bup con cierre de fondo vs. cierre en superficie.
Fuente: ENAP.

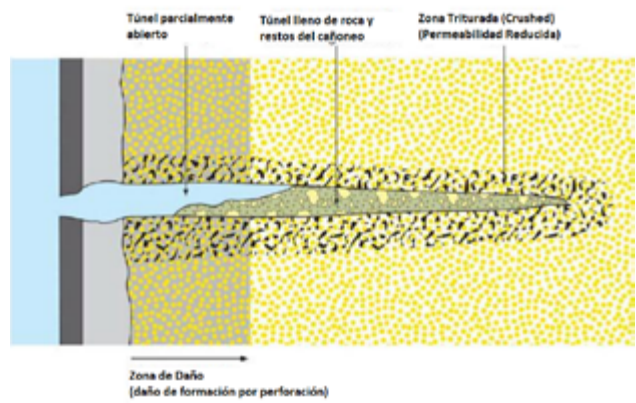


Figura 2. Túnel de perforación.
Fuente: Jawad F.

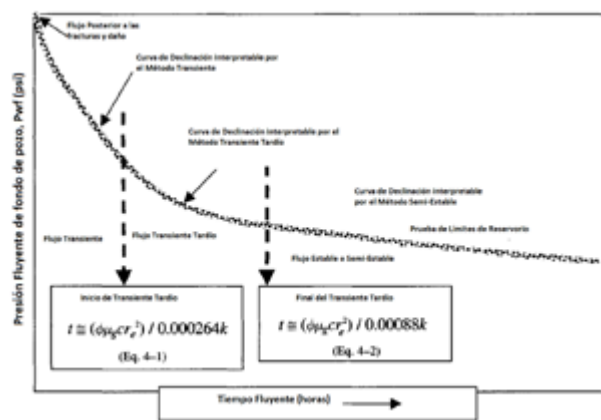


Figura 3. Comportamiento de presión y caudal-drawdown test.
Fuente: Chaudhry (2004).

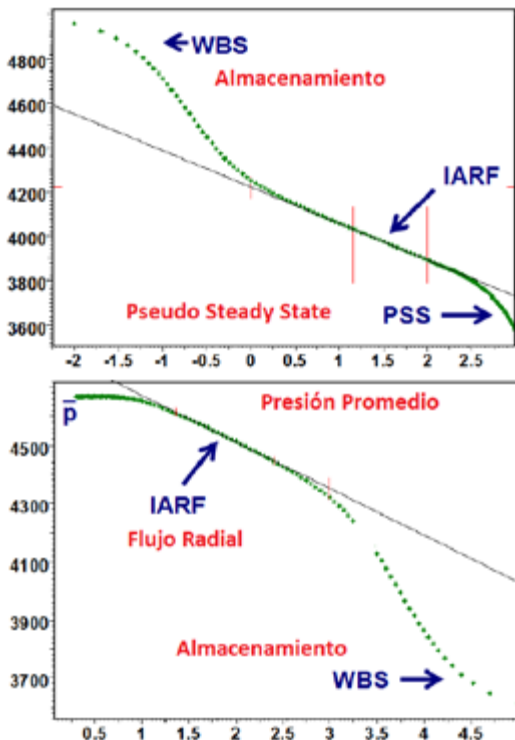


Figura 5. Semilog plot-drawdown analysis vs. Horner plot (build up). (Houzé et al., 2019).

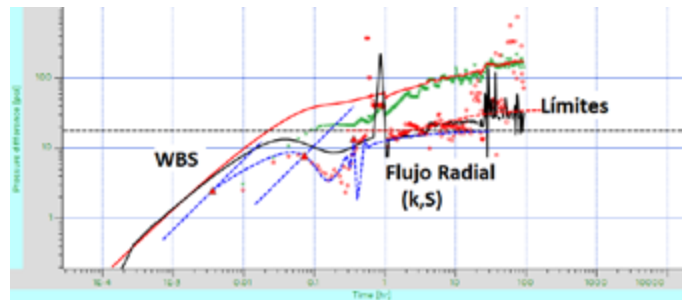


Figura 4. Prueba de drawdown pozo mdc-40, arenisca T inferior.
Fuente: ENAP.

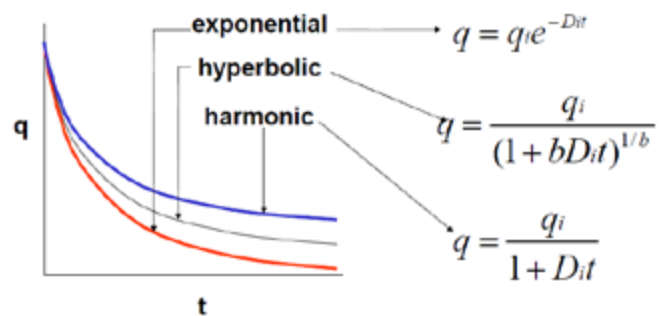


Figura 6. Ecuaciones de declinación.
Fuente: Rate transient analysis theory/software course, fast rta.

$$q_{Dd} = e^{-tDd} \quad \text{Ec. 10}$$

La ecuación anterior es la misma ecuación de Arps para una declinación exponencial donde $b=0$. Esta misma solución se extiende al comportamiento hiperbólico y a todo tipo de declinación que ocurre en las condiciones de límite.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez evaluado la calidad de la cementación original en el pozo, se procede a bajar el sistema de cañoneo autodesprendible, se correlaciona a profundidad del intervalo de interés y se asienta el sistema. Luego se arma BHA y equipo BES para desplazarlo hasta la profundidad de diseño de Intake, se realiza prueba de giro y se llena el pozo nuevamente (ver Figura 9). Con el equipo en fondo y el pozo lleno, se activan los cañones en fondo por medio de pulsos de presión desde superficie, el tiempo de detonación usado en promedio para los pozos de ENAP es de 14 horas, durante este tiempo se enciende el equipo para evacuar el fluido del pozo y llegar al nivel que corresponde al bajo balance estático para nuevamente apagar el equipo y esperar la detonación de los cañones.

El sensor de fondo y la transmisión de data en tiempo real permite monitorear toda la actividad en el pozo, desde la activación de los cañoneos, pasando por la evacuación del fluido de pozo para generar el bajo balance, la detonación de los cañones y la fase de surgencia del pozo donde la presión de yacimiento se iguala con la presión de la columna de fluido en el anular, permitiendo medir la presión estática del yacimiento y finalmente la prueba de declinación de producción y las pruebas multitasa.

Caso histórico, pozo MDC-32

El pozo MDC-32 se ubica en el norte del bloque 46 en la región Amazónica del Ecuador (cuenca Oriente), dentro del campo denominado Mauro Dávalos Cordero (MDC), es un pozo direccional de desarrollo con una profundidad total de 10.088 pies TVD. El yacimiento seleccionado para la completación y pruebas iniciales fue la arenisca T inferior (TI).

La figura 10, muestra la gráfica de presión vs. tiempo junto con los eventos relacionados con el cañoneo y la medición de presión estática del yacimiento por balance hidrostático entre la columna de fluido presente en el pozo y la presión del yacimiento (ver Figura 10). La finalización de la fase de surgencia del pozo, donde se alcanzan condiciones cercanas al balance hidrostático, corresponde al punto de inicio de la prueba de declinación de

presión (drawdown) y posteriormente el análisis de caudal transiente.

Los resultados del análisis del pozo MDC-32 (ver Figura 11), indican un yacimiento homogéneo, con un factor skin negativo y la presencia de límites en forma de canal. La presión alcanzada en el balance hidrostático luego de 10 horas fue 1198 psia. La permeabilidad (κ) obtenida del modelo Log-Log es 129 md, valor consistente con el rango de permeabilidad en el campo MDC, reservorio T inferior. Dato adicional y no menos importante es el tiempo transcurrido entre el fin de la perforación y el arranque o puesta en producción definitiva del pozo, que en el caso del MDC-32 fueron 10 días, tiempo marcadamente inferior comparado con el promedio histórico de 15 días.

Caso histórico, pozo Inchi-B10

El pozo Inchi-B10 se ubica en el norte del bloque 47 en la región Amazónica del Ecuador (cuenca Oriente), dentro del campo denominado Inchi, es un pozo direccional de desarrollo con una profundidad total de 10.259 pies TVD. El yacimiento seleccionado para la completación y pruebas iniciales fue la arenisca U inferior (UI), la cual se presenta como un reservorio de 38 pies de espesor total, con dos cuerpos de arenisca de buena calidad, separados por un cuerpo de lutita.

Los resultados de la evaluación y el análisis de caudal transiente indican un yacimiento doble permeabilidad consistente con lo observado en el registro de pozos. El skin estimado es $-4/10$ para cada una de las capas identificadas. La presión del modelo es 1118 psia y se logra identificar una discontinuidad (límite) a una distancia de 1081ft (ver Figura 12).

El histórico de los trabajos de completación desde el 2005 registra varias técnicas de completación, estas se puedan categorizar en:

- Cañoneo convencional: Cable o TCB, requieren un BHA antes de la completación definitiva por lo que se necesita controlar el pozo después del cañoneo (presión hidrostática > 4000 psi, presión de yacimiento < 2500 psi).
- Cañoneo no convencional: auto desprendible y programables, no requiere de control de pozo y BUP para estimar presión estática de reservorio, permeabilidad, daño y límites, por ende, se descarta apagar equipo BES luego de la puesta en operación.

En los 20 trabajos de completación analizados, el tiempo promedio para los trabajos de cañoneo convencional es 16,5 días, para los trabajos con cañoneo no convencional donde se realizaron BUP test es 15,6

Nominal (true) Decline Rate:

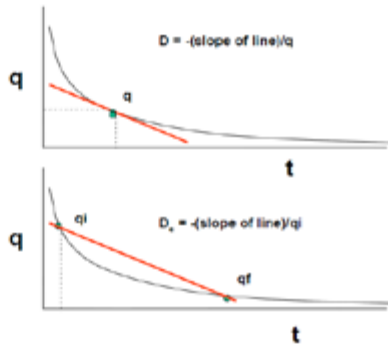
$$D = -\frac{dq}{q dt}$$

$$D = -\ln(1 - D_e)$$

Effective Decline Rate:

$$D_e = \frac{q_i - q_f}{q_i}$$

$$D_e = 1 - e^{-D}$$



In RTA, "D_e" is referred to as "d", and is expressed as a percentage

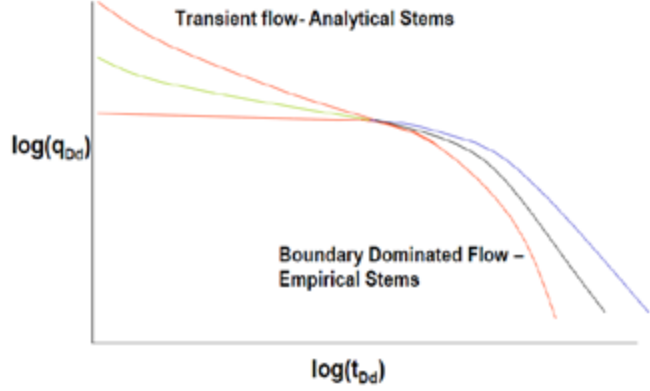


Figura 7. Declinación Nominal y Efectiva.
Fuente: Rate transient analysis theory/software course, fast rta.

Figura 8. Gráfico de Fetkovich.
Fuente: Rate transient analysis theory/software course, fast rta.

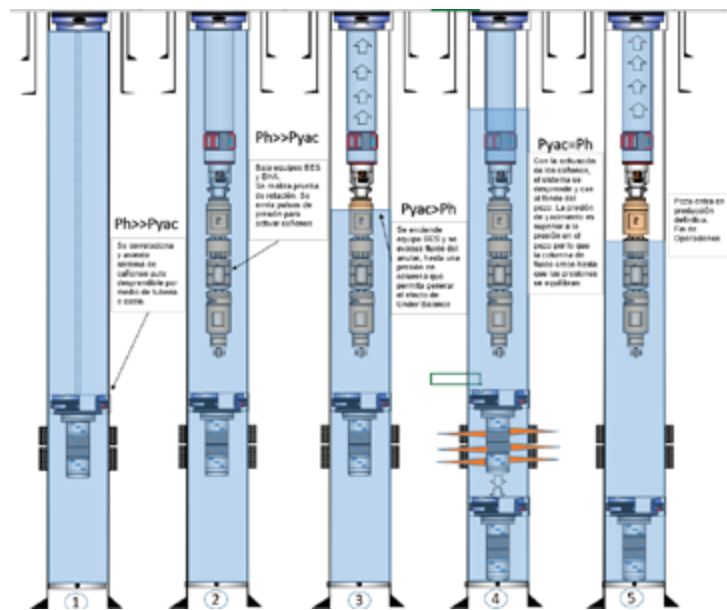


Figura 9. Secuencia operativa en pozo.
Fuente: ENAP.

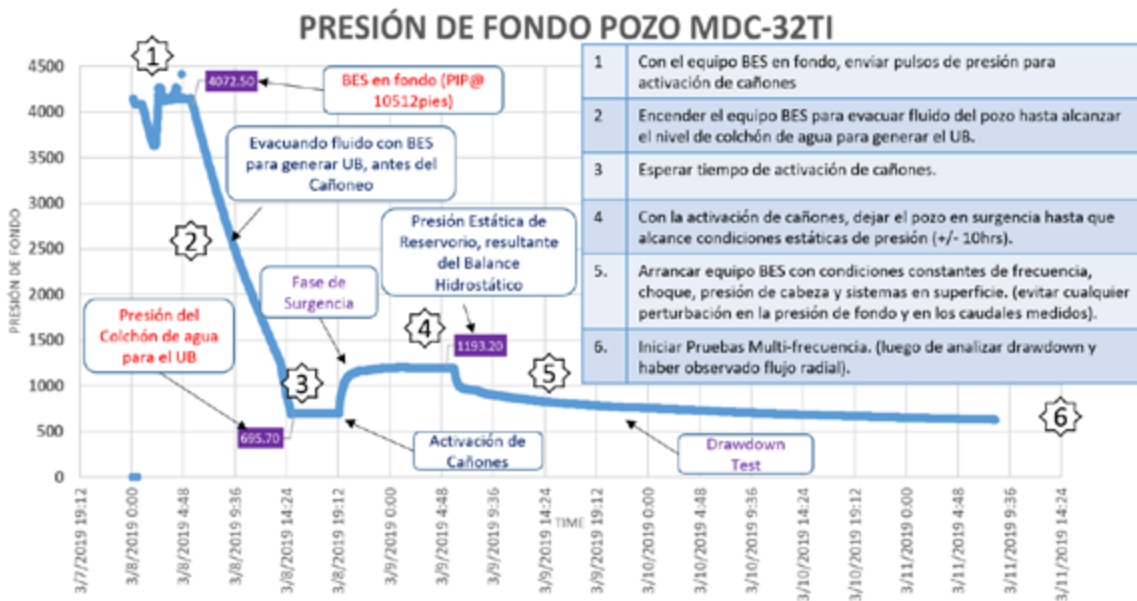


Figura 10. Presión de fondo durante la completación de pozo mdc-32.
Fuente: ENAP.

días y, finalmente, usando el balance hidrostático poscañoneo *más el drawdown analysis* y el RTA el tiempo para la puesta en producción definitiva del pozo se redujo a 7 días (ver Figura 13).

Tomando en cuenta que en los casos donde existe control de pozo, la invasión de fluido al reservorio impacta negativamente en el tiempo para alcanzar condiciones estables de corte de agua, este tiempo es considerablemente menor con el cañoneo no convencional, reduciendo ampliamente el tiempo para llegar al potencial neto una vez arrancado el pozo. En el caso de análisis entre el pozo MDC-22, donde se usó TCP y el pozo MDC-36 con cañoneo no convencional, la relación de tiempos (horas) para alcanzar el corte de agua estabilizado es 131/26.

Caso histórico, RTA vs. BUP, pozo MDC-41

El pozo MDC-41 ubicado en el bloque 46, campo MDC, se perforó y completó a finales del año 2019. El reservorio evaluado fue la arenisca T inferior. Durante el RTA el modelo de yacimiento obtenido fue un reservorio homogéneo con la presencia de límites cercanos, estos límites caracterizaban a T inferior como un yacimiento volumétrico. Con el inicio de producción histórica del pozo se observó una rápida y drástica caída de presión y aporte, para descartar el escenario de un daño de formación por migración de finos, se decidió tomar un build up test.

Los resultados de la figura 14, muestran los análisis por el método doble logaritmo (log-log plot), tanto del RTA como del bup, se puede observar que ambos modelos tienen similitudes en la descripción del yacimiento (doble permeabilidad) y la presencia de límites cercanos que, en conclusión, son la causa del comportamiento en la caída de la presión, se descartó la presencia de daño de formación (ver Figura 14).

CONCLUSIONES

- El uso de cañoneo no convencional adelanta la puesta en producción definitiva en los pozos de los

bloques 46 y 47, evita el cañoneo en sobre balance, el uso de BHA de disparo y evaluación donde se requiere control de pozo y, además, se alcanza más rápido las condiciones de BSW estables, alcanzando el potencial neto de manera temprana.

- El análisis de productividad de pozo (requisito para solicitar máxima tasa de producción al Ministerio) fue realizado sin tener una prueba de restauración de presión (BUP) con base en la data observada en el balance de presiones poscañoneo y a la interpretación del drawdown y RTA, obteniendo presión estática, permeabilidad, daño (skin) y límites del yacimiento. Al evitar el BUP ya no se requirió apagar y volver a encender el equipo BES lo cual afecta su run life.
- La reducción en tiempo promedio para la puesta en producción definitiva entre el cañoneo convencional y el no convencional sin necesidad de BUP es 5 *días y considerando el tiempo para alcanzar condiciones estables de BSW*, se prolonga hasta los 8 días, tiempo que impacta de manera sensible en los ingresos del Estado ecuatoriano y de la compañía operadora.
- El cañoneo no convencional evita fases de control de pozo y usa los beneficios del disparo bajo balance estático y dinámico, logrando pozos estimulados y con tiempos de puesta en producción más cortos.
- El análisis de declinación de presión (drawdown analysis) y caudal transiente (RTA) permite estimar la permeabilidad y el daño de formación de manera consistente y en forma similar al BUP, sin necesidad de cerrar el pozo y su comportamiento puede ser constantemente monitoreado y actualizado gracias a los equipos de transmisión de data en tiempo real.
- El balance de presiones después del cañoneo permite conocer la presión estática del reservorio mediante el concepto de vasos comunicantes y, al iniciar una prueba de declinación desde este punto, nos permite tener consistencia en el análisis de pozo para determinar propiedades que antes se estimaban a partir de un BUP.

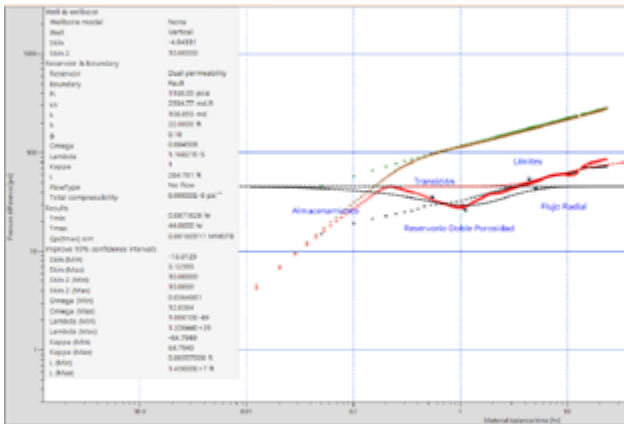


Figura 11. Log-log plot del caudal transiente, pozo mdc-32. Fuente: ENAP.



Figura 13. Evolución histórica. Tiempo entre la finalización del evento de perforación y la puesta en producción definitiva del pozo. Fuente: ENAP.

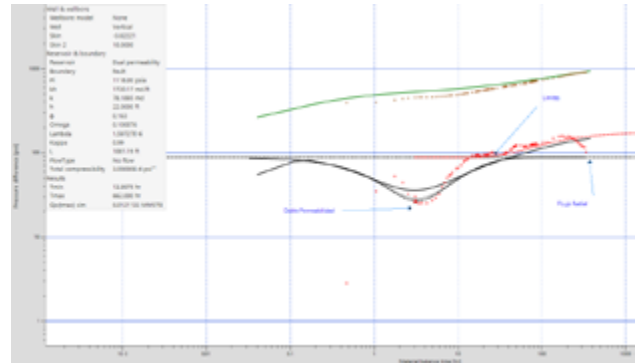


Figura 12. Log-log plot del caudal transiente, pozo Inchi-B10. Fuente: ENAP.

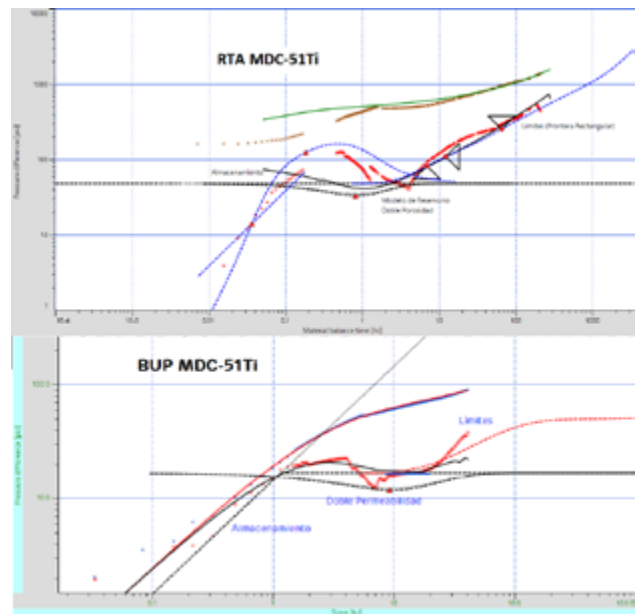


Figura 14. Pozo mdc-51, reservorio T inferior rta vs. bup. Fuente: ENAP.

REFERENCIAS

Chaudhry A. 2004. *Oil well testing handbook*. Advanced TWPSON Petroleum Systems, Inc. Houston, Texas. ISBN: 0-7506-7706-6.

Escobar F. 2010. *Análisis moderno de pruebas de presión*. Editorial Universidad Surcolombiana, abril 2010. ISBN 958-8154-81-2.

Halliburton. julio 2017. *Perforation Solutions*. Services Brochure.

Hesham Mokhtar Ali. 2019. Rate transient analysis (RTA; Theory & Benefits). Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/rate-transient-analysis-rta-theory-benefits-hesham-mokhtar-ali/>, (ingresado el 24 de marzo de 2019)

Houzé O. et al. 2019. *Dynamic Data analysis*. Kappa, v5.20. 2019

Jawad F. 2012. *Importance of perforation process and its techniques* (Thesis). Dalhousie University, February 2012.

Jelmert T. 2013. *Introductory well testing*. e-book. www.bookboon.com. ISBN: 978-87-403-0445-9.

Kuiper I. 2009. *Well testing in the framework of system identification* (Thesis). Delft University of Technology, February 2009.

Mohamed Amr Mohamed Abdelhamid Aly. 2018. *Rate transient analysis and flowing material balance for oil & gas reservoir* (Thesis). Politecnico di Torino.

Rate transient analysis theory. Fekete software course material.



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

COMPORTAMIENTO DEL MARGEN DE REFINACIÓN EN EL SECTOR HIDROCARBURÍFERO DEL ECUADOR EN EL 2018

Behavior of the refining margin in the hydrocarbon sector of Ecuador in 2018

Carlos Carrillo Villavicencio
Universidad Central del Ecuador
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9999-0467>

Rony Parra Jácome
Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas
Universidad Central del Ecuador
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2942-7449>

Recibido: septiembre de 2020

Aprobado: mayo de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: 10.29166/revfig.v11i1.2630

RESUMEN

El margen de refinación es un indicador financiero que diferencia los ingresos de los productos refinados y los costos del petróleo crudo y otros insumos que intervienen en el proceso de refinación. Este indicador también puede ser mejorado, incluyendo costos adicionales por la operación y mantenimiento de la infraestructura de refinación, lo cual acerca su resultado a un margen neto de producción. La dinámica del margen de refinación está condicionada por la eficiencia técnica en términos de diseño y operación de una refinería, así como también por las condiciones de precios del petróleo y sus derivados en los mercados internacionales. El margen de refinación del sector hidrocarburífero del Ecuador fue analizado para fijar puntos de referencia sobre la rentabilidad del negocio de refinación en el país. Se identificaron los flujos de los productos finales que se obtienen en cada una de las refinerías, la materia prima (crudo Oriente), diluyentes, condensados y/o productos importados que se utilizan para el proceso del *blending*. Además, se reconoció los costos de operación para obtener los productos terminados bajo parámetros de calidad normados por el Estado, que luego son comercializados en el mercado interno y externo. Los precios de las materias primas y productos finales fueron obtenidos a partir de un *benchmark* de agencias internacionales, publicados de manera mensual e inferidos de acuerdo a la calidad del petróleo y derivados, que son utilizados y producidos en las refinerías nacionales. El estudio muestra que la dinámica del margen bruto de refinación cambia de acuerdo a la variabilidad del precio internacional del petróleo, ya que los precios de los refinados se encuentran indexados al precio de la comercialización del petróleo. Aunque este estudio no pretende informar sobre la política energética, sino mostrar una metodología transparente para analizar la rentabilidad de las diferentes refinerías aplicada al caso ecuatoriano, los resultados obtenidos pueden ser una aproximación para informar la situación de las refinerías con fines de política pública, para lo cual es preciso que los datos sean analizados y mejorados en futuros trabajos. En el 2018 las refinerías de Esmeraldas, La Libertad y Shushufindi mostraron valores promedios mensuales del margen bruto entre USD 2,3 a 9,4 dólares por barril, sin embargo, de acuerdo a los informes de EP Petroecuador el costo de operación promedio de las tres refinerías en el año de estudio fue de 6,24 dólares por barril, lo cual reduciría su competitividad en el mercado.

PALABRAS CLAVE Refinación, margen bruto de refinación, margen neto de refinación, costo de refinación, procesos de refinación.

KEYWORDS Refining, gross refining margin, net refining margin, refining cost, refining processes.

ABSTRACT

The refining margin is a financial indicator that differentiates the income from refined products and the costs of crude oil and other inputs involved in the refining process. This indicator can also be improved, including additional costs for the operation and maintenance of the refining infrastructure, which relates to its result at a net production margin. The dynamics of the refining margin is conditioned by the technical efficiency in terms of the design and operation of a refinery, as well as the price conditions of oil and its derivatives in international markets. The refining margin of the hydrocarbon sector in Ecuador was analyzed to set benchmarks on the profitability of the refining business in the country. The flows of the final products obtained in each of the refineries, the raw material (crudo Oriente), diluents, condensates and/or imported products that are used for the blending process were identified. In addition, the operating costs were recognized to obtain the finished products under quality parameters regulated by the State, which are then commercialized in the internal and external market. The prices of raw materials and final products were obtained from a reference point from international agencies, published monthly and inferred according to the quality of oil and derivatives, which are used and produced in national refineries. The study shows that the dynamics of the gross refining margin changes according to the variability of the international price of oil, since the prices of refined products are indexed to the price of oil commercialization. Although this study does not intend to report on energy policy, but rather to show a transparent methodology to analyze the profitability of the different refineries applied to the Ecuadorian case, the results obtained can be an approximation to inform the situation of the refineries with public policy fines, to which is necessary that the data be analyzed and improved in future work. In 2018, the Esmeraldas, La Libertad and Shushufindi refineries showed average monthly gross margin values between USD 2.3 to 9.4 dollars per barrel, however, according to reports by EP Petroecuador, the operating cost of the three refineries in the year of study was 6.24 dollars per barrel, which would reduce their competitiveness in the market.

INTRODUCCIÓN

El proceso de refinación corresponde a la etapa intermedia de la cadena de valor de los combustibles fósiles, que va desde la exploración de reservas petroleras, extracción de petróleo, transporte, procesos de refinación para finalmente distribuirlos y comercializarlos en el mercado local o internacional para sus usos finales en la sociedad.

El sistema ecuatoriano de refinación consta de tres refinерías principales y algunas plantas *topping* que sirven para el autoconsumo en los procesos de extracción de petróleo (no fueron consideradas en este estudio) i) Refinería La Libertad-RLI con capacidad de procesamiento de 45 mil barriles por día, empezó sus operaciones en 1968 y fue diseñada a partir de los procesos de destilación simple para procesar el petróleo ligero proveniente de los campos del litoral, principalmente de yacimientos del campo Ancón y otras mezclas de hidrocarburos; ii) Refinería estatal Esmeraldas-REE, empezó sus operaciones en 1977

con una capacidad de procesamiento de 98 mil barriles por día, luego en 1997 se incrementó a 110 mil barriles por día, capacidad que se mantiene hasta la actualidad. Cuenta con sistemas de fraccionamiento catalítico y reformado de naftas que ayudan a optimizar los productos livianos como GLP, gasolinas y diésel; iii) Complejo industrial Shushufindi-CIS, inició sus operaciones en 1987 con una capacidad de procesamiento de 10 mil barriles por día, luego en 1997 se realizó una ampliación a 20 mil barriles por día, además cuenta con una planta de gas que procesa el gas asociado provenientes de los campos petroleros del Oriente, con una capacidad de procesamiento de 25 millones de pies cúbicos de gas por día (ver Figura 1).

El parque refinador del Ecuador cuenta en la actualidad con una capacidad nominal instalada para el procesamiento de 175 mil barriles de petróleo por día que se ha mantenido estática desde 1997, fecha en la que se amplió la capacidad de la refinería de Esmeraldas a 110 mil barriles por día (EP Petroecuador, 2018).

Esta capacidad de procesamiento no es suficiente para abastecer la creciente demanda nacional de combustibles. En el 2018 se consumieron 91 millones de barriles de refinados, mostrando un crecimiento del 5% con respecto al año anterior. La elevada dependencia de las sociedades a los combustibles fósiles muestra un rápido crecimiento en el consumo; por ejemplo, en el período 2000-2019 la demanda del Ecuador en gasolinas y diésel creció en promedio 5% anual y el GLP en 3% anual.

Como se observa en la figura 1, la capacidad de refinación estática y el rápido crecimiento del consumo de refinados, generan un desequilibrio entre la oferta y la demanda, por lo cual el Estado se ve en la necesidad de cubrir esa brecha con combustibles importados para garantizar el abastecimiento seguro de derivados y mantener la dinámica socioeconómica del país. En el mismo período de análisis las importaciones crecieron en promedio un 13% anual, reflejando un total por importación entre gasolinas, diésel y GLP de 49 millones barriles en el 2018 (ver Figura 2).

De acuerdo con la clasificación por tipología de refinerías propuesta por El-Gendy and Speight (2015) se muestra que las refinerías de Shushufindi y La Libertad mantienen procesos de *baja conversión* (unidades de destilación simples), mientras que la refinería de Esmeraldas se la considera como de *mediana conversión* por sus procesos de mayor complejidad (unidad de fraccionamiento catalítico fluidizado, FCC), no obstante, el parque refinador no cuenta con procesos de alta y profunda conversión que involucren unidades para procesamiento de residuos y mejoramiento de los estándares ambientales (ver Figura 3). En el 2019 las refinerías produjeron producto residual en un 30% en Esmeraldas, 47% en Shushufindi y 61% en La Libertad como se muestra en la figura 3 (Petroecuador, 2019).

A su vez, el deterioro de la calidad del petróleo por la escasez de reservas de crudo liviano y medio en los campos de la Amazonía ecuatoriana puede afectar a la productividad de la infraestructura instalada de refinación, cuyo API de diseño fue de 23 a 30 para Esmeraldas, 28-30 para La Libertad y 29 para Shushufindi (Baquero, 2006).

En los últimos 12 años han existido intenciones del Estado para modernizar y ampliar la capacidad de procesamiento de las refinerías. En 2008 se creó la empresa mixta Refinería del Pacífico entre Ecuador y Venezuela para construir una refinería de alta conversión con capacidad de procesamiento de 300 mil barriles por día (RDP plan institucional, 2016). Entre junio de 2014 y febrero del 2015 se realizaron trabajos de modernización en la refinería de Esmeraldas en

cuyo caso se recuperó la capacidad de procesamiento de la FCC y otras unidades y utilidades de la refinería que se encontraban con problemas de operación (EP Petroecuador, 2015). El 10 de julio de 2020 el Estado, vía Decreto Ejecutivo N.º 1094, decidió «autorizar con carácter excepcional la delegación a la iniciativa privada de la gestión conjunta de la refinería Esmeraldas con la EP Petroecuador» para generar las inversiones en procesos de alta conversión y mejoramiento de la calidad de los combustibles (Decreto Ejecutivo N.º 1094, 2020).

También se planteó nuevamente la necesidad de incrementar la capacidad instalada del país con la construcción de una nueva refinería que tendría una capacidad de refinación de entre 150 y 300 mil barriles de petróleo por día que incluiría plantas de conversión profunda para la producción de combustibles bajo la norma Euro 5, es decir, con bajas cantidades de azufre (Ortiz, 2020).

Es clara la preocupación y la necesidad del Estado por modernizar y mejorar la infraestructura de refinación del país, sin embargo, su estrategia ha resultado poco efectiva. La operación de las refinerías nacionales no logra abastecer la demanda nacional de derivados y parte de la producción de combustibles no consigue cumplir con los parámetros de calidad en términos de contenido de azufre y octanos que se estipula en la norma INEN 935 para gasolinas e INEN 1489 para diésel, por lo cual, dentro del modelo de gestión se realizan mezclas (*blending*) con productos importados para cumplir los parámetros establecidos en la normativa nacional (EP Petroecuador, 2019).

Los problemas arriba detallados, reducen la competitividad de las refinerías en el Ecuador, lo cual se ve impactado, además, por las fluctuaciones de los precios de la materia prima y de los derivados, lo cual se mostrará en el desarrollo de este estudio al analizar el parque refinador, calculando el comportamiento de los márgenes de refinación de las tres refinerías del país.

METODOLOGÍA Y OBTENCIÓN DE DATOS

El margen bruto de refinación es utilizado como un indicador de la rentabilidad de las operaciones de una refinería (Ramkumar, 2016). Se calcula relacionando los ingresos totales de las ventas de productos refinados menos el costo del petróleo crudo y otras materias primas. El margen neto se define como el margen bruto menos los costos de comercialización de productos derivados del petróleo, los costos internos de energía y otros costos operativos (Gary *et al.*, 2004).

De acuerdo con Lluch Urpi (2011), la función económica para el margen neto está definida por la

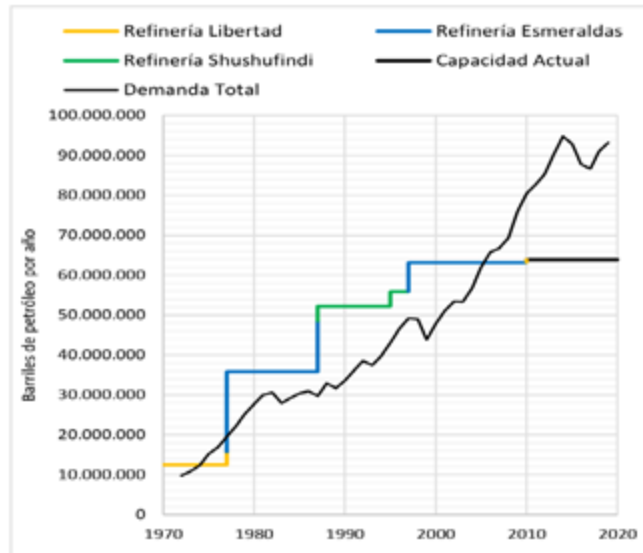


Figura 1. Construcción de las refinерías y crecimiento de la demanda nacional de derivados.
Fuente: EP Petroecuador.

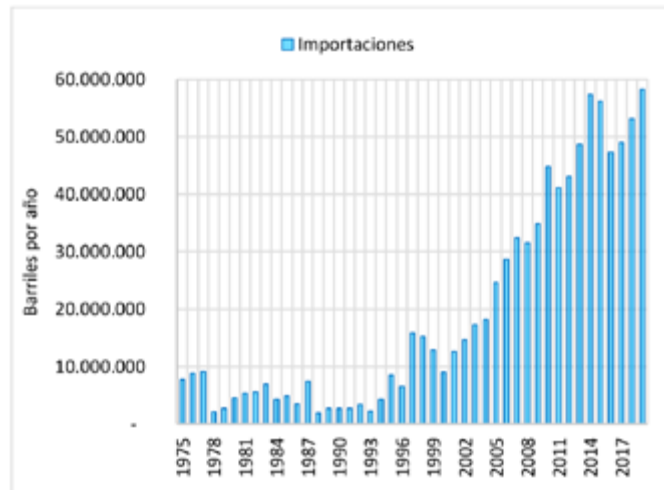


Figura 2. Volumen anual de importaciones de combustibles en el Ecuador.
Fuente: EP Petroecuador.

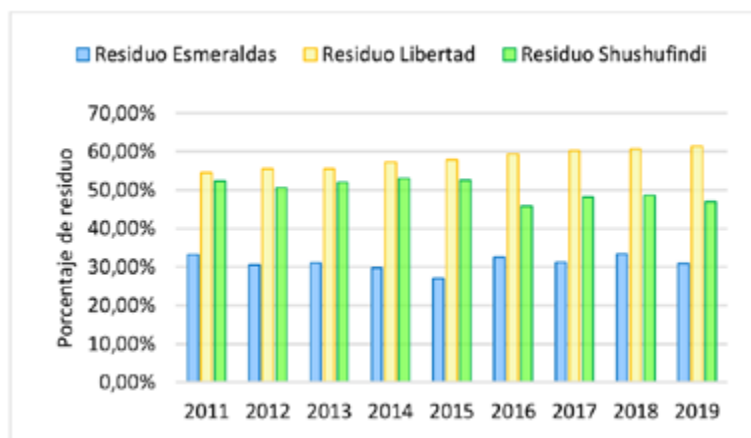


Figura 3. Residuo generado por refinерías.
Fuente: EP Petroecuador.

expresión: valor económico de las ventas —costo económico de las compras— costos de operación variables. Para el estudio de caso, la expresión matemática (Ec. 1) fue ajustada a la realidad del parque refinador del país, incluyendo los costos de otros productos que se usan para el *blending*, establecido de la siguiente manera:

Margen neto de refinación
= Ingresos totales - costos por materia prima - Costos por productos para *blending* - Costos de operación

De lo cual se deriva a lo siguiente:

Margen neto de refinación
= $(\sum \text{Volumen Refinados}_i * \text{Precio}_i)$
- $(\sum \text{Volumen Crudo}_j * \text{Costo}_j)$
- $(\sum \text{Volumen Productos para blending}_k * \text{Costo}_k)$
- Costos de operación
Ec. (1)

Los ingresos incluyen lo recaudado por comercialización de gasolinas, diésel, GLP y otros refinados que se consumen en su mayoría en el interior del país, además de la exportación del *fuel oil* que es producto de la mezcla entre el residuo producido y cutter stock importado.

El costo por materia prima, se refiere al crudo Oriente que tiene una gravedad API cercana a 23,5 °API con 1,5% de contenido de azufre (Banco Central del Ecuador, 2009), mientras que los costos de los productos para el *blending* se refieren a los combustibles importados para las mezclas con productos refinados intermedios, para alcanzar los parámetros mínimos de calidad establecidos en la normativa local (consumo interno) e internacional (exportaciones).

Los costos operativos consideran los gastos corrientes (salarios, servicios y mantenimiento de la infraestructura, gastos en energía, entre otros) incurridos por cada refinación. Para este caso se consideró el valor unitario promedio de USD 6,2 dólares por barril, reportado por la gerencia de Refinación de EP Petroecuador.

El éxito para calcular el margen no solo contempla el manejo de datos volumétricos sino también estará dado por el acceso y conocimiento de los precios del petróleo y de los productos refinados en los mercados en donde tienen acceso los flujos de las refinaciones. Los precios de los *commodities* se consideran volátiles y están fuera del control de cualquier participante en las transacciones de compra y venta de hidrocarburos.

Para garantizar el detalle de la información, res-

pecto a los valores volumétricos y monetarios se estableció el siguiente diagrama de flujo (ver Figura 4).

Se recabó información tomando en cuenta las principales variables inmersas en la Ec. 1 para cada refinación del país: 1) Carga de petróleo: corresponde a crudo Oriente que es transportado por el SOTE desde los campos petroleros de la Amazonía ecuatoriana hasta la provincia de Esmeraldas en el terminal de Balao, para ser luego distribuido a la refinación de Esmeraldas. Para abastecer de petróleo a la refinación La Libertad se incurre en un proceso logístico mayor, puesto que es necesario el transporte del petróleo vía cabotaje (buques) desde Esmeraldas a la Libertad. Para la refinación de Shushufindi por su cercanía al área de extracción de petróleo, la entrega se lo realiza directamente de los campos a través de líneas de oleoducto secundarias. La carga a las refinaciones se obtuvo de los reportes estadísticos mensuales de EP Petroecuador y el costo por materia prima fue tomado de la base del Banco Central, cuyo valor refleja el precio de las exportaciones de crudo Oriente referido al marcador WTI (ver Figura 5).

2) Productos importados: Se tomó en cuenta los productos que intervienen en los procesos de *blending* para la obtención de productos finales. Se importa a) cutter stock, para la obtención de *fuel oil* de exportación (0,3 cutter stock + 0,7 residuo) b) nafta de alto octano NAO, para la obtención de gasolinas (0,4 NAO + 0,6 nafta base de las refinaciones).

La composición de las mezclas en las refinaciones es dinámica y dependerán de las condiciones de la carga y de la operación. Para este estudio los volúmenes fueron estimados de los reportes mensuales de la EP Petroecuador, al igual que su costo. Se consideró el precio de las importaciones CIF que realiza el Estado, por lo cual este valor incluirá los costos incurridos en el transporte.

3) Productos refinados finales generados en cada refinación destinados al mercado interno como: gasolinas, diésel, GLP, gasolina de aviación, asfaltos azufre, solventes, *fuel oil* y residuo y al mercado externo como: *fuel oil* n.º 4 y n.º 6 y en ocasiones gasóleo VGO. Los datos fueron recabados de las bases estadísticas de ARCH y EP Petroecuador.

Los precios de comercialización se estimaron suponiendo un mercado internacional sin considerar rubros de subsidios de comercialización en el mercado local. Se tomó en cuenta los valores de los combustibles disponibles en las bases estadísticas de la Agencia Internacional de Energía comercializados en el golfo de los Estados Unidos y acorde a la calidad de los productos refinados en el Ecuador. Para los precios de los refinados que no se disponía de in-



Figura 4. Diagrama de flujo para determinar el margen de refinación en una refinería del Ecuador.

formación (por diferenciación de calidad), se estimó un precio con referencia al combustible de mayor calidad.

Explorando el margen de refinación en otras refineries

La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), la Agencia Internacional de Energía (IEA) y BP son algunas de las agencias que realizan análisis mensuales de los márgenes de refinación de las principales regiones del mundo considerando el tipo de crudo y la configuración de cada refinería. Los principales centros de refinación analizados corresponden a infraestructuras de alta y profunda conversión. Por ejemplo, en las refineries ubicadas en la región del golfo de los Estados Unidos se emplea en su mayoría crudo WTI, para las regiones de Europa y Rusia se consume crudo Brent y

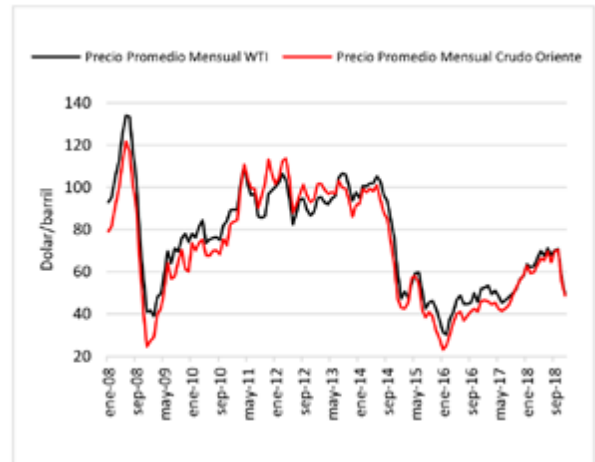


Figura 5. Histórico de precio del crudo WTI y crudo Oriente. Fuente: Banco Central del Ecuador (2019).

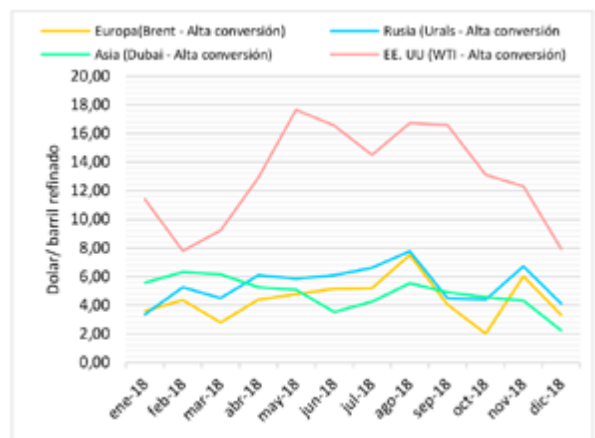


Figura 6. Comparación del margen de refinación por regiones. Fuente: IEA, Oil market report (2019).

Urals, respectivamente, mientras que para Asia el consumo del crudo corresponde al Dubái.

Para contrastar los resultados del presente estudio se tomó en cuenta el *benchmark* proporcionado por la Agencia Internacional de Energía, que muestra el comportamiento del negocio de refinación de manera mensual y diferencia el margen bruto obtenido por la calidad del crudo procesado en refineries de alta conversión. En el 2018 se observa que los márgenes de refinación regionales cayeron en varios meses como indica la figura 6, debido a que los productos derivados de petróleo incrementaron su almacenamiento por una desaceleración estacional de la demanda (ver Figura 6). La caída del margen en la región de Estados Unidos fue una de las más significativas en comparación a otras regiones (International Energy Agency, 2019).

El análisis regional nos permite comparar el rendimiento del parque refinador del Ecuador con otros complejos refinadores para medir su competitividad en los mercados internacionales, considerando variables como calidad de la materia prima, complejidad de las refinerías y la eficiencia en las operaciones.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el periodo analizado, el parque refinador procesó en promedio 160 mil barriles por día, reflejando un factor de operación del 91% con respecto a su capacidad nominal. La figura 7 indica la capacidad de operación en función de la carga de petróleo que procesan mensualmente las refinerías y que depende de la planificación operativa (mantenimientos) y de las paradas no programadas (cortes de energía, fallas operativas y eventos emergentes) (ver Figura 7).

Como resultado del proceso de refinación se muestra la producción de los principales productos

derivados a nivel nacional. En 2018 se produjeron 2,3 millones de barriles de GLP, 13,8 millones de barriles de gasolinas, 12,6 millones de barriles de diésel y 41 millones de barriles de otros derivados que incluyeron solventes, asfaltos, azufre, fuel oil, naftas base y crudo residual (ver Figura 8).

Los precios promedio mensuales del crudo Oriente y de los principales refinados muestran una tendencia paralela con respecto al crudo marcador WTI, estos precios corresponden a los productos identificados en la oferta nacional que generan las refinerías, de acuerdo con las bases estadísticas publicadas por la Agencia Internacional de Energía, representado en la figura 9 (ver Figura 9).

A continuación, se muestra la tabulación de los flujos mensuales en volumen y USD que entran y salen del proceso de refinación nacional, previa a determinar los valores del margen bruto (ver Tabla 1).

Tabla 1. Entrada y salida de productos en el parque refinador del Ecuador

Movimiento de productos en el parque refinador del Ecuador 2018																					
		Ingresos de materia prima						Producción de derivados de petróleo													
		Crudo		Nafta Alto Octano		Cutter Stock		Gasolinas		Diesel		GLP		Jet		Fuel Oil		Nafta		Otros	
Fecha	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	Barriles	USD	
ene-18	5.351.207	\$62,87	678.201	\$82,09	306.541	\$75,95	1.333.636	\$81,65	1.089.534	\$83,83	250.337	\$37,97	189.859	\$81,98	2.424.104	\$54,40	594.266	\$57,15	483.938	\$50,29	
feb-18	4.663.105	\$59,28	493.021	\$85,04	311.427	\$76,79	1.154.345	\$78,83	1.150.262	\$79,59	257.602	\$34,73	252.295	\$77,66	2.053.638	\$51,15	511.561	\$5,1838	425.133	\$47,43	
mar-18	4.967.180	\$59,86	362.683	\$82,50	392.821	\$71,07	1.000.346	\$87,36	1.008.089	\$79,59	236.111	\$33,10	265.101	\$78,04	2.235.240	\$51,84	558.827	61,152	465.754	\$47,89	
abr-18	4.735.982	\$63,17	387.518	\$87,91	344.304	\$78,76	962.331	\$92,95	969.012	\$85,22	201.141	\$34,48	175.814	\$84,63	2.193.760	\$56,28	640.687	65,0622	412.047	\$50,54	
may-18	5.028.733	\$66,72	604.184	\$93,92	364.086	\$84,62	1.117.428	\$96,39	1.272.672	\$91,60	181.454	\$38,51	282.761	\$90,51	2.152.904	\$62,56	502.460	67,473	475.096	\$53,37	
jun-18	4.868.577	\$65,29	550.534	\$93,21	337.560	\$84,82	1.192.404	\$89,71	1.005.629	\$88,28	168.817	\$36,96	315.199	\$87,78	2.158.623	\$62,67	700.214	62,7984	425.893	\$52,23	
jul-18	5.044.541	\$70,12	569.860	\$91,43	363.775	\$85,40	1.237.135	\$89,88	1.149.563	\$88,12	234.935	\$39,40	268.342	\$88,12	2.197.261	\$64,56	617.127	62,916	484.787	\$56,10	
ago-18	4.868.446	\$65,16	496.151	\$91,65	242.931	\$88,67	1.166.925	\$87,28	1.084.687	\$88,79	235.487	\$40,91	216.067	\$88,96	2.048.632	\$62,03	582.772	61,0932	499.395	\$52,13	
sep-18	4.833.290	\$69,47	577.501	\$91,25	400.770	\$90,43	1.165.541	\$93,41	1.012.547	\$92,82	230.953	\$44,39	248.300	\$91,94	2.177.787	\$65,34	529.478	65,3856	499.225	\$55,58	
oct-18	4.090.708	\$71,03	445.286	\$95,10	370.159	\$93,32	1.153.841	\$94,67	995.977	\$95,84	223.783	\$40,28	173.437	\$94,46	2.021.441	\$66,68	447.677	66,2676	422.762	\$56,83	
nov-18	4.709.659	\$57,46	518.457	\$84,84	226.356	\$90,78	1.129.959	\$73,04	1.028.882	\$82,40	244.067	\$31,29	289.504	\$81,69	1.867.070	\$59,93	532.126	51,1266	461.236	\$45,97	
dic-18	4.774.825	\$50,47	608.145	\$76,14	382.273	\$71,10	1.197.841	\$67,07	1.092.619	\$70,85	220.046	\$28,43	266.988	\$71,23	2.103.835	\$50,50	555.565	46,9518	520.592	\$40,37	

Fuente: EP Petroecuador 2018, Banco Central e IEA.

La tabla 2 muestra la tabulación de los valores en USD de los ingresos obtenidos por la producción de derivados, costos incurridos por materia prima (petróleo y productos importados) y el margen mensual (ver Tabla 2).

Tabla 2. Cálculos para determinar el margen de refinación

Margen de refinación del parque refinador del Ecuador				
Mes	Costos por materia prima	Ventas de derivados	Margen global	Margen bruto unitario
ene-18	\$ 415.376.809	\$415.471.890	\$ 95.081	\$ 0,01
feb-18	\$ 342.279.406	\$364.526.911	\$22.247.504	\$ 3,83
mar-18	\$ 355.170.110	\$368.477.451	\$13.307.342	\$ 2,30
abr-18	\$ 360.374.581	\$379.810.706	\$19.436.125	\$ 3,49
may-18	\$ 423.057.699	\$450.815.286	\$27.757.587	\$ 4,63
jun-18	\$ 397.820.904	\$431.160.407	\$33.339.503	\$ 5,58
jul-18	\$ 436.894.606	\$453.266.372	\$16.371.766	\$ 2,64
ago-18	\$ 384.238.554	\$415.717.797	\$31.479.242	\$ 5,39
sep-18	\$ 424.732.623	\$440.600.211	\$15.867.588	\$ 2,70
oct-18	\$ 367.463.485	\$418.566.191	\$51.102.707	\$ 9,39
nov-18	\$ 335.172.878	\$358.903.412	\$23.730.534	\$ 4,27
dic-18	\$ 314.450.107	\$336.381.342	\$21.931.235	\$ 3,68

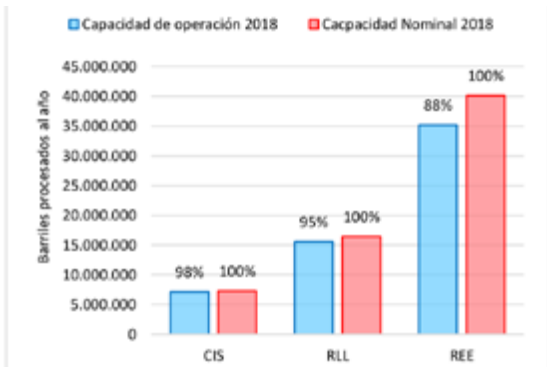


Figura 7. Porcentaje de operación del parque refinador en función de la carga procesada. **Fuente:** EP Petroecuador (2018).

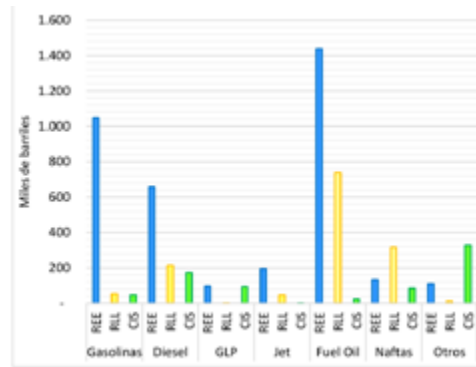


Figura 8. Producción nacional de derivados por refinera. **Fuente:** EP Petroecuador (2018).

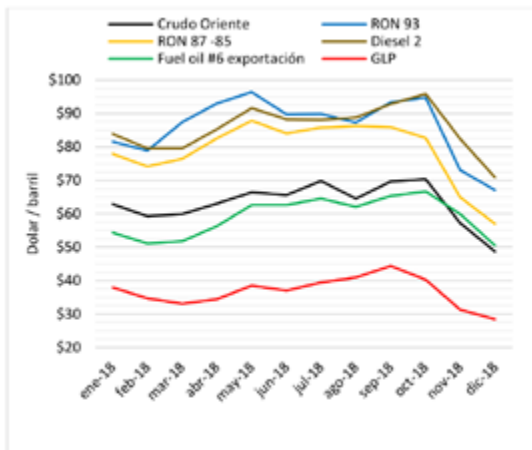


Figura 9. Precios internacionales de productos derivados de petróleo. **Fuente:** Agencia Internacional de Energía.

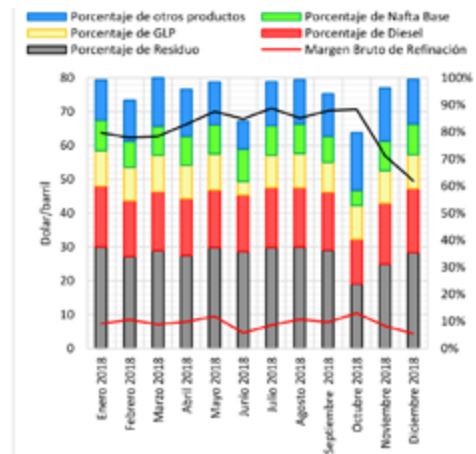


Figura 10. Margen bruto de refinación 2018. Complejo industrial Shushufindi.

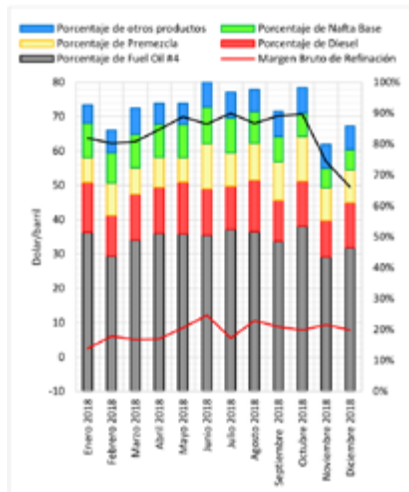


Figura 11. Margen bruto de refinación 2018, refinera La Libertad.

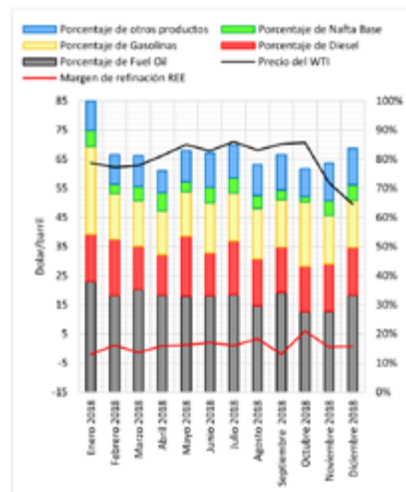


Figura 12. Margen bruto de refinación 2018, Refinera estatal Esmeraldas.

MARGEN DE REFINACIÓN POR REFINERÍA

Para cada centro de refinación se levantó la información necesaria y se analizó su comportamiento en el 2018, siguiendo la misma metodología aplicada en el análisis nacional. En las figuras 10, 11 y 12 se muestran la composición y dinámica de la producción de derivados de petróleo (barras en colores), el margen bruto unitario y el precio de referencia del petróleo WTI (línea continua) de manera mensual.

En las tres refineras se muestra que la dinámica del margen bruto es proporcional a las fluctuaciones del precio del petróleo WTI, además, es evidente las afectaciones que sufre este indicador por mermas en la eficiencia de la operación. De manera específica para el Complejo Industrial Shushufindi (ver Figura 10) el margen bruto promedio anual fue de USD 7,44 por barril producido y se muestra su afectación por la variación en la composición de la producción de

derivados y disminución del factor de planta de la refinería (disminución en la producción de GLP por mantenimiento programado de la planta de gas) en junio del 2018.

Para la refinería La Libertad (ver Figura 11) el margen bruto de refinación fue de aproximadamente USD 8,50 por barril producido. Se muestra que en el mes de julio el margen tuvo una disminución por mayor producción de residuo, mientras que en noviembre, pese a que el WTI experimentó una disminución, el margen se mantuvo estable por la disminución de la producción de residuo y la estabilidad de los productos livianos con mayor precio en el mercado.

Para la refinería estatal Esmeraldas (ver Figura 12) el margen de refinación obtenido fluctuó entre USD -2 a 6 dólares por barril producido, lo cual es contradictorio si lo comparamos con el margen obtenido en las refinerías de menor complejidad como La Libertad y Shushufindi.

De acuerdo con los autores, la falta de transparencia y detalle en la información estadística disponible sobre los volúmenes de las importaciones para las mezclas en los procesos intermedios de refinación, puede ser el punto de inflexión para la obtención de valores erróneos, por lo cual se recomienda que, para que este estudio sirva como información sobre la política energética, se involucre a los actores del ciclo de la política para corroborar los datos en trabajos futuros.

Finalmente, en la figura 13 se muestra un comparativo de los resultados entre refinerías nacionales frente a las refinerías de alta y profunda conversión del golfo de los Estados Unidos. Como se puede observar, la dinámica del comportamiento del margen es similar, sin embargo, es clara la pérdida de competitividad de las refinerías nacionales de baja y media conversión con refinerías de mayor volumen y complejidad superior.

CONCLUSIONES

- Los resultados *a priori* de este estudio no pretenden informar la política energética, sino más bien mostrar y transparentar el proceso metodológico para el análisis del desempeño de una refinería con el fin de proporcionar métricas de evaluación, las

mismas que deben ser utilizadas y validadas por los diferentes actores en el ciclo de la política energética.

- Este estudio presenta una metodología para la evaluación del desempeño de las refinerías en el Ecuador, considerando no solo la materia prima utilizada y la producción de derivados, sino también considera todos los flujos intermedios (*blending*) que entran y salen de los procesos. De acuerdo a los resultados obtenidos las refinerías nacionales mantuvieron un margen bruto en el 2018 de entre USD 2,30 y 9,40 dólares por barril procesado, frente a USD 8 y 17 dólares obtenido por refinerías con mayor complejidad en otras regiones.
- La intensidad de los procesos intermedios de mezclado por falta de modernización tecnológica de las refinerías nacionales encarece la producción de los derivados y las vuelve menos competitivas si las comparamos con otras refinerías a nivel mundial. En el 2018 se importaron aproximadamente 16 millones de barriles de naftas de alto octanaje y 4 millones de barriles de *cutter stock* para la obtención de gasolinas y *fuel oil* para su comercialización.
- Analizando el margen neto de las refinerías que incluye el costo de operación, el panorama refleja que, para llegar al punto de equilibrio económico de las refinerías, el margen bruto deberá estar por encima de USD 6,24 dólares por barril procesado, que representa el costo de operación promedio por barril procesado, de acuerdo a la información de EP Petroecuador.
- El margen bruto promedio mensual para el periodo de análisis en el complejo industrial Shushufindi fue de USD 7,44, en la refinería La Libertad de USD 8,48 y en la refinería estatal Esmeraldas de USD 1,24, lo cual, como se mencionó en la sección correspondiente del estudio, no es coherente con la complejidad de las refinerías, pues a mayor complejidad y mayor volumen se esperaría que el margen bruto mejore frente a refinerías de menor complejidad y de menor capacidad instalada.
- Finalmente, se recomienda que para futuros trabajos en el tema de refinación, los datos de las estadísticas nacionales sean revisados y validados con información primaria para que estos trabajos de investigación sirvan como insumos para informar sobre la política energética del Ecuador.

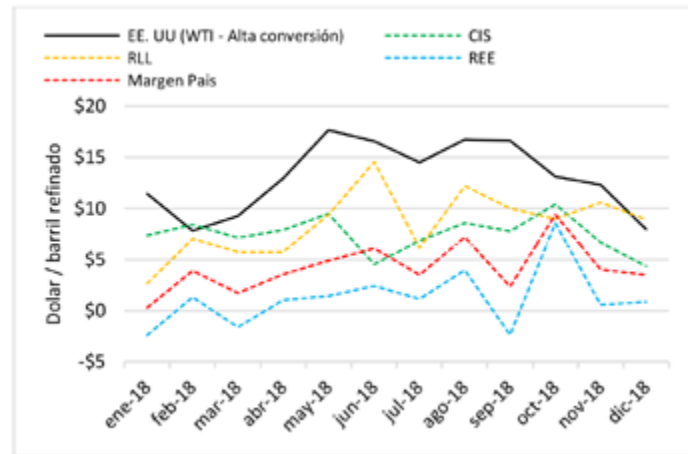


Figura 13. Comparación del margen nacional con refinерías de Estados Unidos.

REFERENCIAS

- Baquero, P. 2006. Las ganancias y pérdidas. En G. Fontaine (ed.), *Petróleo y desarrollo*. Quito: Sede Flacso, p. 149.
- BCE. 2009. *Precios de los crudos ecuatorianos*, s. l.: Banco Central del Ecuador .
- BCE. 2018. *Reporte del Sector Petrolero*, s. l.: s. n.
- BP. 2020. Regional refining margins. *Statistical Review of World Energy*, p. 27.
- Carrillo, C. 2020. *Análisis del margen de refinación en el sector hidrocarburífero del Ecuador, utilizando la información en tiempo real de la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero en el periodo 2018-2019*. [En línea] Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21558>
- Cuesta, S. 2019. Gobierno anuncia concesión de refinерía y construcción de una nueva en Esmeraldas [Entrevista] (15 agosto 2019).
- DEN I. 2020. *La gestión conjunta entre la empresa privada y la EP Petroecuador para la operación de la Refinería de Esmeraldas*, s.l.: s.n.
- El-Gendy, N. S. and Speight, J. G. 2015. Refinery configuration. En T. & F. Group (ed.), *Handbook of refinery desulfurization*. s.l.: CRC Press, pp. 83-86.
- EP Petroecuador. 2018. *Gerente general de EP Petroecuador supervisó operaciones de exportación de crudo desde el Terminal Marítimo Balao*. [En línea] Disponible en: <https://www.eppetroecuador.ec/?p=8228>
- EP Petroecuador 2018. *Informe Estadístico 1972-2017 (45 años)*. Quito: EP Petroecuador.
- EP Petroecuador 2015. *Análisis estadístico anual de Petroecuador*.
- EP Petroecuador 2019. *Análisis estadístico anual*, s. l.: Gerencia de Refinación.
- Gary, J. H., Handwerk, G. E. and Kaiser, M. J. 2004. Refining margins. En T. & F. Group (ed.) *Petroleum refining technology and economics*. s. l.: CRC Press, p. 22.
- Hirshfeld, D. 2015. *Stillwater Associates*. [En línea] Disponible en: <https://stillwaterassociates.com/crack-spread-a-quick-and-dirty-indicator-of-refining-profitability> [Último acceso: 24 junio 2020].
- International Energy Agency. 2019. Margins. *Oil market report*, p. 25.
- International Energy Agency. 2020. Margins. *Oil market report*.
- Lluch Urpi, J. 2011. *Tecnología y margen de refino del petróleo*. Díaz de Santos s. A. (ed.). Madrid: Instituto Superior de la Energía.
- OPEC. 2011. *Brent, West Texas, Arab Light... Conozca al detalle qué representa cada tipo de petróleo, cuándo, cómo y dónde se negocia*. [En línea] Disponible en: <https://www.expansion.com/especiales/petroleo/crudos.html>
- OPEC. 2019. Product markets and refinery operations. *Monthly oil market report*.
- Ortiz, R. 2020. El Gobierno nacional presentó la licitación para construir una refinерía de alta conversión en la Costa ecuatoriana [Entrevista] (11 marzo 2020).
- Petroecuador E. P. 2019. *Informe estadístico anual 1972-2019*, Quito: Subgerencia de Planificación y Control de Gestión.
- Población, J. and Serna, G. 2016. Is the refining margin stationary? *International Review of Economics and Finance*, p. 170.
- Ramkumar, M. 2016. *marketrealist.com*. [En línea] Disponible en: <https://marketrealist.com/2016/11/refining-margins-key-indicators-refining-profitability/> [Último acceso: 12 julio 2020].
- RPI. (2016). *Plan Institucional 2016-2019*, s. l.: Gerencia de Planificación y Procesos.



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

DISEÑO SOSTENIBLE DE UN PROCESO INDUSTRIAL LOCAL PARA LA OBTENCIÓN DE UNA BEBIDA HIDRATANTE DE HOJA DE TUNA

Sustainable design of a local industrial process for obtaining a tuna leaf drink

Mabel Parada Rivera
mparada@esPOCH.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7491-2078>

Sofía Godoy Ponce
sofia.godoy@esPOCH.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6479-4343>

Lourdes Carrera Beltrán
lcarrera_b@esPOCH.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0266-4893>

Alexandra Tapia Borja
alexandra.tapia@utc.edu.ec
Universidad Técnica de Cotopaxi
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6935-5211>

Dayana Chávez Echeverría
dayagabriela1@hotmail.com
Investigadora Independiente
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0482-6497>

Recibido: septiembre de 2020

Aprobado: mayo de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: 10.29166/revfig.v11i1.3097

RESUMEN

En Ecuador se consume el fruto de la tuna, sin embargo, las hojas o cladodios son desechados sin aprovechar sus principales componentes. El presente estudio tiene como finalidad la elaboración de una bebida de hoja de tuna (*Opuntia ficus-indica*) por medio de un diseño de producción industrial sostenible en la localidad de Guano, para elaborar un producto de buena calidad, y que contribuya al desarrollo local del cantón. La caracterización socioeconómica se realizó a través de grupos focales y metodología social, la caracterización fisicoquímica de la materia prima y del producto final se realizó en un laboratorio particular. Los resultados muestran que la bebida de hoja de tuna tiene aceptación social, porque emplea como materia prima un componente local conocido por la población, cuyo proceso no genera impactos negativos. Su aceptación se basa en el hecho que, al ser procesada la hoja de tuna, ésta no pierde ninguno de sus componentes nutricionales, es un producto inocuo y con innumerables propiedades antioxidantes y desintoxicantes. El proyecto consta de un análisis socioeconómico y un proceso de industrialización de la bebida que consta de las siguientes etapas: recepción, inspección y selección de la materia prima, despinado, lavado, mondado y despulpado, troceado, homogeneizado, agitado y mezclado, filtrado, pasteurizado, adición de aditivos, envasado y etiquetado. En el desarrollo experimental, se obtuvieron cuatro formulaciones para la bebida, al aplicar un análisis sensorial de jueces afectivos, se determinó que la formulación con sabor a durazno es la más aceptada en el grupo social de estudio.

ABSTRACT

In Ecuador, the fruit of the prickly pear is consumed, however, the leaves or cladodes are discarded without taking advantage of their main components. The purpose of this study is to prepare a prickly pear leaf drink (*Opuntia ficus-indica*) through a sustainable industrial production design for the town of Guano, producing a good quality product that contributes to local development of the canton. The socioeconomic characterization was carried out through focus groups and social methodology, while the physicochemical characterization of

PALABRAS CLAVE Diseño, proceso, sostenible, bebida, hidratante, formulación.

KEYWORDS Design, process, sustainable, drink, hydrating, formulation.

the raw material and the final product was carried out in a private laboratory. With the results, it was determined that this drink has social acceptance, because it uses as raw material a local component known to the population and whose process does not generate negative impacts. Its acceptance is based on the fact that, when the tuna leaf is processed, it does not lose any of its nutritional components, it is a harmless product with innumerable antioxidant and detoxifying properties. The project consists of a socioeconomic analysis and a process of industrialization of the drink that consists of the following stages: reception, inspection and selection of the raw material, deboning, washing, peeling and pulping, chopping, homogenizing, shaking and mixing, filtering, pasteurizing, adding additives, packaging and labeling. In the experimental development, four formulations for the drink were obtained, by applying a sensory analysis of affective judges, it was determined that the peach flavor formulation is the most accepted in the study social group.

INTRODUCCIÓN

A través de varios estudios de relación genética y morfológica de la especie *Opuntia ficus-indica*, se rescata el hecho de que ésta es una de las de mayor importancia agronómica por sus rasgos evolutivos desde su origen y adaptación en los sistemas ecológicos (MAG, 2018). Al existir una correlación entre desempeño económico de productos con su diseño sostenible frente a retos ambientales y sociales, que demanda el modelo de desarrollo actual del país, *Opuntia ficus-indica* puede ser considerada un recurso de fácil acceso, producción y aprovechamiento, pues no requiere de condiciones estrictas para su desarrollo y adaptabilidad (Kiesling, 2010). De acuerdo a un estudio realizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el cultivo de tuna en el Ecuador ocupa aproximadamente 180 hectáreas de extensión (MAG, 2018; Kiesling, 2010). En el cantón Guano, alrededor de 600 agricultores se dedican al cultivo de tuna (*Opuntia ficus-indica*), que es, entre las cactáceas, la de mayor importancia agronómica, tanto por sus sabrosos frutos como por sus tallos que sirven de forraje o pueden ser consumidos como verdura (García Favela, 2013).

Para la disponibilidad de estos alimentos aptos para el consumo, se pondera especialmente el autoabastecimiento a través de la producción local (Diario El Día, 2016; Blanco-Navarro, 2010). Se destaca, implícitamente, el sistema de producción deseado para que los pequeños y medianos productores adopten las buenas prácticas agrícolas como el aprovechamiento de recursos, uso de los saberes ancestrales y el desarrollo de procesos, así como las tecnologías apropiadas para elevar la productividad local, a fin de evitar la dependencia de la producción del mercado internacional, reduciendo al mínimo los impactos ambientales negativos de los sistemas de producción y de consumo que constituye la finalidad de la pro-

ducción sostenible (Ministerio del Ambiente, s. f.; Barazarte, 2017).

En el Ecuador se consume el fruto de la tuna, sin embargo, las hojas de esta fruta son desechadas sin que se aprovechen sus principales componentes, entre los que destacan: las proteínas, carbohidratos, hierro, calcio, grasas (Diario El Comercio, 2011). Este tipo de hojas son comparables por su valor nutricional a ciertas frutas y verduras como el melón, mango, uva, espinaca, alcachofa, berenjena, brócoli, respectivamente (Esquivel, 2004; ONU, 2001). Además, se señala que éstas poseen un porcentaje de agua de 94,14%, bajo contenido de hidratos de carbono y proteínas, 2,5% y 1,98%, respectivamente, contenido de fibra del 2%, son ricas también en minerales como calcio 74,8 mg/100 g y hierro 0,86 mg/100 g y cuentan con un mínimo contenido de sodio, por lo que pueden ser consumidos por personas con problemas renales o de hipertensión (ONU, 2018). También, contiene 12,6 mg/100 g de vitamina C. El consumo de hoja de tuna aporta a la dieta solamente 27 kcal/100 g, y debido a que contiene fibra soluble, su consumo ayuda a estabilizar la concentración de azúcar en la sangre (García, 2014).

La tuna también implica un beneficio económico, dado sus propiedades nutritivas y medicinales (Ochoa y Guerrero, 2013; Castro, 2009). La sostenibilidad de la producción de la tuna se centra en la economía rural y en las condiciones ambientales poco exigentes. Desde 2016, la mayoría de las empresas artesanales de la provincia de Chimborazo adquieren la tuna para procesarla artesanalmente y transformarla en productos para comercialización (Chávez, 2018). El fruto de la tuna es lo que mayormente se consume, dado que se desconocen los beneficios que proporcionan sus hojas, las cuales contienen gran cantidad de fibra, fotoquímicos, vitaminas, antioxidantes y minerales, im-

pecables nutrientes para el cuerpo (Fagerholm *et al.*, 2012; Sepúlveda y Rodríguez, 2003). Si se consideran los factores de adaptabilidad y las propiedades nutricionales que este vegetal posee se justifica la necesidad de industrializar la bebida de hoja de tuna para así ofrecerla al mercado como una alternativa saludable de consumo, opción que aprovecha en sí todos los componentes del vegetal (Sáenz, 2018), mediante un proceso artesanal con un diseño industrial para aumentar la producción de calidad, promoviendo la soberanía alimentaria de los ecuatorianos (Vicepresidencia de la República del Ecuador, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la consecución del presente proyecto se llevó a cabo el registro de parámetros de control y manipulación de variables objeto de estudio. Se utilizaron equipos e instrumentos, así como diversas técnicas de laboratorio para la caracterización de la materia prima y del producto terminado.

La metodología planteada para el presente estudio se dividió en 5 etapas:

- Etapa A: Análisis socioeconómico
- Etapa B: Caracterización de la materia prima
- Etapa C: Descripción del proceso de elaboración de la bebida de hoja de tuna
- Etapa D: Determinación del análisis sensorial de la bebida de hoja de tuna
- Etapa E: Validación del producto final

ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO

Para el análisis socioeconómico se realizó el estudio de costo-beneficio social del proceso y el posible impacto de éste.

El estudio socioeconómico comprendió aspectos relacionados con las condiciones socioculturales y socioeconómicas de la población de estudio, incorporando términos para condiciones de mejora de la población respecto a empleo, esperanza de vida, nivel de alfabetización, población económicamente activa. Se consideró el comportamiento de la comunidad respecto al grado de consumo de productos locales, el interés para proyectos sostenibles, permitiendo medir impactos en términos monetarios, sociales. Se realizó un estudio de las condiciones ambientales de la zona poblada para la definición de la capacidad de soporte del sector.

Se reconocieron cuatro etapas: identificación de la idea de bebidas sostenibles, prefactibilidad, factibilidad y, por último, la de diseño de una bebida bajo las condiciones detalladas.

Las variables socioeconómicas valoradas fueron la presencia de zonas agrícolas, afluentes y vertientes, zona poblada y formas de vida consideradas en torno al área de influencia directa e indirecta.

La muestra de trabajo para este análisis incluyó a los actores sociales de quienes surgió la idea inicial de producción de la bebida hidratante, la cual contó con el apoyo de quince socios vinculados con el GAD Municipal de Guano. Las pruebas socioeconómicas se desarrollaron con 62 miembros provenientes de catorce comunidades del cantón.

CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para la caracterización de los parámetros físico-químicos de la materia prima se siguió la metodología establecida por Sánchez y col. (2017) con algunas modificaciones. Parámetros tales como la biomasa fresca, longitud, ancho, grosor, acidez titulable (AT), pH, contenidos de sólidos solubles totales (SST), ácido ascórbico, humedad, proteínas, cenizas, grasas, carbohidratos, pectina total, hierro, calcio y potasio se analizaron para 2 kg de muestra (Sánchez-Urdaneta, 2017).

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA BEBIDA DE HOJA DE TUNA

Mediante ensayos realizados a nivel de laboratorio, y al obtener cuatro distintas bebidas, de las cuales al ser evaluadas por jueces afectivos se escoge una de ellas: la bebida de hoja de tuna sabor a durazno, se establece que el mejor proceso industrial para la obtención de la bebida de hoja de tuna consiste en las siguientes etapas u operaciones: recepción de la materia prima en la cantidad necesaria, inspección y selección de la materia prima, desespinado, lavado, mondado y despulpado, troceado, homogeneizado, agitado y mezclado, filtrado, pasteurizado, adición de aditivos (conservante, edulcorante, saborizante), envasado y etiquetado, así como la formulación para la misma (ver Figura 1).

Para la elaboración de la bebida de hoja de tuna el proceso empieza con la recepción de la materia prima estimada con base en la caracterización físico-química, gracias a la cual se determinará la calidad de la hoja de tuna para continuar con su procesamiento. Después se lleva a cabo la selección e inspección de la hoja de tuna (Espinoza, 2007), para separar el porcentaje de materia defectuosa, de la materia prima que esté en condiciones óptimas para el procesamiento. Se realiza la remoción de las espinas de la hoja de nopal, operación que facilita el posterior lavado de las hojas de tuna con una solución de hipoclorito de sodio al 5% (v/v), para eliminar materiales extraños y la presencia

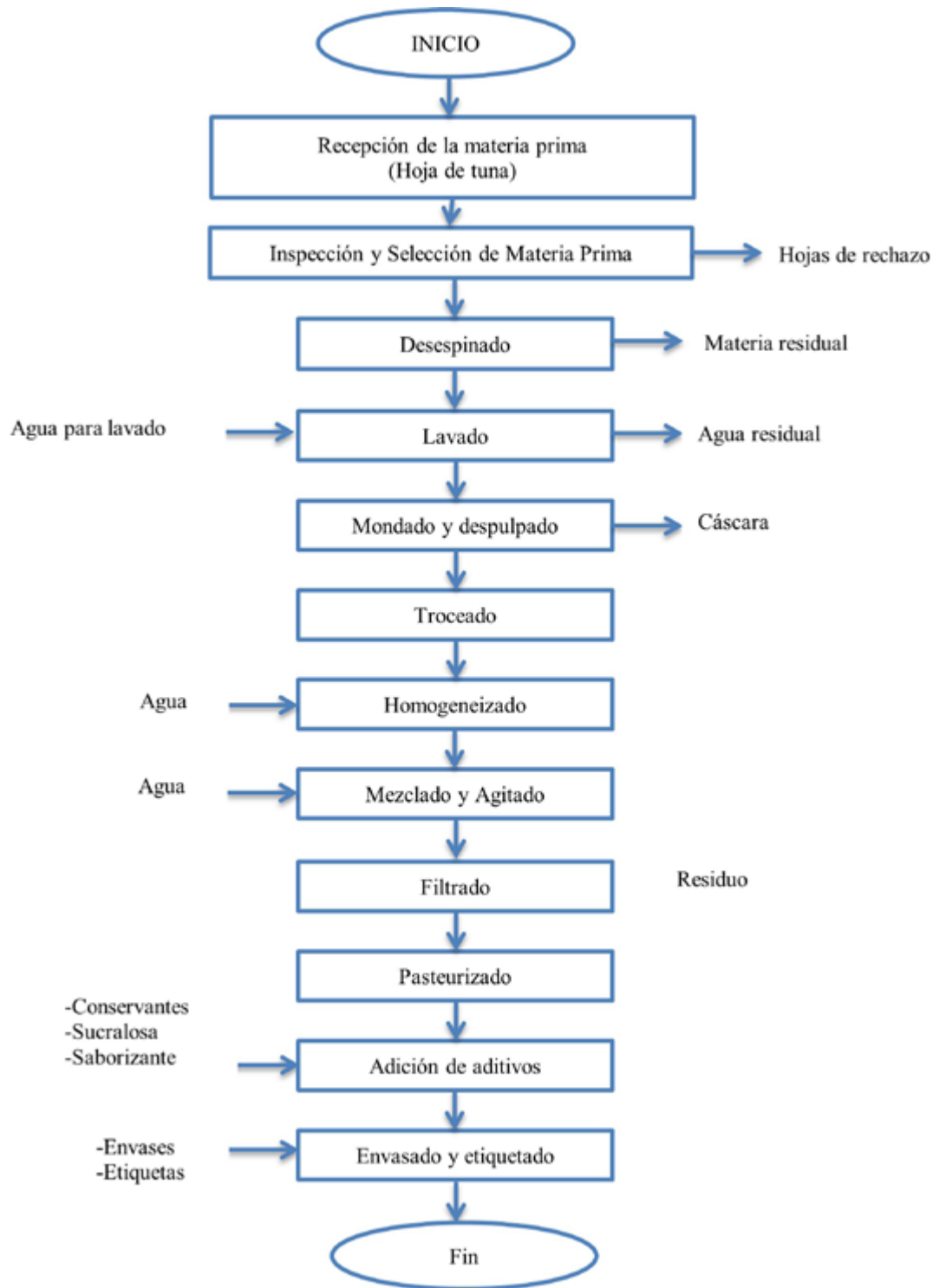


Figura 1. Diagrama de proceso para la elaboración de la bebida de hoja de tuna. Realizado por María Abarca (2018).

de microorganismos. A continuación, se realiza el mondado de la hoja de tuna, al retirar la corteza de la hoja se extrae la pulpa que ésta posee, cuando ya ha sido obtenida la pulpa de la hoja, se procede a trocearla con la ayuda de un cuchillo hasta obtener trozos pequeños de aproximadamente 3 cm. Se licúa a 3600 rpm en una licuadora industrial de

acero inoxidable durante 1 min los cuadritos de la pulpa, para facilitar la homogeneización se añade solo un 34% del agua purificada total que debe llevar la mezcla. Se realiza el mezclado y agitado en un homogeneizador de la bebida de pulpa de hoja de tuna añadiendo un porcentaje de líquido de 66%, es decir, el agua restante, durante un tiempo de 5 ho-

ras. Se filtra y se obtiene una bebida con consistencia de gel. El tratamiento térmico se realiza en una marmita a una temperatura de 75 °C, durante 30 segundos, inmediatamente después de transcurrido este tiempo se baja drásticamente la temperatura de la bebida hasta los 35 °C con la finalidad de reducir la presencia de agentes patógenos y alargar la vida útil del producto. Después de obtenida la bebida, se adhieren a ésta los aditivos necesarios, esto se realiza después del tratamiento térmico para que dichos aditivos no se vean alterados por acción de la temperatura. Se utilizan las siguientes cantidades: 125 mg/kg de benzoato de sodio, 125 mg/kg de sorbato de potasio, 0,5 ml/L de saborizante natural de durazno y 0,4 ml/L de sucralosa. Finalmente, la bebida de hoja de tuna se envasa en botellas de vidrio de 500 ml, se las sella herméticamente y se las etiqueta.

DETERMINACIÓN DEL ANÁLISIS SENSORIAL DE LA BEBIDA DE HOJA DE TUNA

Se realizaron 4 ensayos diferentes con el objetivo de encontrar la bebida más adecuada para su procesamiento a nivel industrial, las cuales serán discriminadas según criterios sensoriales de sabor, color, aroma y consistencia (Rodríguez, 2017; Nazareno, 2013), como se detalla en la tabla 1. Una vez culminado el proceso de evaluación del producto mediante las encuestas, se realiza la tabulación de datos, cálculo y análisis estadístico de los datos obtenidos (ver Tabla 1).

El análisis sensorial se realiza mediante el uso del método afectivo (Cordero, 2013), el cual consiste en la selección de un grupo de personas no entrenadas, denominadas «jueces afectivos», quienes forman parte de la población de estudio ya que se han considerado como consumidores directos o potenciales. La prueba se realizó el día 19 de octubre de 2018, en el Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, con la colaboración de 110 jueces afectivos. Una vez realizadas las encuestas se tabulan los resultados obtenidos en los que al observar los porcentajes la bebida con mayor aceptación es la bebida de hoja de tuna sabor a durazno. Además, se emplea la prueba chi-cuadrado para determinar la dependencia entre las variables, luego de obtenidos los resultados de la prueba chi-cuadrado para cada uno de los parámetros analizados y al realizar la respectiva comparación con el valor de chi-cuadrado crítico, se determina que para los parámetros sabor, color y aroma sí existe dependencia entre la muestra y el nivel de respuesta, mientras que para el parámetro consistencia no existe relación, lo cual concuerda debido a que la consistencia en las cuatro muestras analizadas es la misma (consistencia de gel).

VALIDACIÓN DEL PRODUCTO FINAL

Se realizó la validación del proceso mediante la caracterización físico-química del producto final de acuerdo con los parámetros que fueron analizados en la materia prima (hoja de tuna), y los análisis microbiológicos de acuerdo a la NTE INEN 2337:2008, jugos, pulpas, concentrados; néctares, bebidas de frutas y vegetales.

RESULTADOS

El grado de aceptación sobre el aprovechamiento de las hojas de la plantación de tuna surge por varias razones, entre éstas sobresale el hecho de que el cultivo de tuna es prominente en la zona que se caracteriza por tierras áridas, lo que convierte a la plantación en una especie local y cuyo costo-beneficio social es elevado, el bajo costo de producción, la demanda por productos innovadores y que promuevan la soberanía alimentaria establecida en la política pública nacional: Plan Nacional de Desarrollo Toda una Vida, y el impulso a la matriz productiva.

En la etapa de identificación de la idea se establecieron las razones bien fundadas para la aceptación o rechazo del proyecto. En la etapa inicial del proyecto se definió el alcance fundamentado en el nivel de aceptación o rechazo de la población hacia la propuesta, el resultado generado evidenció ausencia de rechazo, por lo que se adoptó la decisión de continuar con los análisis y la especificación de los estudios para la siguiente etapa.

La etapa de prefactibilidad generó como resultados las diferentes alternativas de sabor en la bebida de hoja de tuna obtenida, que fueron: piña, durazno y sabor natural, además se desarrolló el diseño y se ejecutó el análisis de todas ellas. La tercera etapa consistió en la precisión de la alternativa más viable, sus mecanismos de inversión, esquemas de desarrollo, protocolos de producción y la aceptación de la que se consideró como más apropiada para el objetivo.

Finalmente, la etapa de diseño generó la preparación de planos de ejecución bajo condiciones reales de la población de estudio, con sus posibles alternativas técnicas y económicas de solución.

La caracterización de la materia prima de la hoja de tuna, se detalla en la tabla 2, en donde se observa que los parámetros analizados son los adecuados y correctos que requiere la materia prima para asegurar, en su procesamiento a nivel industrial, un producto de buena calidad y que cumpla con los parámetros establecidos según las normas respectivas (ver Tabla 2).

Al realizar la caracterización fisicoquímica se obtuvieron los siguientes resultados: 1,98% de proteína, 0,45% de grasa, 0,93% de cenizas, 96,44% de hume-

Tabla 1. Codificación de las muestras de bebidas de hoja de tuna

Procedencia	Referencia	Código
Bebida elaborada por Vita Tuna	Bebida elaborada artesanalmente	1423
Ensayos a nivel de laboratorio	Bebida natural sin saborizante	1424
	Bebida sabor a durazno	1425
	Bebida sabor a piña	1426

Tabla 2. Resultados de los análisis de caracterización fisicoquímica de la hoja de tuna

Parámetro	Unidades	Método de análisis	Valor determinado
Proteína	%	INEN 1670	1,98
Grasa	%	INEN 523	0,45
Cenizas	%	INEN 401	0,93
Humedad	%	INEN 1235	94,14
Sólidos totales	%	INEN 1235	2,50
Azúcares totales	°Brix	-	2,50
Ácido ascórbico	mg/100 g	Volumétrico	12,60
Calcio	mg/100 g	Volumétrico	74,80
Hierro	mg/100 g	Colorimétrico	0,86
Acidez titulable	mg/100 g	Volumétrico	98,20
pH	-	Potenciométrico	5,60

Fuente: Reportes por el laboratorio SAQMIC, 2019.

Tabla 3. Formulación porcentual de la bebida de hoja de tuna

Componente	Porcentaje	Cantidad	Unidad
Pulpa de la hoja de tuna	15,20 %	218,00	kg
Agua	14,27 %	204,61	L
Benzoato de sodio	0,17 %	2,38	kg
Sorbato de potasio	0,17 %	2,38	kg
Sucralosa	0,69 %	9,94	L
Tipos de saborizante (piña, durazno, natural)	0,87 %	12,43	L

dad, 2,5% de carbohidratos, 2,5 °Brix, 12,6 mg/100 g de vitamina C, 74,8 mg/100 g de Calcio, 0,86 mg/100 g de hierro, 98,2 mg/100 g de acidez titulable y un pH de 5,6. No existe una norma que especifique los requisitos que los cladodios de nopal deban cumplir, sin embargo, al comparar estos resultados con los de análisis realizados en estudios anteriores con los valores obtenidos, estos poseen cifras aproximadas.

En la tabla 3 se detalla la cantidad de materia prima y aditivos necesarios para la formulación de la bebida de hoja de tuna a escala industrial, una vez realizados los distintos ensayos mediante el proceso de elaboración visto en el epígrafe anterior (ver Tabla 3).

En la tabla 4 se presentan los resultados del nivel de aceptación de la bebida por parte de los jueces afectivos una vez realizadas las encuestas. Se mues-

tran resultados de frecuencia y los porcentajes obtenidos según cada muestra (ver Tabla 4).

Se establece que la muestra 1425 (bebida de hoja de tuna sabor a durazno) es la mejor bebida, debido a que presentó un mayor porcentaje de aceptación por los jueces afectivos.

Se valida el proceso mediante la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la bebida de hoja de tuna (Guzmán y Chávez, 2007) que se detalla en las tablas 5 y 6, respectivamente (ver Tablas 5 y 6).

Al realizar los análisis fisicoquímicos del producto final, se observa que la bebida aún presenta las propiedades nutritivas que posee la hoja de tuna inicialmente, además, los análisis microbiológicos denotan ausencia de coliformes totales, coliformes fecales, mohos y levaduras por lo que se comprueba la inocuidad del producto gracias a la asepsia con la que ha sido realizado su procesamiento.

Los resultados obtenidos mediante la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la formulación según la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2337:2008, jugos, pulpas, concentrados; néctares, bebidas de frutas y vegetales, son proteína 0,10%, ceniza 0,11%, azúcares totales 0,41°Brix, sólidos totales 0,74%, hierro 0,60 mg/100 ml, calcio 12,8 mg/100 ml, grasa 0,12%, acidez titulable 34 mg/100 ml, pH 5,3, ácido ascórbico 34 mg/100 ml y ausencia de coliformes fecales, coliformes totales, mohos y levaduras. Al comparar los valores obtenidos del producto final con los valores de los análisis de la caracterización fisicoquímica de la hoja de tuna (materia prima).

DISCUSIÓN

La elaboración de una bebida hidratante con base en las hojas de tuna, bajo el concepto de sostenibilidad (variables ambientales como el aprovechamiento de recursos que no alteran la estructura y estabilidad del suelo, y que no generan la producción con alta concentración de fertilizantes, sociales y económicas) involucra un proceso impulsor del nuevo modelo de desarrollo del país, que se fundamenta en la endogeneidad del territorio, es decir, que promueve la producción local, considerando productos y materias primas propias del territorio, cuyo costo-beneficio social sea alto y cuyo impacto ambiental negativo sea el mínimo, es decir, cuyos efectos en la población local sean los esperados y no ocasionen condiciones adversas en todo lo que las etapas del proceso de extracción de materia prima y producción implica y, sobre todo, siempre bajo la rigurosidad de la normativa vigente (ARCSA, 2016).

La garantía de la eficiencia del diseño bajo las cuatro etapas empleadas para el estudio socioeconómico

genera un carácter objetivo en el valor social, ambiental y económico, bajo una utilización óptima de los recursos. El estudio hace posible el aprendizaje constante; para el efecto se requiere experiencia, independencia e innovación. Este componente es la manera más viable en la priorización de las decisiones, para afianzar el beneficio de este tipo de proyectos, para financiarlos y para la búsqueda de estrategias de comunicación adecuadas con las partes interesadas.

En el proceso para la elaboración de una bebida de hoja de tuna, se parte de la selección de materia prima en la cual los resultados de sus análisis fisicoquímicos se obtuvieron los siguientes resultados: 1,98% de proteína, 0,45% de grasa, 0,93% de cenizas, 96,44% de humedad, 2,5% de carbohidratos, 2,5°Brix, 12,6 mg/100 g de vitamina C (ácido ascórbico), 74,8 mg/100 g de calcio, 0,86 mg/100 g de hierro, 98,2 mg/100 g de acidez titulable y un pH de 5,6. A pesar de que no existe una norma que especifique los requisitos que los cladodios de nopal deban cumplir, estos valores se aproximan a resultados de análisis bromatológicos realizados en un estudio previo sobre la composición química de las hojas de tuna en los cuales los valores se aproximan a los obtenidos en este estudio (Sánchez-Urdaneta, 2017).

Una vez realizados los distintos ensayos de la bebida se establece el proceso a nivel industrial, el diseño y los cálculos de ingeniería. Para lo cual se procesarán 218 kg de materia prima, que aproximadamente corresponden a 223 hojas de tuna, de los cuales se obtienen 275,67 L de bebida, después de la adición de agua y los distintos aditivos requeridos que fueron determinados anteriormente. Se continúa estableciendo los balances de masa y energía basados en los datos recolectados durante los ensayos realizados y una relación con los datos que se requieren para establecer el proceso a escala industrial.

Para la producción de la bebida de hoja de tuna se hicieron ensayos de tres diferentes muestras, en las cuales variaba el sabor. La primera muestra, bebida natural sin saborizante ni edulcorante; la segunda muestra, sabor a piña; y la tercera, sabor a durazno. Estas tres bebidas, junto con la bebida artesanal que se elabora en la empresa a pequeña escala, fueron evaluadas por 110 jueces afectivos mediante un análisis sensorial, obteniéndose una aceptación general de 9,09%, 24,55%, 60% y 6,36%, respectivamente. De acuerdo con estos resultados, se estableció que la bebida a elaborar es la de sabor a durazno.

En los resultados del análisis físico-químico y microbiológico se obtuvo un porcentaje de proteína del 0,10%, ceniza 0,11%, azúcares totales 0,41°Brix, sólidos totales 0,74%, hierro 0,60 mg/100 ml, calcio 12,8

Tabla 4. Resultados estadísticos del nivel de aceptación de la bebida por los jueces afectivos

Código	Frecuencia	Porcentaje (%)	Porcentaje válido (%)	Porcentaje acumulado (%)
1425	66	60,00	60,00	60,00
1426	27	24,55	24,55	84,55
1424	10	9,09	9,09	93,64
1423	7	6,36	6,36	100
Total	110	100	100	

Tabla 5. Resultados de los análisis fisicoquímicos de la bebida de hoja de tuna

Determinaciones	Unidades	Método	Resultado
Proteína	%	INEN 16	0,10
Ceniza	%	INEN 401	0,11
Azúcares totales	°Brix	-	0,41
Sólidos totales	%	INEN 1235	0,74
Hierro	mg/100 ml	colorimétrico	0,60
Calcio	mg/100 ml	volumétrico	12,80
Grasa	%	INEN 12	0,12
Acidez titulable	mg/100 ml	volumétrico	34,00
pH	-	potenciométrico	5,30
Ácido ascórbico	mg/100 ml	volumétrico	34,00

Fuente: Reportes del laboratorio SAQMIC, 2019.

Tabla 6. Resultados del análisis microbiológico de la bebida de hoja de tuna

Parámetro	Unidad	Min.	Máx.	Método	Resultado
Coliformes totales	UFC/ml	<3	-	NTE INEN 1529-6	Ausencia
Coliformes fecales	UFC/ml	< 3	-	NTE INEN 1529-8	Ausencia
Mohos y levaduras	UFC/ml	< 10	10	NTE INEN 1529-10	Ausencia

Fuente: Reportes del laboratorio SAQMIC, 2019.

mg/100 ml, grasa 0,12%, acidez titulable 34 mg/100 ml, pH 5,3, ácido ascórbico 34 mg/100 ml y ausencia de coliformes fecales, coliformes totales, mohos y levaduras, por lo tanto se establece que la bebida posee propiedades nutritivas por su contenido de proteínas, minerales como hierro, calcio y vitamina C. Además, se evidencia la inocuidad del producto.

CONCLUSIONES

El análisis socioeconómico permitió establecer la base diagnóstica del diseño, para implantar estrategias innovadoras que permitan rentabilidad social, ambiental y económica, de manera que no se afecten la población local y los beneficiarios directos del proceso de producción.

La caracterización físico-química de la materia prima, hoja de tuna (*Opuntia ficus-indica*), muestra resultados similares a los obtenidos en otros estudios, posibilitando su utilización como bebida de consumo.

La bebida de hoja de tuna, sabor a durazno, se establece como el mejor proceso industrial para la obtención de una bebida de consumo general, debido a que posee características organolépticas que agradan al potencial consumidor.

Los valores de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la hoja de tuna y el producto final indican las propiedades nutritivas y la inocuidad de la bebida, pudiendo determinarse que está apta para el consumo humano.

REFERENCIAS

- ARCSA. 2016. *Normativa técnica sanitaria para alimentos procesados*. Disponible en: <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/06NOR2016-RESOLUCION03-1.pdf>. (Consultado: 18 de agosto de 2018).
- Barazarte, H. 2017. *Características físicas y químicas de cladodios de Opuntia ficus-indica (L.) Mill.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315746700_Caracteristicas_fisicas_y_quimicas_de_cladodios_de_Opuntia_ficus-indica_L_Mill. (Consultado: 10 de septiembre de 2018).
- Blanco-Navarro, M. (1). Nopal (*Opuntia ficus indica*; L.), delicioso y medicinal. *La Calera*, 10(14), 71-72. <https://doi.org/10.5377/calera.v10i14.316>.
- Castro, J. 2009. *Cultivo de tuna*. Disponible en: <http://www.agrolibertad.gob.pe/sites/default/files/MANUAL%20TECNICO%20DE%20TUNA.pdf> (consultado: 28 de agosto de 2018).
- Chávez, D. 2018. *Diseño del proceso industrial para la obtención de una bebida de hoja de tuna (Opuntia ficus-indica) para la empresa Vita Tuna*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Cordero, G. 2013. *Aplicación del análisis sensorial de los alimentos en la cocina y en la industria alimentaria*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- Diario El Comercio. 2011. *La tuna, cuatro variedades se producen en el país*. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/tuna-cuatro-variedades-se-producen.html>. (Consultado: 21 de septiembre de 2018).
- Diario El Día. 2016. *La tuna y sus innumerables propiedades*. Disponible en: <https://eldia.com.do/la-tuna-y-sus-innumerables-propiedades/>. (Consultado: 20 de agosto de 2018).
- Espinoza, J. 2007. *Evaluación sensorial de los alimentos*. La Habana-Cuba Universitaria.
- Esquivel, P. 2004. Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, 15(2), 215-219. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43715212>. (Consultado: 15 de Agosto de 2018).
- Fagerholm, N., Käyhkö, N., Ndumbo, F., Khamis, M. 2012. Community stakeholders' knowledge in landscape assessments-Mapping indicators for landscape services. *Ecol Indic.* 1(18), 421-33.
- García Favela, B. 2013. *Mucílago de nopal (Opuntia spp.) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo* (Tesis). Universidad de Chapingo. México.
- García, M. 2014. *Análisis sensorial de alimentos*. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n3/m1.html> (Consultado: 21 de septiembre de 2018).
- Guzmán, D. y Chávez, J. 2007. Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. *SciELO* 73(1). Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000100005. (Consultado: 12 de agosto de 2018)
- Kiesling, R. 2010. *Origen, domesticación y distribución de Opuntia ficus-indica*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228607157_Origen_domesticacion_y_distribucion_de_Opuntia_ficus-indica. (consultado: 14 de agosto de 2018).
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. 2018. *La producción de tuna, una actividad rentable*. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.ec/la-produccion-de-tuna-una-actividad-rentable/> (consultado: 14 de agosto de 2018).
- Ministerio del Ambiente. (s. f.) *Guía de buenas prácticas ambientales*.
- Nazareno, M. 2013. *Actas de la Segunda Reunión para el Aprovechamiento Integral de la Tuna y otras Cactáceas y I Reunión Sudamericana CACTUSNET FAO-ICARDA*. FAO.
- Ochoa, C. y Guerrero, J. 2013. Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre las características de la calidad de tuna blanca Villanueva (*Opuntia albicarpa*). *Revista Iberoamericana Tecnología Postcosecha*, 14(2), 149-61. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81329290008> (Consultado: 14 de septiembre de 2018)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2001. *Perfiles nutricionales por países-Ecuador*. Roma: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2018. *Cultivos tradicionales, nopal*. Disponible en: <https://www.fao.org/traditional-crops/cactuspear/es/>. (Consultado: 24 de agosto de 2018).
- Rodríguez, C. 2017. *Evaluación del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica) como agente estabilizante en néctar de maracuyá (Passiflora edulis)*. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos. (Consultado: 05 de agosto de 2018).
- Sáenz, C. 2018. *Utilización agroindustrial del nopal*. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120301/Utilizacion_agroindustrial-del-nopal.pdf?sequence=1. (Consultado 14 de agosto de 2018).
- Sánchez-Urdaneta, A. 2017. Características físicas y químicas de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Revista Fac. Agronomía*, 34(2), 175-86. Disponible en: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27227>. (Consultado: 20 de septiembre de 2018).
- Sepúlveda, S. y Rodríguez, A. 2003. *El enfoque territorial del desarrollo rural*. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/El_enfoque_territorial_del_desa

rrollo_ru.html?id=1tOB3F1FHUgC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. (Consultado: 14 de septiembre de 2018). Vicepresidencia República del Ecuador. 2015. *Estrategia nacional para el cambio de la matriz productiva*. Disponi-

ble en: <https://www.vicepresidencia.gob.ec/wp-content/uploads/2013/10/ENCMPweb.pdf>. (Consultado: 20 de septiembre de 2018).



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

FACTORES QUE INCIDEN EN LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN ECUADOR

Factors that influence the probability of occurrence of forest fires in Ecuador

Carla Balcázar Gallegos
 Universidad Técnica Particular de Loja
 cibalcazar@utpl.edu.ec
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5646-0263>

Fabián Reyes Bueno
 Universidad Técnica Particular de Loja
 frreyes@utpl.edu.ec
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5646-0263>

Recibido: septiembre de 2020
 Aprobado: mayo de 2021
 ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: 10.29166/revfig.v11i1.2634

RESUMEN

Los incendios forestales son un problema ambiental y socioeconómico, la frecuencia y área afectada por estos eventos se atribuyen al cambio climático y las actividades antropogénicas que se desarrollan en el territorio. Como parte de los programas de prevención, es necesario identificar y limitar las áreas susceptibles a incendios forestales para la priorización de recursos por parte de los entes encargados. Los sistemas de información geográfica y MaXent (modelos de entropía máxima) son usados para este fin. Los datos de ocurrencia de incendios fueron obtenidos de la plataforma *Active fire data*. Como variables independientes se obtuvo información del clima del WorldClim, y se generaron variables de accesibilidad para la zona de estudio, en el periodo 2012-2018. En este modelo se identificó que la variable distancia a zonas antrópicas es la de mayor importancia y con ello el predictor más susceptible a un incendio forestal en el cantón Loja, seguida de las variables climáticas: temperatura mínima en el mes más frío y la precipitación en el trimestre más seco; estas tres variables coinciden dentro de las características que se señalan en los pocos estudios encontrados y realizados por entidades públicas a nivel nacional. Se analizó de forma superficial el tiempo de llegada del cuerpo de bomberos a las áreas identificadas como susceptibles, obteniéndose que casi el 99,96% de éstas se encuentran fuera del tiempo de atención óptimo (5 min) y un 32,94% están dentro del radio de acción de 7 km, lo cual tiene injerencia negativa en el control de un incendio forestal.

ABSTRACT

Forest fires are an environmental and socioeconomic problem; the frequency and area affected by these events are attributed to climate change and anthropogenic activities in the territory. As part of the prevention programs, it is necessary to identify and limit the areas susceptible to forest fires for the prioritization of resources by the responsible entities. Geographic information systems and MaXent (maximum entropy models) are used for this purpose. Fire occurrence data were obtained from the Active fire data platform. As independent variables, climate information was obtained from WorldClim, and accessibility variables were generated for the study area, in the period 2012-2018. In this model it was identified that the variable distance to anthropic zones is the most important and thus the most susceptible predictor to a forest fire in

PALABRAS CLAVE Incendios forestales, gestión del fuego, análisis espacial, MaXent.

KEYWORDS Forest fires, fire management, spatial analysis, MaXent.

Loja canton, followed by the climatic variables minimum temperature in the coldest month and precipitation in the driest quarter; these three variables coincide within the characteristics that are indicated in the few studies found and by public entities at the national level. A superficial analysis was made of the arrival time of the Fire Department to the areas identified as susceptible, showing that almost 99.96% of these areas are outside the optimal response time (5 min) and 32.94% are within the 7 km radius of action, which has a negative impact on the control of a forest fire.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los incendios representan una amenaza para los ecosistemas forestales, sean éstos originados por factores naturales o antropogénicos; a su vez, el aumento en la frecuencia y la gravedad en estos eventos se ven potenciados por el cambio climático, el aumento de la temperatura y la sequedad, los cambios en el uso de la tierra y las intensas actividades antropogénicas (Ghomi, Farahi, Baniasadi y Masoumpoor, 1937; Crimmins, 2006; Running, 2006; Chen *et al.*, 2012; Hantson, Pueyo y Chuvieco, 2014; Eskandari y Chuvieco, 2015), agravando problemas socioambientales del territorio, por lo cual es necesario que los entes encargados de prevenir estos eventos, conservar ecosistemas y gobiernos locales que trabajan en la ordenación del territorio, adopten herramientas que permitan cumplir con dos acciones: a) evaluar la susceptibilidad al fuego, predecir la posible ocurrencia de incendios en el futuro e identificar áreas de alto riesgo; y b) tomar decisiones con respecto a la financiación, desarrollo y despliegue de recursos de extinción y prevención de incendios; sin embargo, el proceso natural que implica la ignición y propagación de incendios forestales tiene una naturaleza compleja y no lineal debido a la incidencia de factores como el clima, topografía, cobertura vegetal, actividad antrópica, etc.; lo que lo hace un evento complejo de predecir (Jaiswal, Mukherjee, Raju y Saxena, 2002; Pourghasemi, 2016; Tien Bui *et al.*, 2017; Ngoc Thach *et al.*, 2018).

A nivel mundial, plataformas como Active Fire Data, World View y Global Forest Watch, permiten identificar las áreas en peligro de incendio a través de anomalías térmicas detectadas por el sensor MODIS (Justice *et al.*, 2002; Renard, *et al.*, 2012). En Ecuador contamos con un modelo nacional de susceptibilidad a incendios forestales construido a partir del análisis físico del fenómeno y está orientado a definir el origen, comportamiento en la ignición, considerando criterios heurísticos y la ponderación de variables; la propuesta metodológica de este modelo de susceptibilidad a incendios forestales se adapta a escala nacional y regional según la Secre-

taría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE, 2017).

Para identificar la susceptibilidad a incendios forestales a diferentes escalas, ecosistemas y localidades en diferentes partes del mundo, se han utilizado varios métodos y algoritmos por medio de los sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección, entre las que destacan en los últimos tiempos las técnicas de minería de datos, debido a que permiten analizar problemas complejos de múltiples variables y construir modelos predictivos a partir de grandes conjuntos de datos. Entre las técnicas que se usan, están el modelo lineal generalizado (GLM) (Bar Massada *et al.*, 2012); los árboles de clasificación y regresión (CART) (Amatulli *et al.*, 2006); la regresión múltiple logística (LMR), bosque aleatorio (RF) es un desarrollo de métodos de clasificación y árbol de regresión (Oliveira *et al.*, 2012); redes neuronales artificiales (ANA) (Bisquert *et al.*, 2012); árboles de regresión impulsado (BRT) es una combinación de técnicas estadísticas y de aprendizaje automático y una extensión de CART; máquina de vectores de soporte (SVM) (Hong *et al.*, 2018); red neuronal perceptrónica multicapa (MLP) (Ngoc Thach *et al.*, 2018); regresión logística del núcleo (KLR) (Zhang, Wang y Liu, 2019); árboles de decisión impulsados por gradiente (Sachdeva, Bhatia y Verma, 2018); modelos de optimización de enjambre de partículas (Tien Bui *et al.*, 2017); MaXent que, en sí, es un modelo de aprendizaje automático disponible como software e implementado en PC (Phillips, Anderson y Schapire, 2006), el principio de este último recurso consiste en estimar la distribución de probabilidad de la entropía máxima (la más extendida o más cercana al uniforme) basado en dos conjuntos de datos: a) un conjunto de variables (tipo ráster) que en el caso de los incendios forestales se relacionan con el «triángulo del fuego»; b) registros georreferenciados de «presencia» de incendios, a partir de los datos mencionados se obtiene un mapa (tipo ASCCI) que muestra la gradiente de probabilidad de ocurrencia de incendio por pixel, lo que resulta en un mapa de susceptibilidad, en donde los valores cercanos a 100 representan los pixeles que cumplen con las carac-

terísticas para que se origine un incendio forestal y los valores cercanos a cero no cumplen con estas características (Phillips, Anderson y Schapire, 2006; Renard *et al.*, 2012; Ibarra-Montoya y Huerta-Martínez, 2016).

Como se puede percibir, el modelo a obtenerse en Maxent es confiable y fácil de conceptualizar (Elith *et al.*, 2006; Correia, 2019); sumado a la sencillez de su interfaz gráfica y al uso libre del software lo hace un programa altamente utilizado en diferentes estudios afines a la problemática en cuestión (Bar Massada *et al.*, 2012; Ibarra-Montoya y Huerta-Martínez, 2016; Garrido *et al.*, 2018).

Con estos antecedentes, el presente estudio pretende dar datos empíricos para una planificación eficiente en prevención y mitigación de los incendios forestales en Ecuador, a través de un estudio de caso en el cantón Loja; identificando áreas susceptibles a incendios forestales a partir de un modelo construido en Maxent, con datos de presencia de incendios forestales obtenidos del sensor MODIS y combinaciones de variables predictoras de estos eventos, pretendiendo que el modelo también pueda ser replicado en otras localidades. A su vez, como parte del control del fuego se identifica el tiempo de llegada del Cuerpo de Bomberos.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El cantón Loja se encuentra al sur del Ecuador (ver Figura 1), forma parte de la jurisdicción política de la provincia que tiene el mismo nombre y posee una superficie aproximada de 1895,53 km². El clima es templado-ecuatorial, subhúmedo, con una temperatura promedio de 16-24 °C y un rango altitudinal de 1200-3800 m s. n. m. (Gobierno Provincial de Loja, 2016).

La época de mayor incidencia de incendios forestales se presenta durante los meses de julio a diciembre (Galindo, Sarango y Villarroel, 2012). Estos incendios suelen ocurrir, sobre todo, por la quema descontrolada de matorrales y potreros para un nuevo periodo de cultivo, según el Plan de Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Loja (GAD Municipio de Loja, 2014).

METODOLOGÍA

En esta sección primero se describe el desarrollo del modelo de susceptibilidad a través del preprocesamiento de datos y el ajuste de MaXent para la obtención del modelo final y clasificación de probabilidad.

DATOS DE LA PRESENCIA DE INCENDIO FORESTALES

De la plataforma Active fire data (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/#firms-shapefile), se descargaron los datos georreferenciados de incendios forestales del sensor MODIS (espectro radiómetro de imágenes de media resolución), satélite que fue el primero en monitorear los incendios a través de la detección de anomalías térmicas por pixel (Justice *et al.*, 2002; Renard *et al.*, 2012). La información relacionada con cada registro y relevante para el presente estudio incluyó la ubicación (latitud y longitud) y fecha. La confiabilidad y precisión de MODIS ha sido comprobada en estudios como el de Huesca, González-Alonso y Cuevas (2009); Merino-de-Miguel, Gonza y Huesca (2011); Renard *et al.* (2012). Si bien el sensor presenta conflictos en la obtención de valores de reflectividad de superficie por la presencia de nubes y puede confundir las sombras de las nubes como área quemada, los datos de éste nos aproximan a la realidad de la problemática (Jin y Sader, 2005; Giglio *et al.*, 2018; Roteta *et al.*, 2019). Para el periodo 2012-2018, se seleccionó aquellos datos correspondientes al área de estudio y se filtró para escoger los que se encontraban en áreas de vegetación nativa y plantación forestal.

PREDICTORES MEDIOAMBIENTALES

Consideramos diferentes conjuntos y fuentes predictores ambientales de ocurrencia de incendios, los mismos se resumen en la tabla 1.

Predictores antrópicos

Teniendo en cuenta que la variable antrópicos es una fuerte predictora de incendios forestales según (Chuvieco *et al.*, 2007; Vilar del Hoyo *et al.*, 2007) y, según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos el 99% de los incendios forestales en el Ecuador se dan por la intervención del hombre (Ocles, 2008). Se crearon a partir de las capas tipo .shp* de vías, ríos, pendiente, cobertura vegetal y centros económicos; tres capas de accesibilidad, es decir, capas que nos indiquen el tiempo de desplazamiento desde cada celda hacia el centro económico, vías, zonas antrópicas y estaciones de bomberos, esta última capa no fue parte del modelo. Las capas obtenidas fueron de tipo ráster y con tamaño de celda de 100 m².

Predictores ambientales

Diecinueve capas bioclimáticas con resolución espacial de 1 km² se descargaron de la página World Clim (versión 1.4) (Fick y Hijmans, 2017), estas fueron cortadas para el área de estudio y reproyectadas al sistema wgs84/utm-17s (ver Tabla 1).

Los datos tipo ráster se los transformó a archivos ASCII (archivo compatible con MaXent) y se verificó

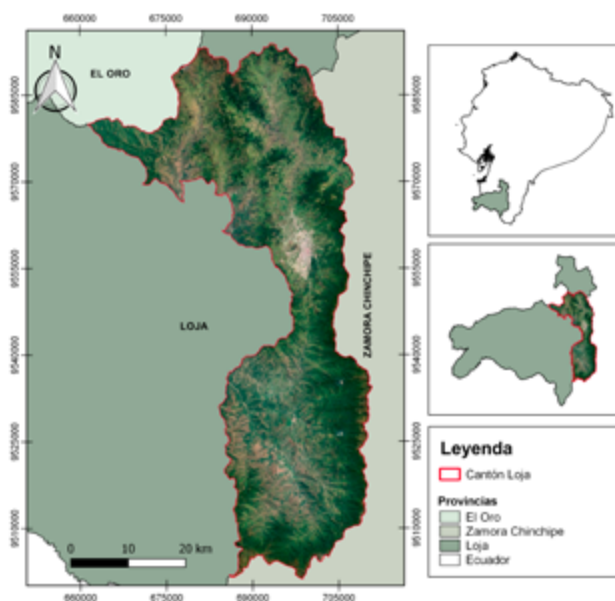


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del cantón Loja, provincia de Loja-Ecuador.

Tabla 1. Las variables predictoras de incendios forestales y utilizadas en el primer modelo.

N.º	Variable		Resolución /Escala	Unidad	Formato original de datos	Fuente
1	Distancia a zonas antrópicas	Elevación/pendiente	30 m	Grados	Ráster	OpenTopography
2	Distancia a centros económicos	Cobertura vegetal	1:50 000	M	Shape/ Vector	Instituto Geográfico Militar
3	Distancia a vías	Ríos	1:50 000	M	Shape/ Vector	Instituto Geográfico Militar
		Vías	1:50 000	M	Shape/ Vector	Instituto Geográfico Militar
4	BIO1 Temperatura media anual		1 km	°C	Ráster	WorldClim
5	BIO2 Intervalo diurno medio (promedio mensual (temperatura máxima - temperatura mínima)		1 km	°C	Ráster	WorldClim
6	BIO3 Isotermia (BIO2 / BIO7) (* 100)		1 km	°C	Ráster	WorldClim
7	BIO4 Temperatura estacional (desviación estándar * 100)		1 km	°C	Ráster	WorldClim
8	BIO5 Temperatura máxima del mes más cálido		1 km	°C	Ráster	WorldClim
9	BIO6 Temperatura mínima del mes más frío		1 km	°C	Ráster	WorldClim
10	BIO7 Rango anual de temperatura (BIO5 - BIO6)		1 km	°C	Ráster	WorldClim
11	BIO8 Temperatura media de trimestre más húmedo		1 km	°C	Ráster	WorldClim

12	BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	1 km	°C	Ráster	WorldClim
13	BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	1 km	°C	Ráster	WorldClim
14	BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	1 km	°C	Ráster	WorldClim
15	BIO12	Precipitación anual	1 km	mm	Ráster	WorldClim
16	BIO13	Precipitación del mes más húmedo	1 km	mm	Ráster	WorldClim
17	BIO14	Precipitación del mes más seco	1 km	mm	Ráster	WorldClim
18	BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	1 km	mm	Ráster	WorldClim
19	BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo	1 km	mm	Ráster	WorldClim
20	BIO17	Precipitación del trimestre más seco	1 km	mm	Ráster	WorldClim
21	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	1 km	mm	Ráster	WorldClim
22	BIO19	Precipitación del trimestre más frío	1 km	mm	Ráster	WorldClim

MaXent: modelo de incendios

que estén en una misma resolución y extensión espacial. Antes de obtener el modelo final se realizó un modelo previo, para identificar las variables de mayor importancia. En el primer modelo se utilizaron las diecinueve capas bioclimáticas y tres capas de accesibilidad (Tabla 1), estas capas se ajustaron a un tamaño en común de 100 m².

En el segundo modelo se realizó un análisis de correlación (Pearson) entre las veintidós capas, eliminándose aquellas variables que resultaron tener una fuerte correlación (> 0,8) con las variables que de acuerdo con el primer modelo contribuían más. Finalmente, fueron seleccionadas doce variables para generar el modelo definitivo (ver Figura 2). En ambos modelos, el 25% de los 170 datos obtenidos fueron utilizados para la evaluación del modelo, y se realizó un test de Jackknife para identificar las variables que tienen mayor peso dentro del modelo a obtenerse (Phillips, Anderson y Schapire, 2006).

Para validar el modelo final, se evaluó su rendimiento en función del ROC (Receiver Operating Characteristic), comúnmente utilizado para evaluar modelos de distribución y que proporciona un área bajo la curva como una medida general del modelo (Fielding y Bell, 1997; Phillips, Anderson y Schapire, 2006).

Mapeo de susceptibilidad de incendios forestales y tiempo de accesibilidad

El modelo resultante fue un modelo logístico, que fue reclasificado en 3 rangos de probabilidad (ver Tabla 2) elegidos a partir del criterio del autor, esto permitió obtener un archivo shape (*.shp) y eliminar los datos de una probabilidad baja.

También se creó una capa de accesibilidad a esta-

ciones de bomberos y en esta se definió intervalos de tiempo de 0-5, 5-30, 30-60 y de más de 60 min. En la capa de cobertura vegetal se eliminó aquellos datos que correspondían a un uso antrópico, dejándose solo los datos de vegetación natural y plantaciones forestales. Las tres capas provenientes del proceso anterior fueron unidas, lo que permitió identificar aquellas zonas de vegetación natural o plantaciones forestales con probabilidad media o alta de incendio y tiempo de accesibilidad a esos sitios.

RESULTADOS

MODELO PREDICTIVO MAXENT

La robustez del modelo se ve respaldada por los estudios de Welsh *et al.* (1996); Peterson *et al.* (2000); Stockwell y Peterson (2002), que mencionan que se debe utilizar como mínimo 50 puntos y tomar en cuenta la resolución espacial para tener una buena aproximación de las condiciones del territorio; en el presente estudio se utilizó 170 puntos de presencia y variables con una resolución espacial fina (píxeles de 1 km²). Con respecto a la calidad del modelo, según Parolo, Rossi y Ferrarini (2008) y Correia (2019), es buena al arrojar un área bajo la curva (AUC) de 0,872 para los datos de enteramiento (training data). En la prueba Jackknife las variables que tuvieron mayor ponderación dentro del modelo son: distancia a zonas antrópicas, la temperatura media del trimestre más frío (Bio6) y la precipitación del trimestre más seco (Bio17).

Analizando las curvas de repuesta generadas en el software, las zonas que tienen una susceptibilidad media de que ocurra un incendio forestal son aquellas que se encuentra a una distancia menor a 2700 m de

Tabla 2. Clasificación de los valores únicos asignados a la probabilidad de incendios forestales

Valor de celda	Valor único asignado	Clasificación
0 a < 0,5	0	Baja
>= 0,5 a <= 0,8	1	Media
> 0,8	2	Alta

las zonas antrópicas, siendo éste el predictor más fuerte para la ocurrencia de incendios forestales; con respecto a la variable temperatura mínima en el mes más frío que corresponde al mes de julio y la precipitación en el trimestre más seco que corresponde a los meses de julio, agosto, septiembre, según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2018). Si existe una temperatura que varía entre 9,2 y 12,5 °C; y una precipitación de 75 mm, existe mayor probabilidad de que ocurra un incendio forestal en dichos meses.

ÁREA SUSCEPTIBLE A INCENDIOS FORESTALES

Existe un total de 26.812,48 (20,48%) de las 130.892,35 ha de cobertura natural del cantón, que tienen una probabilidad entre el 50%-80% de ocurrencia de incendios forestales. La vegetación arbustiva y herbácea representan el 21,33% y 51,34% del área identificada, respectivamente; la cobertura forestal es la menos susceptible a incendios forestales, con un área que representa el 2,93% de la identificada (ver Figura 3a).

ACCESIBILIDAD EN MINUTOS A LAS ÁREAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS FORESTALES

El 32,94% (8833 ha) del área susceptible a incendios forestales se encuentra dentro del radio de acción de 7 km de las estaciones de bomberos, de éstas, solo 10,67 ha tienen un tiempo de llegada de 5 min del Cuerpo de Bomberos, tiempo recomendado por la SNGRE (2016) y la National Fire Protection Association (NFPA, 2018). Para identificar la calzada de las vías de acceso a las zonas identificadas como susceptibles a incendios forestales, se realizó una consulta espacial en el software QGIS. Una buena parte de las zonas que tienen un tiempo de llegada mayor a 60 min tienen acceso por vías de tierra; las que están en un tiempo de 30 a 60 min tienen vías de tierra y lastradas, y las zonas con un tiempo de llegada de 5 a 30 min y de 0 a 5 min, tienen los tres tipos de vías: de tierra, lastrada y de pavimento. En la figura 3b se identifica el área afectada de incendios según el tiempo de llegada del Cuerpo de Bomberos (ver Figura 3b).

DISCUSIÓN

Al comportarse como un proceso estocástico la ignición por fuego y el entorno variable de nuestra área de

estudio, no se puede dar conclusiones generales sobre el proceso de pre-ignición; sin embargo, se identifica que la variable distancia a zonas antrópicas es el predictor que incide en la mayor ocurrencia de incendios forestales. Este resultado concuerda con los estudios realizados por Sturtevant y Cleland (2007); Syphard *et al.* (2007); Bar Massada *et al.* (2012); Parisien *et al.* (2012) en diferentes localidades y que proyectan a las actividades antrópicas y cercanía de las poblaciones como la principal causa de incendios forestales; así mismo concuerda de forma local, con lo descrito en el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Loja (GAD Municipio de Loja, 2014). Adicionalmente, las variables climáticas que son fuertes predictoras de incendios forestales en el cantón Loja son la temperatura media del trimestre más frío (Bio6) y la precipitación del trimestre más seco (Bio17), predictores que suelen ocurrir entre los meses de julio y septiembre.

Las variables antropogénicas a menudo se obtienen fácilmente y pueden claramente relacionarse con la distancia o densidad de los incendios, no se puede decir lo mismo de los datos climáticos, los cuales a menudo no tienen la misma resolución y calidad. Esto limita la georreferenciación de áreas problemáticas, pero ayudan a estimar la probabilidad de incendio cuando no contamos con datos climáticos multitemporales y cuando hemos limitado los datos de incendios a áreas forestales. Hay que mencionar que el área de estudio, por sus condiciones climáticas y estructura de la vegetación (poca combustibilidad), no presenta incendios como un proceso natural y, por ende, la variable climática no está relacionada directamente en el origen de estos eventos (Arpaci *et al.*, 2014; Merino-de-Miguel, Gonza y Huesca, 2011), pero sí influye en el desarrollo de las actividades antrópicas, de forma especial en la agricultura. Justamente en los meses mencionados es en donde se da la preparación de terreno previa a la siembra agrícola, y por ende se puede apreciar que existe una mayor frecuencia de incendios forestales (Galindo, Sarango y Villarroel, 2012; GAD Municipio de Loja, 2014; Soto, 2017).

Ante la falta de estudios y para validar el modelo, se comparó las áreas (parroquias) identificadas como susceptibles a incendios forestales con datos de fre-

cuencia de incendios proporcionados por la SNGRE, comprobándose que las áreas identificadas coinciden, y que el modelo puede ser útil para la limitación de áreas susceptibles a incendios forestales y posterior uso eficiente de recursos en las campañas de prevención y mitigación de incendios forestales por parte de las entidades involucradas (Armenteras, González y Franco, 2009; Rodríguez Montellano, 2012; Díaz-Hormazábal y González, 2016). A nivel nacional, el 99% de los incendios forestales se atribuye a las actividades antrópicas, pero esto no está respaldado con datos estadísticos, por lo cual este estudio también puede contribuir a esa discusión, y evidenciar que las variables climáticas juegan un papel importante en la distribución espacial y origen de los incendios forestales y dar paso a un estudio más profundo sobre su relación multitemporal con los incendios y actividades económicas

Como punto aparte, dentro del control de los incendios forestales es necesario identificar el tiempo de atención del Cuerpo de Bomberos de Loja (CBL). Según la SNGRE (2016) y NFPA (2018) el tiempo óptimo de atención del cuerpo de bomberos a cualquier emergencia, incluyendo incendios forestales es de 5 min, pero en estudios en diferentes partes del mundo se estima un tiempo óptimo entre 4 y 6 min (Liu, Huang y Chandramouli, 2006; Zhang y Jiang, 2012; Savsar, 2014; Satchet *et al.*, 2018). Dicho esto, el 99,96% de área susceptible a incendios forestales identificada en el presente estudio está fuera del tiempo de atención óptimo establecido por la entidad nacional (SNGRE) y mundial (NFPA), sin embargo, esto no implica una negligencia por parte del CBL ya que este ente basa su ubicación en la concentración poblacional y cobertura territorial, además, que el tiempo de atención se ve afectado por la existencia de barreras físicas, geográficas y la topografía (Aponte, 2016; Díaz, 2018). La importancia de tomar en cuenta el tiempo de atención dentro de los programas de prevención, es que una vez identificadas las áreas susceptibles se podrá implementar brigadas comunitarias (primera respuesta) en sectores problemáticos, las

mismas que pueden ayudar en la prevención y control del fuego, y promover prácticas seguras de quema en la agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2000).

El estudio representa el primer modelo predictivo de susceptibilidad a incendios forestales realizado en el cantón Loja, utilizando un algoritmo de aprendizaje automático como lo es el software MaXent, cuyo uso ha sido puesto en discusión en estudios como los de Phillips, Anderson y Schapire (2006); Chen *et al.* (2015). La confianza en este software es validada por la predicción que realiza en función de datos de presencia de los eventos y la relación que tienen éstos con las variables del entorno.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio nos indican con datos empíricos, que la vegetación nativa y forestal que se encuentre a una distancia no mayor de 2700 m a zonas en donde se desarrollan las actividades antrópicas, son aquellas que son más susceptibles a la ocurrencia de un incendio forestal. Así mismo, podemos comprobar, y de acuerdo a la variables utilizadas, que la temporada de incendios forestales en el cantón Loja, abarca los meses de julio, agosto y septiembre.

A pesar de que un incendio forestal se comporta como un proceso estocástico, el uso del software MaXent es una herramienta útil, de fácil manejo y conceptualización del modelo a obtenerse. En cuanto a incendios forestales, lo que lo hace atractivo para que entidades ajenas a la academia, puedan utilizarlo y ejecutar a partir de los resultados, programas de mitigación, prevención y control. Recalcando que el rol de la academia siempre será importante para el desarrollo de investigación con respecto al proceso de preignición, ignición, afectación y recuperación de una zona quemada.

Levantar información con respecto a la accesibilidad de los servicios de emergencia daría información valiosa con respecto a su ubicación y eficiencia de atención a zonas problemáticas o alejadas, siendo este un punto que se debe empezar a investigar.

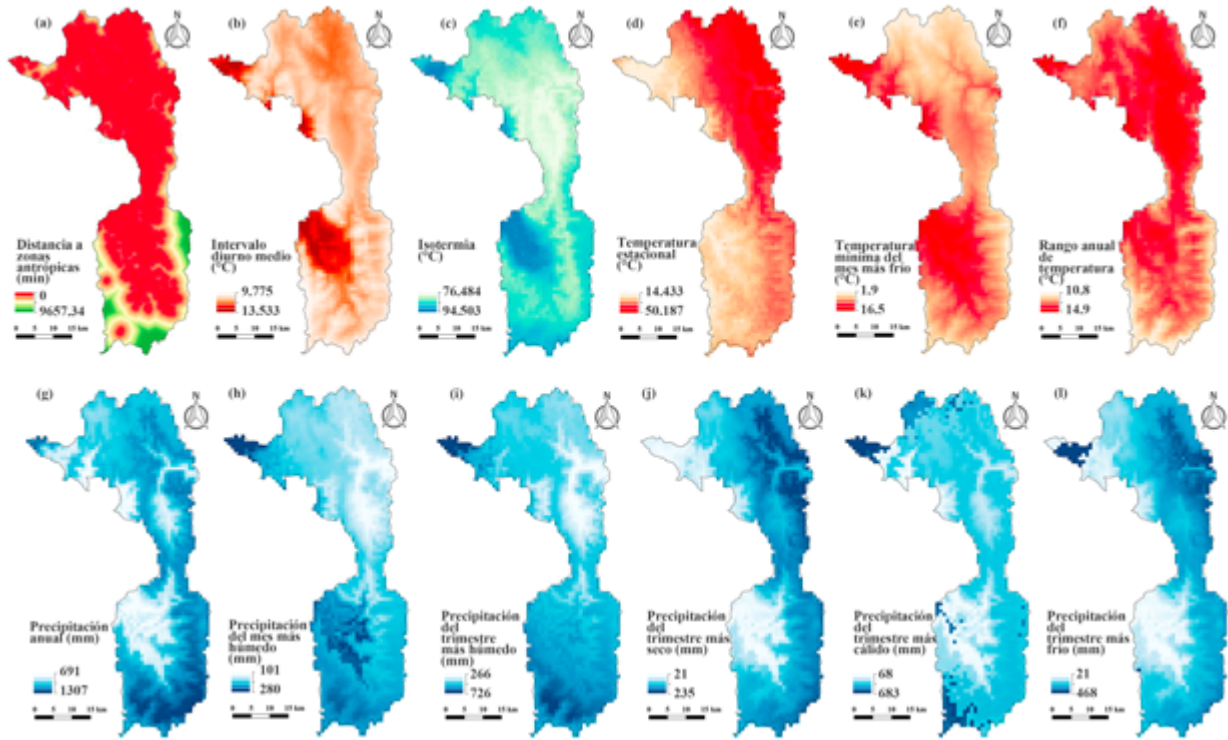


Figura 2. Variables utilizadas en el modelo final.

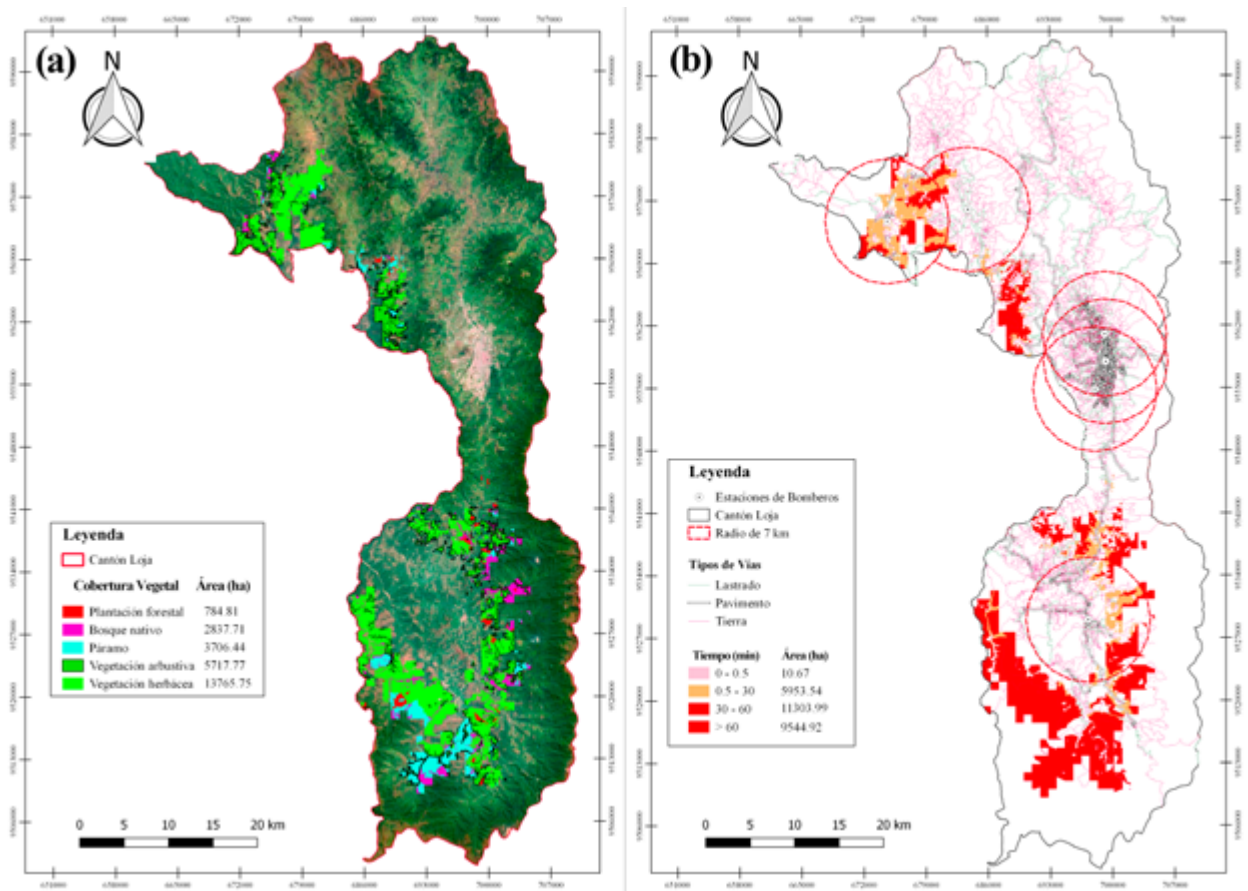


Figura 3a. Cobertura vegetal y forestal susceptible a incendios forestales.

Figura 3b. Tiempo de accesibilidad del Cuerpo de Bomberos hacia las áreas de mayor probabilidad a incendios forestales.

REFERENCIAS

- Amatulli, G., Rodrigues, M., Trombetti, M. y Lovreglio, R. 2006. Assessing long-term fire risk at local scale by means of decision tree technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(4), 1-15. DOI: 10.1029/2005JG000133.
- Aponte, F. 2016. *Accesibilidad de los organismos de socorro en la ciudad de Santiago de Cali y su impacto en la población* (Tesis de maestría). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible en: https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/UPTC2017-01.pdf.
- Armenteras, D., González, F. y Franco, C. 2009. Distribución geográfica y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas. *Caldasia*, 31(2), 303-318. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36107> (Accedido: 15 de septiembre de 2019).
- Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O. y Vacik, H. 2014. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of tyrolean forests. *Applied Geography*, 258-270. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.05.015.
- Bar Massada, A., Syphard, A., Stewart, S. y Radeloff, V. 2012. Wildfire ignition-distribution modelling: a comparative study in the Huron-Manistee National Forest, Michigan, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 22(2), 174-183. DOI: 10.1071/WF11178.
- Bisquert, M., Caselles, E., Sánchez, J. y Caselles, V. 2012. Application of artificial neural networks and logistic regression to the prediction of forest fire danger in Galicia using MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*, 21(8), 1025-1029. DOI: 10.1071/WF11105.
- Chen, C., Karpatne, A., Chamber, Y., Mithal, V., Lau, M., Steinhäuser, K., Boriah, S., Steinbach, M. y Kumar, V. 2012. A new data mining framework for forest fire mapping, in Conference on Intelligent Data Understanding, pp. 771-794. DOI: 10.4018/978-1-5225-5191-1.ch033.
- Chen, F., Du, Y., Niu, S. y Zhao, J. 2015. Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling mountains of northeastern China with MAXENT. *Forests*, 6(5), 1422-1438. DOI: 10.3390/f6051422.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yerba, M., Nieto, H., Martín, P., Vilar, L., Martínez, J., Padrón, D., Martín, S. y Salas, J. 2007. Generación de un modelo de peligro de incendios forestales mediante teledetección y SIG. *Teledetección: hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, 19-26.
- Correia, M. 2019. Criterios confiables para la construcción del modelo de máxima entropía-MAXENT (Parte 2), 20 de enero, 8-13. DOI: 10.13140/RG.2.2.36673.81769.
- Crimmins, M. A. 2006. Synoptic climatology of extreme fire-weather conditions across the southwest United States. *International Journal of Climatology*, 26(8), 1001-1016. DOI: 10.1002/joc.1300.
- Díaz-Hormazábal, I. y González, M. E. 2016. Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque*, 37(1), 147-158. DOI: 10.4067/S0717-92002016000100014.
- Díaz, D. 2018. *Medición de accesibilidad geográfica entre centros poblados del cantón Tena, Ecuador* (Tesis de máster). Universidad de Salzgorno. Disponible en: https://issuu.com/unigis_latina/docs/diaz_checa (Accedido: 20 de octubre de 2019).
- Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L., Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC. Overton, J., Townsend, A., Phillips, S., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. y Zimmermann, N. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. Disponible en: <http://rob.schapire.net/papers/nceas.pdf> (Accedido: 4 de agosto de 2019).
- Eskandari, S. y Chuvieco, E. 2015. Fire danger assessment in Iran based on geospatial information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 57-64. Elsevier B. V. DOI: 10.1016/j.jag.2015.05.006.
- Fick, S. y Hijmans, R. 2017. WorldClim: global climate data. Disponible en: <http://worldclim.org/version2> (Accedido: 15 de julio de 2019).
- Fielding, A. H. y Bell, J. F. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49. DOI: 10.1017/S0376892997000088.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2000. Communities in flames: Proceedings of an international conference on community involvement in fire management. Editado por Peter Moore *et al.*, Bangkok, Thailand: Regional Office for Asia and the Pacific. *Fire Fight South East Asia*. Rap Publications. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AC798E/AC798E00.htm> (Accedido: 1 de agosto de 2020).
- Galindo, G., Sarango, J. y Villarroel, V. 2012. *Los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito. Evaluación 2012*. Quito. Disponible en: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/patrimonio_natural/Evaluación de los incendios forestales en el 2012.pdf (Accedido: 19 de noviembre de 2018).
- Garrido, J., Vilar, L., Echavarría, P., Martínez-Vega, J. y Martín, M. 2018. ¿Pueden las interfaces de usos del suelo explicar la ocurrencia de incendios forestales a escala provincial? Los casos de Zamora y Madrid. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 22, 71-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.21138/GF.611>.
- Ghomi, A., Farahi, E., Baniyasi, R. y Masoumpoor, F. 1937. Rating and mapping fire hazard in the hardwood Hyrcanian forests using GIS and expert choice software, acknowledgement to reviewers of the manuscripts submitted to *Forestry Ideas*, 19(2), 141-150.
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Humber, M. y Justice, C. 2018. Remote sensing of environment the Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, (217), 72-85, July. Elsevier. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
- Gobierno Autónomo Descentralizado-Municipio de Loja. 2014. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Loja.

- Gobierno Provincial de Loja. 2016. *Guía turística de la provincia de Loja*. Prefectura. Editado por D. Cueva. Loja. Disponible en: <http://intranet.prefecturaaloja.gob.ec/wp-content/uploads/2018/01/turismo.pdf>.
- Hantson, S., Pueyo, S. y Chuvieco, E. 2014. Global fire size distribution is driven by human impact and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 24(1), 77-86. DOI: 10.1111/geb.12246.
- Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A. y Xu, C. 2018. Applying genetic algorithms to set the optimal combination of forest fire related variables and model forest fire susceptibility based on data mining models. The case of Dayu county, China. *Science of the Total Environment*, 630, 1044-1056. Elsevier B. V. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.278.
- Huesca, M., González-Alonso, F. y Cuevas, J. 2009. Distribución espacial y temporal de los incendios forestales en España utilizando datos de anomalías térmicas. En Salomón Montesinos Aranda y Lara Fernández Fornos (eds.), *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible*. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud: 23-26 de septiembre, pp. 309-312. Disponible en: <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal78.pdf> (Accedido: 15 de septiembre de 2019).
- Ibarra-Montoya, J. y Huerta-Martínez, F. 2016. Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el bosque La Primavera, Jalisco México. *Revista Ambiente & Agua*, 11(1), 35-49. DOI: 10.4136/1980-993X.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2018. *Publicaciones meteorológicas*. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/> (Accedido: 5 de agosto de 2019).
- Jaiswal, R., Mukherjee, S., Raju, K. y Saxena, R. 2002. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), 1-10. DOI: 10.1016/S0303-2434(02)00006-5.
- Jin, S. y Sader, S. A. 2005. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. *Remote Sensing of Environment*, 99(4), 462-470. DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.017.
- Justice, C., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. y Roy, D. 2002. The MODIS fire products, 83, 244-262. DOI: doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7.
- Liu, N., Huang, B. y Chandramouli, M. 2006. Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(5), 361-369. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:5(361).
- Merino-de-Miguel, S., Gonza, F. y Huesca, M. 2011. MODIS reflectance and active fire data for burn mapping in Colombia. *Earth Interactions*, 15(10), 17. DOI: 10.1175/2010EI344.1.
- National Fire Protection Association. 2018. NFPA 1. Disponible en: <https://www.nfpa.org/> (Accedido: 5 de noviembre de 2019).
- Ngoc Thach, N., Bao-Toan Ngo, D., Xuan-Canh, P., Hong-Thi, N., Hang Thi, B., Nhat-Duc, H. y Dieu, T. 2018. Spatial pattern assessment of tropical forest fire danger at Thuan Chau area (Vietnam) using GIS-based advanced machine learning algorithms: a comparative study. *Ecological Informatics*, 46, 74-85. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2018.05.009.
- Ocles, M. A. 2008. Red Interamericana de Mitigación de Desastres. Secretaría de Gestión de Riesgos. Disponible en: <http://www.rimd.org/organizacion.php?id=189> (Accedido: 16 de noviembre de 2019).
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A. y Pereira, José M. 2012. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using multiple regression and random forest. *Forest Ecology and Management*, 275, 117-129. Elsevier B. V. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.03.003.
- Parisien, M., Snetsinger, S., Greenberg, J., Nelson, C., Schoenagel, T., Dobrowski, S. y Moritz, M. 2012. Spatial variability in wildfire probability across the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 21(4), 313-327. DOI: 10.1071/WF11044.
- Parolo, G., Rossi, G. y Ferrarini, A. (2008). Toward improved species niche modelling: Arnica montana in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology*, 45(5), 1410-1418. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01516.x.
- Peterson, A., Egbert, S., Sánchez-Cordero, V. y Price, K. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic birds and mammals in Veracruz, México. *Biological Conservation*, 93(1), 85-94. DOI: 10.1016/S0006-3207(99)00074-9.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. Elsevier. DOI: 10.1016/J.ECOLMODEL.2005.03.026.
- Pourghasemi, H. R. 2016. GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: a comparison between evidential belief function and binary logistic regression models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(1), 80-98. DOI: 10.1080/02827581.2015.1052750.
- Renard, Q., Plissier, R., Ramesh, B. y Kodandapani, N. 2012. Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. *International Journal of Wildland Fire*, 21(4), 368-379. DOI: 10.1071/WF10109.
- Rodríguez Montellano, A. 2012. Cartografía multitemporal de quemadas e incendios forestales en Bolivia: detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia*, 47(1), 53-71. Disponible en: <https://url2.cl/9mvCr> (Accedido: 12 de noviembre de 2019).
- Roteta, E., Bastarrika, A., Padilla, M., Storm, T. y Chuvieco, E. 2019. Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: generation of a small fire database for sub-saharan Africa. *Remote Sensing of Environment*, 222, 1-17. Elsevier Inc. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.011.
- Running, S. W. 2006. Is global warming causing more, larger wildfires? *Science*, 313(5789), 927-928. DOI: 10.1126/science.1130370.
- Sachdeva, S., Bhatia, T. y Verma, A. K. 2018. GIS-based evolutionary optimized gradient boosted decision trees for forest fire susceptibility mapping. *Natural Hazards*,

- 92(3), 1399-1418. Springer Netherlands. DOI: 10.1007/s11069-018-3256-5.
- Satchet, M. S., Muhammad-Ali, A. H., Khalaf, Y. H., Jaber, A. S. y Wanas, S. K. 2018. Assessment and development of the spatial coverage of fire service in Nasiriyah city by using geographic information systems (GIS). *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(7), 936-947. Disponible en: <https://url2.cl/ELtz4> (Accedido: 18 de noviembre de 2019).
- Savsar, M. 2014. Fire station location analysis in a metropolitan area. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 16(3), 365-381. Inderscience Enterprises Ltd. DOI: 10.1504/IJISE.2014.060134.
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. 2017. *Propuesta metodológica. Susceptibilidad a incendios forestales*. Quito.
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. 2016. *Guía operativa para la organización y funcionamiento de los cuerpos de bomberos a nivel nacional*. Samborondón. Disponible en: <https://url2.cl/NSkwi> (Accedido: 13 de noviembre de 2018).
- Soto, F. 2017. *Cartografía, evaluación y seguimiento de incendios forestales de la zona sur del Ecuador usando datos satelitales* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja.
- Stockwell, D. R. B. y Peterson, A. T. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling*, 148(1), 1-13. DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00388-X.
- Sturtevant, B. R. y Cleland, D. T. 2007. Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. *International Journal of Wildland Fire*, 16(4), 398-413. DOI: 10.1071/WF06023.
- Syphard, A., Radeloff, V., Keeley, J., Hawbaker, T., Clayton, M., Stewart, S. y Hammer, R. 2007. Human influence on California fire regimes. *Ecological Applications*, 17(5), 1388-1402. DOI: 10.1890/06-1128.1.
- Tien Bui, D., Bui, Q., Nguyen, Q., Pradhan, B., Nampak, H. y Trinh, P. 2017. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 32-44. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.11.002.
- Vilar del Hoyo, L., Gómez Nieto, I., Martín Isabel, M. y Martínez Vega, F. 2007. Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. *Proceeding of 1v International Wildfire Conference*, 13-17. Disponible en: <https://url2.cl/35X91> (Accedido: 20 de octubre de 2019).
- Welsh, A., Cunningham, R., Donnelly, C. y Lindenmayer, D. 1996. Modelling the abundance of rare species: statistical models for counts with extra zeros. *Ecological Modelling*, 88(1-3), 297-308. DOI: 10.1016/0304-3800(95)00113-1.
- Zhang, G., Wang, M. y Liu, K. 2019. Forest fire susceptibility modeling using a convolutional neural network for Yunnan province of China. *International Journal of Disaster Risk Science*. Beijing Normal University Press, 10(3), 386-403. DOI: 10.1007/s13753-019-00233-1.
- Zhang, W. y Jiang, J. 2012. Research on the location of fire station based on GIS and GA. *Applied Mechanics and Materials*, (130-134), 377-380. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.377.



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

ESTUDIO CINÉTICO DE LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) POSCONSUMO A DIFERENTES TASAS DE CALENTAMIENTO

Kinetic study of the thermal decomposition of high density polyethylene (HDPE) post consumption at different heating rates

Paúl Palmay
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)
Grupo de Investigación Ambiental y Desarrollo (GIADE)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9172-4113>

Renee Jaramillo
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)
Grupo de Investigación Ambiental y Desarrollo (GIADE)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5455-2914>

Carlos Medina
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)
Grupo de Investigación Ambiental y Desarrollo (GIADE)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4916-7242>

Recibido: septiembre de 2020

Aprobado: mayo de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: 10.29166/revfig.v11i1.3132

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo determinar la cinética química de la reacción de degradación térmica del polietileno de alta densidad (HDPE) posconsumo mediante análisis termogravimétrico (TGA) a tasas de calentamiento de 5, 10 y 15 °C min⁻¹, usando atmósfera de nitrógeno a un flujo de 20 mL min⁻¹, en condiciones dinámicas desde 25 a 900 °C. A partir de ello se obtuvieron los datos de degradación (masa vs. tiempo) y su primera derivada, que a su vez fueron aplicados en tres modelos cinéticos para determinar la energía de activación: Friedman (FR), Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) y Flynn-Wall-Ozawa (FWO), tomando el modelo de reacción conocido como Esfera de Contracción (R2) característica para este tipo de plásticos. Se deduce cada uno de los modelos para el tratamiento de termoplásticos, estableciendo que el modelo que describe mejor la cinética de degradación para HDPE es el de Friedman, obteniendo valores de energía de activación de 281, 248 y 232 kJ kmol⁻¹ para las tasas de 5, 10 y 15 °C min⁻¹, respectivamente.

ABSTRACT

The thermal degradation of the post-consumer high-density polyethylene (HDPE) to determine the chemical kinetics is the objective of this research. It was developed through thermogravimetric analysis (TGA) at 5, 10 and 15 °C min⁻¹ heating rates, under nitrogen atmosphere at 20 mL min⁻¹ and dynamic conditions from 25 to 900 °C. The degradation process data (mass vs time) and the first derivative were obtained from that data and were applied in three iso-conversional kinetic models to determine the activation energy: Friedman (FR), Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) and Flynn-Wall-Ozawa (FWO), in addition to the reaction model known as Sphere of Contraction (R2). All the described models fit well for the thermoplastics treatment, however, the models that best describe the degradation kinetics for HDPE are the KAS and FWO models, in these models the activation energy were 281, 248 and 232 kJ kmol⁻¹ for 5, 10 and 15° C min⁻¹ heating rates respectively.

PALABRAS CLAVE HDPE, cinética, degradación, descomposición térmica.

KEYWORDS HDPE, kinetics, degradation, thermal decomposition.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos se producen en una variedad de formas, pesos y con diferentes niveles de duración aprovechando sus propiedades, por lo que tienen muchas aplicaciones para el uso doméstico y en las diferentes industrias. Como consecuencia se generan grandes cantidades de estos residuos, de todo el plástico residual generado en el mundo, se estima que hasta un 70% de ellos son vertidos en rellenos sanitarios y el resto es incinerado (Khedri y Elyasi, 2016; Lovás *et al.*, 2017). La disposición en vertederos no es la mejor opción, ya que los plásticos al no ser biodegradables permanecen cientos de años en el ambiente.

Se considera que los residuos sólidos urbanos (RSU) son la principal fuente de desechos plásticos (Xu *et al.*, 2018) y el polietileno de alta densidad (HDPE) representa aproximadamente el 22,7% en peso de los plásticos en estos residuos (Thomas *et al.*, 2020). La reutilización del HDPE tiene una creciente importancia en los últimos años, debido a la mayor demanda de recursos reciclables y protección del medioambiente. Convertir el plástico de desecho en hidrocarburos comercializables es una forma prometedora de obtener réditos económicos, además de los beneficios ecológicos. Los polímeros termoplásticos, y específicamente el HDPE, se considera como una fuente potencial de combustible, debido a su alto poder calorífico (43,3-46,5 kJ.kg⁻¹); pudiendo descomponerse térmicamente (Al-Salem *et al.*, 2017) en una serie de sustancias químicas valiosas, ofreciendo alternativas nuevas a la combustión tradicional (Al-Salem, 2019).

Hoy en día, la mayor parte del esfuerzo de investigación se enfoca en el reciclaje con técnicas avanzadas como la pirólisis (Khedri y Elyasi, 2016) (Thomas *et al.*, 2020; Al-Salem *et al.*, 2017) y la degradación catalítica mediante uso de zeolitas que ayuden a la formación de compuestos con características similares a las de combustibles convencionales (Arandes *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 2017), dado que, la combustión como método de reciclaje genera graves problemas ambientales (Heidbreder *et al.*, 2019). La descomposición térmica de residuos plásticos por pirólisis tiene ciertas ventajas sobre otras formas de reciclaje como, por ejemplo, la notable reducción de productos gaseosos (Arandes *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 2017), así pues, aprovechando las ventajas que presenta el polietileno, se transforma los residuos del HDPE mediante degradación térmica en atmósferas inertes (pirólisis) (Anuar Sharuddin *et al.*, 2016), donde las diferentes condiciones de operación producen varios productos de interés y su mayor ventaja es que estos productos son principalmente líquidos, por lo que pueden usarse directamente como

combustible o transformarse en productos químicos valiosos.

La evaluación de los datos del análisis termogravimétrico (TGA) para la pirólisis de HDPE ha atraído la atención de varios investigadores (Das y Tiwari, 2017; Anuar Sharuddin *et al.*, 2016; Charde *et al.*, 2018) en los cuales se han estudiado la energía de activación de la pirólisis de HDPE para ser calculada a partir de los datos obtenidos del TGA a diferentes velocidades de calentamiento (Al-Salem *et al.*, 2017; Thomas *et al.*, 2020; Arandes *et al.*, 1997). Estos y otros estudios han utilizado los modelos isoconversionales (Gutiérrez y Palza, 2015; Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose, Flynn-Wall-Ozawa) para determinar la energía de activación, modelos con los que se ha demostrado que la pirólisis de HDPE es un proceso de un solo paso con una energía de activación de 238-247 kJ mol⁻¹ (Aboulkas *et al.*, 2010), 196,3-232,2 kJ mol⁻¹ (Al-Salem y Lettieri, 2010), y 248,7 kJ mol⁻¹ (Ceamanos *et al.*, 2016).

En este trabajo se investigó la cinética química de la reacción de degradación térmica del HDPE haciendo uso de análisis termogravimétrico (TGA) a tasas de calentamiento de 5, 10 y 15 °C min⁻¹ bajo atmósfera de nitrógeno a un flujo de 20 ml.min⁻¹ y en condiciones dinámicas desde 25 a 900 °C. La caracterización del HDPE se realizó por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se determinaron los parámetros cinéticos de la reacción de descomposición de residuos de HDPE a través de los tres modelos cinéticos antes mencionados, junto con el modelo de reacción conocido como Esfera de Contracción (R2), modelos que se ajustan al tratamiento de termoplásticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERIZACIÓN DEL HDPE

La caracterización del HDPE se la efectuó mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para lo cual se realizó un muestreo completamente aleatorio de una muestra de 1 kg de plástico reciclado, el mismo que fue lavado con una solución de sosa cáustica al 1%, secado y pulverizado para su posterior caracterización.

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Se realizaron análisis dinámicos en el equipo TGA 1 STAR System (Mettler Toledo), a tres tasas de calentamiento 5, 10 y 15 °C min⁻¹, con atmósfera inerte mediante inyección de nitrógeno, el cual fue inyectado a un flujo 20 ml min⁻¹. Con estos datos se determinó la pérdida de masa del HDPE frente al tiempo.

MODELO DE REACCIÓN

Para un mejor ajuste de los datos del análisis termogravimétrico se usa el modelo del mecanismo de reacción estimado en reacciones de estado sólido de polietileno de alta densidad, que se denomina modelo de esfera de contracción: reacción de límite de fase bidimensional R2, el mismo que plantea que la función $f(\alpha)$ es igual a $2(1-\alpha)^{1/2}$ mientras que la función $g(\alpha)$ es igual a $1-(1-\alpha)^{1/2}$. Recomendado por Aboulkas *et al.* (2010), Das y Tiwari (2017) y Gao *et al.* (2003), para el análisis de HDPE, ya que es el modelo que mejor se ajusta para este material, de esta manera, el modelo de contracción geométrica supone que la velocidad de degradación inicia en la superficie, y a su vez está controlada por el avance de la reacción. Este comportamiento se debe a la facilidad de desintegración de las cadenas poliméricas gracias a la estructura lineal del HDPE.

CINÉTICA DE LA DEGRADACIÓN TÉRMICA DE HDPE RECICLADO

Para la degradación de polímeros, se usaron tres modelos isoconversionales en los que se asume que las tasas de conversión son proporcionales a la concentración del material reaccionado (Aboulkas *et al.*, 2010). La velocidad de reacción se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} = k(T)f(\alpha) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde, β es la tasa de calentamiento, α es la conversión, $f(\alpha)$ es la función de conversión, $k(T)$ función de temperatura.

El coeficiente de conversión permite cuantificar la pérdida de masa o su degradación:

$$\alpha = \frac{m_i - m}{m_i - m_f} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde, m_i es la masa inicial, m es la masa a un tiempo determinado de degradación, m_f es la masa final o residual.

$k(T)$, la dependencia de la temperatura de la tasa de pérdida de peso, se determina con la ecuación de Arrhenius (Aboulkas *et al.*, 2010), que es el fundamento de los modelos

$$k(T) = A e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde, E es la energía de activación ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), A es el

factor pre-exponencial (s^{-1}), R es la constante del gas ($0,008314 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Combinando las ecuaciones (1) y (3), la velocidad de reacción se puede escribir:

$$\beta \frac{d\alpha}{dT} = A e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} f(\alpha) \quad \text{Ec. 4}$$

MODELO CINÉTICO 1: MÉTODO DE FRIEDMAN (FR)

Método isoconversional diferencial propuesto por Friedman, se basa directamente en la ecuación 4, cuyo logaritmo y aplicando el modelo de reacción R2 para $f(\alpha)$ (Das y Tiwari, 2017), se tiene:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln\left(\beta \frac{d\alpha}{dT}\right) = \ln(A) - \frac{E}{RT} + \ln(2(1-\alpha)^{1/2}) \quad \text{Ec. 5}$$

MODELO CINÉTICO 2: MÉTODO DE KISSINGER-AKAHIRA-SUNOSE (KAS)

Método isoconversional integral, que se obtiene mediante otro ajuste de la integral de la ecuación 4; dicha ecuación estándar se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} d(T) \quad \text{Ec. 6}$$

Considerando que:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = g(\alpha) \quad \text{Ec. 7}$$

Se integra con las condiciones iniciales de $\alpha = 0$ en $T = T_0$. La técnica asume que A , $f(\alpha)$ y E son independientes de T mientras que A y E son independientes de α , entonces, se tiene:

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta T} \left[\frac{e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}}{\frac{E}{RT}} - \int_{-\infty}^{E/RT} \frac{e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}}{\frac{E}{RT}} d(T) \right] \quad \text{Ec. 8}$$

Se define la siguiente relación:

$$P\left(\frac{E}{RT}\right) = \frac{e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}}{\frac{E}{RT}} - \int_{-\infty}^{E/RT} \frac{e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}}{\frac{E}{RT}} d(T) \quad \text{Ec. 9}$$

Entonces, se reemplaza $P\left(\frac{E}{RT}\right)$, basándose en la aproximación de Coats-Redfern para dicho valor y aplicando logaritmo, tenemos:

$$\ln(g(\alpha)) = \ln \frac{AR}{E} + \ln \frac{T_m^2}{\beta} - \frac{E}{RT} \quad \text{Ec. 10}$$

Aplicando el modelo de reacción R2 para $g(\alpha)$, tenemos:

$$\ln \frac{(1 - (1 - \alpha)^{1/2})}{T_m^2} = \ln \frac{AR}{E} - \ln \beta - \frac{E}{RT} \quad \text{Ec. 11}$$

Se grafica $\frac{(1 - (1 - \alpha)^{1/2})}{T_m^2}$ vs. $1/T$; a partir de la pendiente se obtiene la energía de activación (E) y del punto de la ordenada se obtiene el factor pre exponencial (A).

MODELO CINÉTICO 3: MÉTODO DE FLYNN-WALL -OZAWA FWO

Se deriva del método isoconversional integral. La principal diferencia con el modelo de KAS es que FWO utiliza la aproximación de Doyle (Sakakibara *et al.*, 1989) para: $\ln P\left(\frac{E}{RT}\right)$

$$\ln P\left(\frac{E}{RT}\right) = -5.331 - 1.052 \frac{E}{RT} \quad \text{Ec. 12}$$

Relacionando las ecuaciones (10) y (12), y aplicando el modelo de reacción R2 para $g(\alpha)$ se tiene:

$$\ln(1 - (1 - \alpha)^{1/2}) = \ln \frac{AR}{E} - \ln \beta - 5.331 - 1.052 \frac{E}{RT} \quad \text{Ec. 13}$$

Se grafica $(1 - (1 - \alpha)^{1/2})$ vs. $1/T$; a partir de la pendiente se obtiene la energía de activación (E) y del punto de la ordenada se obtiene el factor pre-exponencial (A).

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN DEL HDPE

En la figura 1 se puede observar el espectro de la muestra de HDPE, resultado del análisis de una muestra aleatoria de un 1 kg de plástico triturado y lavado; proveniente de residuos plásticos urbanos recolectados durante 3 meses. De esta forma se pudo establecer los compuestos correspondientes a los valores medidos (ver Figura 1).

En el espectro FT-IR, el pico a $2913,91 \text{ cm}^{-1}$ corresponde a la vibración de estiramiento del metil y metileno. A $2847,38 \text{ cm}^{-1}$ se muestra una banda de vi-

bración de estiramiento de grupos metoxi debido a la presencia de antioxidantes que se usan como aditivo en la obtención de productos a base de este plástico. La banda de $1471,42 \text{ cm}^{-1}$ corresponde a la vibración de estiramiento de azotriazoles (presencia de absorbedores UV) y alcanos. A $717,39 \text{ cm}^{-1}$, la banda corresponde a la vibración de etilenos que se presentan por el tratamiento térmico, extrusión, al cual se somete el HDPE virgen. Los resultados obtenidos son muy similares a los presentados en el estudio de Krehula *et al.* (2014), con la diferencia de que, en la investigación de Krehula *et al.* (2014) no existe bandas de vibración correspondientes a los grupos metoxi y azotriazoles, pues estos autores utilizaron HDPE puro (Ceamanos *et al.*, 2016; Gutiérrez y Palza, 2015).

Análisis termogravimétrico

En la figura 2 se muestra la variación de la masa con respecto a la temperatura para las tres tasas de calentamiento (TGA), mientras que en la figura 3 se observa la derivada de la curva de pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG) mediante la cual se estableció la temperatura máxima de degradación, siendo estas 740, 749, 757 K para 10, 15 y 20 °C/min (ver Figuras 2 y 3).

Modelo cinético

A continuación, se presenta la tabla 1, que muestra los resultados obtenidos de cada modelo para las diferentes tasas de calentamiento (ver Tabla 1 y Figura 4).

DISCUSIÓN

De acuerdo al termograma la reacción de degradación del polietileno se lleva a cabo en una sola etapa consiguiendo una pérdida máxima de masa a la temperatura de degradación indicada para cada tasa de calentamiento, lo que muestra un mecanismo de reacción igual en cada tasa (Singh, 2020); donde claramente la pendiente en los tres casos se mantiene, sin la presencia de fluctuaciones en la medida de la masa, marcando el rango para el mínimo y máximo porcentaje de pérdida. Rango que es utilizado para el planteamiento de los modelos. Este comportamiento hace notar la gran correlación de los datos con los modelos propuestos en las tres tasas. Teniendo, por tanto, para la tasa de calentamiento de $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ se estima una energía de activación de $266,78 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, y un factor preexponencial de $8,11 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, en cambio para la tasa de $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ una energía de activación de $247,745 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, y un factor preexponencial de $5,068 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ y, por último, para $15 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ una energía de activación de $231,842 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, y un factor preexponencial de $4,154 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$. El modelo que

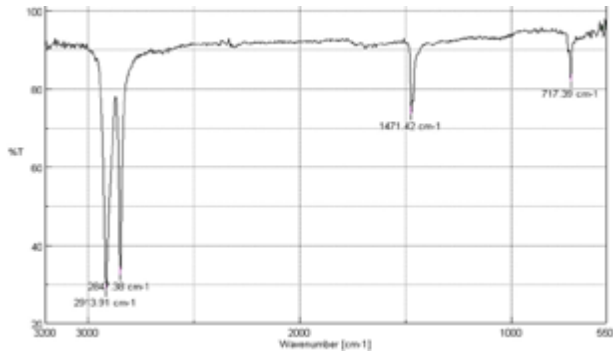


Figura 1. FT-IR del HDPE reciclado

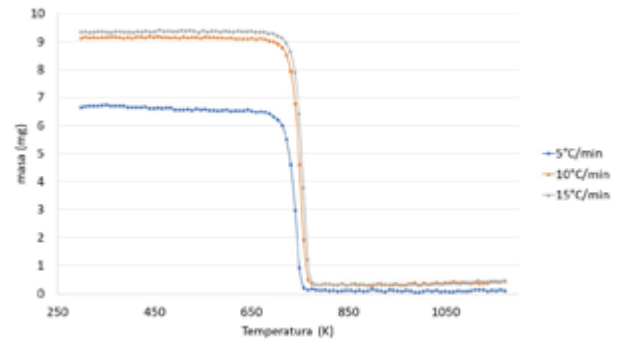


Figura 2. Perfil de la degradación térmica de HDPE reciclado (TGA)

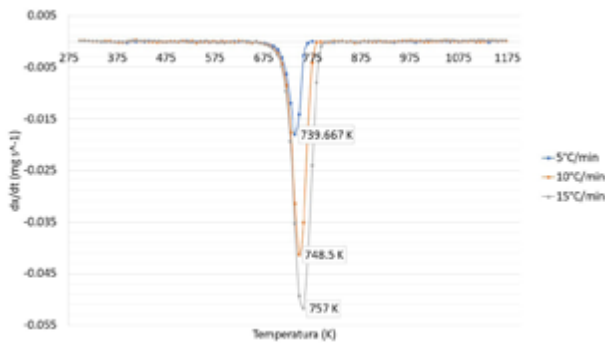


Figura 3. Derivada de la pérdida de masa de HDPE (DTG)

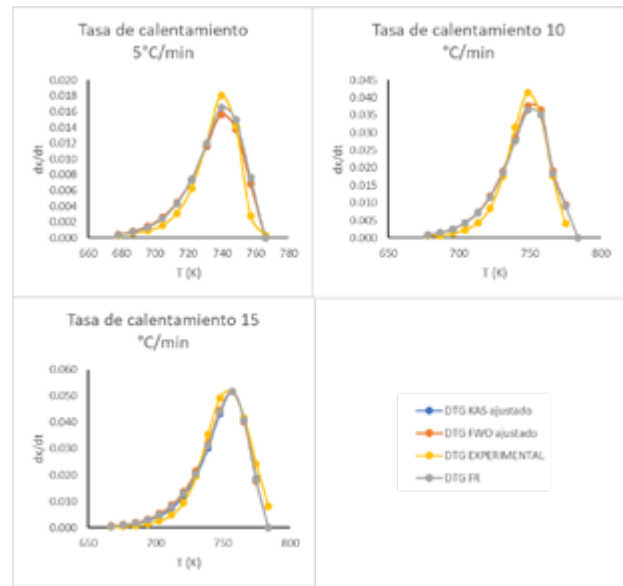


Figura 4. Comparación de los modelos FR, KAS y FWO frente al DTG experimental a diferentes tasas de calentamiento de 5, 10 y 15 °C.min-1.

Tabla 1. Resultados de los modelos FR, KAS Y FWO

MODELO	B (°C.min ⁻¹)	RESULTADOS				
		Tmax (K)	Regresión Lineal	R ²	E (kJ.mol ⁻¹)	A (s ⁻¹)
FR	5	739.67	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 41.630 - \frac{33826.68}{T}$	0.9944	281.235	8.994x10 ¹⁷
	10	748.50	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 36.496 - \frac{29798.51}{T}$	0.9917	247.745	5.068x10 ¹⁵
	15	757.00	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 33.875 - \frac{27885.71}{T}$	0.9977	231.842	4.154x10 ¹⁴
KAS	5	739.67	$\ln\left(\frac{1 - (1 - \alpha)^{1/2}}{T_m^2}\right) = 31.380 - \frac{32309.60}{T}$	0.9954	268.622	1.091x10 ¹⁷
	10	748.50	$\ln\left(\frac{1 - (1 - \alpha)^{1/2}}{T_m^2}\right) = 28.263 - \frac{30204.44}{T}$	0.9881	251.120	9.003x10 ¹⁵
	15	757.00	$\ln\left(\frac{1 - (1 - \alpha)^{1/2}}{T_m^2}\right) = 25.990 - \frac{28760.83}{T}$	0.9900	239.118	1.320x10 ¹⁵
FWO	5	739.67	$\ln(1 - (1 - \alpha)^{1/2}) = 46.465 - \frac{33756.40}{T}$	0.9954	266.778	8.108x10 ¹⁶
	10	748.50	$\ln(1 - (1 - \alpha)^{1/2}) = 43.382 - \frac{31674.97}{T}$	0.9881	250.329	7.929x10 ¹⁵
	15	757.00	$\ln(1 - (1 - \alpha)^{1/2}) = 38.734 - \frac{28392.57}{T}$	0.9900	224.388	1.271x10 ¹⁴

más se ajusta es el de Friedman, sin embargo, no podemos pasar por alto que este modelo es simple en comparación con KAS y FWO, ya que trabaja con menor cantidad de datos y variables que tienen una desviación mínima debido a su excelente correlación para múltiples datos de tasa de calentamiento. Los resultados son comparables con trabajos similares para la tasa de calentamiento de $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ con Das y Tiwari (2017), que obtuvieron valores de energía de activación de 241 hasta $258\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, y el factor pre-experimental de $1,52\times 10^{16}$ hasta $2,34\times 10^{17}$. Así mismo, con Alboukhas *et al.* (2010) y Yang *et al.* (2001) los cuales presentan valores menores a los reportados, entendiéndose que una energía de activación más baja se refiere a que la degradación comienza en los enlaces más débiles de la cadena del polímero que se pueden atribuir a la presencia de aditivos que contienen enlaces nitrógeno-carbono o procesamientos previos para la obtención del plástico (Miandad *et al.*, 2017).

Además, se puede observar como la tasa de calentamiento influye en el proceso de degradación, ya que, cuanto mayor es la tasa, mayor es la temperatura máxima de degradación y menores son tanto la energía de activación, como el factor preexponencial independiente del modelo utilizado (Li *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

La degradación del polietileno reciclado sigue una reacción de degradación en una sola etapa mediante el mecanismo de reacción conocido como esfera de contracción. Proceso que por experimentación termogravimétrica se determinó la energía de activación y el factor preexponencial, siendo el modelo de Friedman el que más se ajusta a los datos obtenidos. Sin embargo, los datos solo presentan leves desviaciones a los estudios reportados por otros autores debido principalmente a la presencia de aditivos y el procesamiento del plástico puro, a diferencia del plástico posconsumo que se utilizó para la presente experimentación.

REFERENCIAS

Aboukhas, A., El harfi, K., y El Bouadili, A. 2010. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1363-1369. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.12.017

Al-Salem, S. M. 2019. Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC). *Process Safety and Environmental Protection*, 127(7), 171-179.

Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G. y Dutta, A. 2017. A review on thermal and catalytic

pyrolysis of plastic solid waste (psw). *Journal of Environmental Management*, 197(07), 177-98. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.03.084

Al-Salem, S. M. y Lettieri, P. 2010. Kinetic study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(12), 1599-1606. DOI: 10.1016/j.cherd.2010.03.012

Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A. y Aroua, M. K. 2016. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115(5), pp. 308-326. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.037

Arandes, J. M., Abajo, I., López-Valerio, D., Fernández, I., Azkoiti, M. J., Olazar, M. 1997. Transformation of several plastic wastes into fuels by catalytic cracking. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(11), 4523-4529.

Ceamanos, J., Mastral, J. F., Millera, A. y Aldea, M. E. 2002. Kinetics of pyrolysis of high density polyethylene. Comparison of isothermal and dynamic experiments. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 65(2), 93-110. DOI: 10.1016/S0165-2370(01)00183-8

Charde, S. J., Sonawane, S. S., Sonawane, S. H. y Shimpi, N. G. 2018. Degradation kinetics of polycarbonate composites: kinetic parameters and artificial neural network. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 32(2), 151-165. DOI: 10.15255/CABEQ.2017.1173

Das, P. y Tiwari, P. 2017. Thermal degradation kinetics of plastics and model selection. *Thermochimica Acta*, 654(9), 191-202. DOI: 10.1016/j.tca.2017.06.001

Gao, Z., Amasaki, I. y Nakada, M. A. 2003. Thermogravimetric study on thermal degradation of polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 67(1), 1-9. DOI: 10.1016/S0165-2370(02)00010-4

Gutiérrez, O. y Palza, H. 2015. Effect of carbon nanotubes on thermal pyrolysis of high density polyethylene and polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*, 120(10), 122-134. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.014

Heidbreder, L. M., Bablok, I., Drews, S. y Menzel, C. 2019. Tackling the plastic problem: a review on perceptions, behaviors, and interventions. *Science of the Total Environment*, 668(6), 1077-1093. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.437

Khedri, S., y Elyasi, S. 2016. Kinetic analysis for thermal cracking of HDPE: a new isoconversional approach. *Polym Degrad Stab*, 129(7), 306-318. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.05.011

Krehula, L. K., Katancć, Z., Siročić, A. P. y Hrnjak-Murgić, Z. 2014. Weathering of high-density polyethylene-wood plastic composites. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 34(1), 39-54. DOI: 10.1080/02773813.2013.827209

Li, D., Lei, S., Wang, P., Zhong, L., Ma, W. y Chen, G. 2021. Study on the pyrolysis behaviors of mixed waste plastics. *Renewable Energy*, 173, 662-474. DOI: 10.1016/j.renene.2021.04.035

Lovás, P., Hudec, P., Jambor, B., Hájeková, E. y Horňáček, M. 2017. Catalytic cracking of heavy fractions from the pyrolysis of waste HDPE and PP. *Fuel*, 203(9), 244-252.

Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I. y Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic

- waste types on pyrolysis liquid oil. *International Bio-deterioration & Biodegradation*, 119(4), 239-252. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.09.017
- Sakakibara, M., Okada, F., Horiuchi, M., Suzuki, K. 1989. Kinetic Analysis of thermogravimetric data. *Nippon Kagaku Kaishi*, 1989(10), 1729-1732.
- Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K. y Gupta, P. 2020. A TG-FTIR investigation on the co-pyrolysis of the waste HDPE, PP, PS and PET under high heating conditions. *Journal of the Energy Institute*, 93(3), 1020-1035. DOI: 10.1016/j.joei.2019.09.003
- Thomas, P., Rumjit, N. P., Lai, C. W., Johan, M. R. B. y Saravanakumar, M. P. 2020. Polymer-recycling of bulk plastics. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2, 211-227.
- Xu, F., Wang, B., Yang, D., Hao, J., Qiao, Y. y Tian, Y. 2018. Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: pyrolysis behaviors and kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171(4), 1106-1115.
- Xue, Y., Johnston, P. y Bai, X. 2017. Effect of catalyst contact mode and gas atmosphere during catalytic pyrolysis of waste plastics. *Energy Conversion and Management*, 142(6), 441-451. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.03.071
- Yang, J., Miranda, R. y Roy, C. 2001. Using the DTG curve fitting method to determine the apparent kinetic parameters of thermal decomposition of polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 73(3), 455-61. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00129-X



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR INDICADORES CLAVES DE RENDIMIENTO EN OPERACIONES DE PERFORACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIANTE

Methodology to estimate key performance indicators in drilling operations through univariant statistical analysis

Santiago Delgado Velasco
Universidad Central del Ecuador
sfdelgado@uce.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9061-7084>

Alexander Narváz Curillo
Universidad Central del Ecuador
axnarvaez@uce.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3443-6035>

Sergio Lira González
Universidad Central del Ecuador
sergiolira8786@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9424-0926>

Gustavo Pinto Arteaga
Universidad Central del Ecuador
grpinto@uce.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6912-8083>

José Ubillús Alcívar
Escuela Politécnica Nacional
joseeduardou98@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5842-6408>

Recibido: mayo de 2021
Aprobado: julio de 2021
ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: [10.29166/revfig.v11i1.3117](https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.3117)

RESUMEN

Los indicadores claves de rendimiento cumplen un papel importante en las operaciones de perforación, ya que facilitan la evaluación del desempeño de éstas entre pozos de similares características. Utilizando la información de los pozos perforados entre los años 2015 y 2019 en el Oriente ecuatoriano, se estableció una metodología que permite estimar indicadores claves de rendimiento mediante la recolección de datos cualitativos y cuantitativos de los reportes finales de perforación. El trabajo recopila la información de los informes finales de perforación de 275 pozos de los 699 perforados durante el intervalo de tiempo mencionado, para establecer datos estándares y patrones de comportamiento en las operaciones de perforación con el fin de optimizar proyectos futuros; para aplicar la metodología se utilizó el programa R Studio, que cuenta con las herramientas necesarias para el análisis estadístico y análisis exploratorio de datos, sin que el volumen de datos sea un limitante, facilitando la interpretación gráfica del comportamiento y variabilidad de los datos. Los resultados de la investigación pueden ser utilizados como referencia en la planificación de nuevos pozos de similares características, así como en la construcción de nuevos indicadores claves de rendimiento.

ABSTRACT

Key performance indicators play an important role in drilling operations since they facilitate the evaluation of their performance between wells with similar characteristics. Using the information from the wells drilled between 2015 and 2019 in eastern Ecuador, a methodology has been established to estimate key performance indicators by collecting qualitative and quantitative data from the final drilling reports. The present work compiles the information from the final drilling reports of 275 of the 699 wells drilled during the mentioned time interval, to establish standard data and behavior patterns during drilling operations in order to optimize future projects; To apply the methodology, the R Studio program was used, which has the necessary tools for statistical analysis and exploratory data analysis, without the volume of data being a limitation, facilitating the graphic interpretation of the behavior and variability of the data. The results of this research can be used as a refe-

PALABRAS CLAVE Indicadores clave de rendimiento, estadística descriptiva, perforación, análisis exploratorio de datos, univariante.

KEYWORDS Key performance indicators, descriptive statistics, drilling, exploratory data analysis, univariant.

rence in the planning of new wells with similar characteristics, as well as in the construction of new key performance indicators.

INTRODUCCIÓN

El proceso de perforar un pozo es muy complejo, involucra varios sistemas que interactúan con el lodo de perforación y las rocas venideras. La ingeniería de diseño y construcción de pozos se vuelve más sofisticada e involucra mayores riesgos y costos (Suryadi, 2021).

La exigencia de optimizar las operaciones de perforación se traduce en una necesidad constante de reducir los costos de entrega de pozos de hidrocarburos mediante nuevas y mejores tecnologías de perforación, como eliminar reconstrucciones, automatización de procesos o proyectos (Fierro-Herrera *et al.*, 2017).

Es necesario seleccionar varios parámetros que permitan medir el desempeño de la perforación, estos son los indicadores clave de rendimiento (KPI por sus siglas en inglés). Los KPI han jugado un papel importante en la ingeniería de perforación, gracias a que proveen una evaluación analítica y continua del desempeño de las operaciones contribuyendo al ahorro de tiempo y dinero (Fernández *et al.*, 2020). En algunas ocasiones, es muy complejo determinar los diferentes KPI, puesto que la industria no posee un acuerdo en cómo medirlos, sobre todo en el ámbito del desempeño del pozo durante su vida útil (Damski y El Afifi, 2021).

Asimismo, para cumplir con los objetivos de optimización de la producción mediante el monitoreo en tiempo real de los sistemas de producción, se ha desarrollado «campos digitales» (DOF, por sus siglas en inglés). Los KPI constituyen una parte fundamental en el desarrollo de los DOF pues permiten identificar información condensada del estado de los sistemas en tiempo real (Rubanu *et al.*, 2017). Además, permiten tomar decisiones y determinar aquellas acciones que han sido más efectivas a la hora de cumplir con los objetivos trazados (Gómez, 2018).

En una operación, no todos los KPI pueden ser considerados aceptables o necesarios, deben realmente poseer una relevancia significativa respecto a los demás para formar parte de la evaluación técnica. Cuando un KPI no es aceptado se debe explicar porque no se seleccionó y recomendar una acción para mitigar las consecuencias de no lograr este KPI (Dhote *et al.*, 2019).

La administración del desempeño de perforación generalmente monitorea los KPI de todo el equipo de perforación, establece metas, realiza seguimiento y

genera reportes. El propósito final es la mejora continua en las operaciones de perforación, utilizando los KPI como indicadores de éxito (Handoko *et al.*, 2021).

Previo a la construcción de un pozo de hidrocarburo se realizan múltiples estudios donde se trazan los objetivos que se desea cumplir, para ello se requiere un análisis previo de variables: tiempos, profundidades, herramientas, desviaciones, entre otras, con el fin de proporcionar un estimado de inversión en el proyecto y así establecer una base de inversiones que no debería extenderse para no generar pérdidas en las arcas del proyecto (Gutiérrez *et al.*, 2019).

Las campañas de perforación son muy dinámicas y varían de acuerdo con el trabajo basado en diferentes parámetros, como recursos disponibles, campo, profundidad del pozo, formaciones, mecanismos de levantamiento y estrategias de producción; los tiempos de planificación del proyecto pueden ser de tres meses a un año donde se establece costos y recursos disponibles para cumplir los objetivos del proyecto (Mohammed *et al.*, 2021).

A lo largo del crecimiento de la industria petrolera, varias empresas han incursionado en la perforación de pozos con nuevas tecnologías, buscando obtener los mayores réditos posibles. Tal es el caso de la empresa Petroleum Development Oman (PDO), la cual mediante su proyecto Rig Performance Analytics pretende para el 2030 terminar los pozos a la mitad del actual tiempo de entrega, maximizando la disponibilidad del pozo y el valor de sus empleados y la tecnología (Al-Qassabi, 2019).

Otras compañías como Malaysia Petroleum Management (MPM), han propuesto un mecanismo de categorización de pozos complejos para reflejar de manera realista y precisa las metas que se deben cumplir bajo diferentes parámetros, busca mejorar el rendimiento de la perforación y reducir los costos por pozo perforado (Yunus y Tarmizi, 2020).

La vinculación de técnicas modernas de ciencia de datos ha colaborado con la optimización de los KPI, tales como tiempo de perforación, tasa de penetración y tiempos no productivos (NPT). Además, ha aportado a mejorar la eficiencia en aspectos como procesamiento de datos no estructurados, análisis de operaciones, autogeneración de reportes y conocimiento compartido entre campos (Zhang *et al.*, 2020).

En Ecuador, es necesario que las empresas prestadoras de servicios trabajen en optimizar los procesos de perforación de pozos de hidrocarburos, para me-

jorar la calidad de servicio y en lo posible disminuir complicaciones que podrían generar mayores costos. La aplicación de estas nuevas tecnologías, en proyectos multimillonarios petroleros en ejecución requieren necesariamente de un monitoreo constante, pues una variación mínima, sea positiva o negativa, puede alterar todo el curso de la inversión: generando aumento de costos, de tiempo o provocando cuantiosos ahorros (Rashid *et al.*, 2021).

El presente trabajo consiste en maquetar una metodología que permita estimar indicadores claves de rendimiento mediante un análisis estadístico univariante.

METODOLOGÍA

El estudio realizado es de tipo exploratorio-descriptivo y propone una metodología para estimar valores óptimos de los KPI asociados a los informes finales de perforación, mediante un análisis exploratorio de datos (EDA por sus siglas en inglés). La metodología seguirá los pasos que se describen a continuación:

FLUJO DE TRABAJO

1. Identificar las fuentes de información. Se definen las fuentes de dónde se va a obtener la información (libros, revistas, *papers*, informes, reportes, entre otros), para ejecutar el EDA.
2. Población y muestra. Se calcula la muestra poblacional, a partir de la confiabilidad esperada al aplicar la metodología mediante la ecuación de muestra poblacional finita o infinita, dependiendo del tamaño de la población.
3. Recopilación de los datos. Se identifican las variables que serán útiles en el análisis, para efectuar la posterior estructuración de la base de datos con la información necesaria.
4. Clasificación de los datos. Entre las variables seleccionadas existentes en la base de datos, se determinan sus tipos: cualitativa (ordinal, nominal) y cuantitativa (discretas, continuas).
5. Procesamiento y visualización de los datos. Generada la matriz de datos, se realiza un primer análisis estadístico basado en gráficas para identificar patrones, tendencias, que permitan entender de una forma rápida cómo se distribuyen los datos.
6. Limpieza de los datos. Con lo observado en el paso anterior, se descartan los datos que no presentan coherencia en relación con los demás bloques de datos, ellos pueden ser producto de errores al momento de recopilar la información desde los informes o en la digitalización de estos.
7. Selección de indicadores clave de rendimiento
De los datos seleccionados en la base de datos, se

descartan las variables que no califican como KPI, para definir a una variable como indicador clave de rendimiento, esta tiene que ser clara, relevante y monitoreable.

8. Agrupamiento de datos en categorías según su clase y configuración. Se agrupan los datos recopilados mediante clases utilizando la profundidad total (MD) y la configuración del pozo.
9. Análisis exploratorio de datos. Distribuidos los datos en clases, se procede a realizar el EDA que consiste en un análisis estadístico descriptivo que abarca medidas de tendencia central, de dispersión, de posición y de forma. Este proceso se realiza para cada uno de los indicadores clave de rendimiento seleccionados.
10. Toma de decisiones.
Se establece el valor óptimo de cada indicador a partir de los datos analizados.

RESULTADOS

En este trabajo, la información se obtuvo de los informes finales de perforación generados por cada una de las empresas operadoras.

A partir de la población de 699 informes finales de perforación, utilizando la ecuación de muestra poblacional finita, con un 95% de confianza y 5% de margen de error, se obtuvo una muestra de 245 pozos, sin embargo, el análisis se lo realizó con 275 pozos. Debido a las diferentes profundidades que se dispone en la base de datos, se decide agruparlas en tres clases diferentes y respecto al tipo de pozo, para optimizar el análisis a las categorías clase-configuración de mayor frecuencia en los datos (ver Tablas 1 y 2).

De la base de datos general, se obtuvo un total de 73 variables, de las que se descartaron las que no presentan mayor relevancia como fechas, ángulos, diámetros de tubería, nombres de compañías, entre otras, obteniendo un total de 21 variables significativas y, mediante el paso descrito en la metodología para selección de los KPI, se seleccionaron un total de 8 KPI para ser analizados.

Para el total de horas de operación, que es uno de los KPI seleccionados, a partir de las categorías clase-configuración se efectuó el EDA, donde se generaron medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (rango, varianza, desviación estándar), medidas de posición (cuartiles), medidas de forma (sesgo, curtosis) y gráficas. El mismo procedimiento se realizó para cada uno de los KPI restantes y sus respectivas categorías (ver Figura 1).

A partir del EDA, se identifica las siguientes características de los datos:

- Cómo se encuentran distribuidos a través de un histograma.
- Si existe variabilidad entre ellos a partir de la varianza y la desviación estándar.
- El lugar donde se concentran la mayor cantidad de datos utilizando los cuartiles.
- Se evidencia la presencia de sesgos positivos o negativos mediante la gráfica de densidad.
- Si posee datos atípicos utilizando el boxplot.
- Si los datos tienen una distribución normal. Una distribución se la considera normal cuando la prueba de normalidad da un resultado mayor o igual a 0,05, para lo cual se aplica la prueba de normalidad dependiendo del tamaño de los datos analizados, si se dispone de menos de 50 datos se usa la prueba de Shapiro-Wilk, caso contrario, se utiliza la de Kolmogorov-Smirnov y a partir de la gráfica de Q-Q plot se considera normal cuando los datos siguen la trayectoria de la recta.

Se selecciona el valor óptimo, a partir de la media obtenida para cada KPI (ver Tablas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

El mismo procedimiento fue realizado para los 7 KPI restantes, dando como resultado las siguientes tablas: (ver Tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

DISCUSIÓN

La agrupación de los datos mediante las clases queda a la interpretación de quien aplique la metodología según criterios estadísticos, de ingeniería, geológicos, operativos, entre otros.

Después de realizar el análisis descrito anteriormente, se establece como valor óptimo el correspondiente a la media para cada uno de los indicadores clave de rendimiento analizados, debido a que, en general en todos los análisis realizados, los datos se concentran alrededor de este valor, a excepción de pocos datos que se alejan hacia valores más bajos o altos, que en cuyo caso se los considera datos atípicos provocando que la variabilidad de los datos sea alta. Estos datos pueden ser descartados, si se desea, para evitar sesgos innecesarios en la distribución.

Para el caso de los siguientes indicadores clave de rendimiento: Tiempo total de operación, Tiempo productivo, Tiempo de perforación y Tiempo de corrida del revestidor, los valores que estén bajo la media se los considera eficientes y los que estén sobre el valor de la media se los considera ineficientes. Para el caso del KPI: Tasa de penetración (ROP), los valores que estén sobre la media se los considera eficientes y los que estén bajo

el valor de la media, se los considera ineficientes.

Cuando la variabilidad de los datos sea considerable, se debe interpretar el valor de la desviación estándar, puesto que cuando este valor es alto los resultados son menos confiables a la hora de tomar decisiones.

Con respecto al indicador de rendimiento: Tiempo no productivo (NPT), se establece como valor óptimo el correspondiente a la mediana, porque la media se encuentra afectada por la presencia de datos muy altos de NPT. Al optimizar las operaciones de perforación, se debe tener el menor tiempo no productivo posible, al ser la mediana menor que la media se establece como valor óptimo. Los valores que estén bajo la mediana se consideran eficientes y los que estén sobre la mediana se los considera ineficientes.

Para los KPI: número de brocas y número de ensamblajes de fondo (BHA), al ser datos de tipo cuantitativo discreto, se lo analiza con respecto a las frecuencias, por ende, se toma como valor óptimo a los valores que tengan las frecuencias altas (ver Figuras 2 y 3).

CONCLUSIONES

La estandarización en los reportes y protocolos de recolección de datos tiene un impacto importante en los tiempos de procesamiento y en la calidad de los datos, a la hora de construir este tipo de bases de datos que superan los 15.000 datos.

En la implementación de esta metodología es importante que se tenga claro el objetivo principal de la optimización para poder construir las categorías para la agrupación de los datos.

En la construcción de la metodología de análisis de datos, es importante seleccionar bien cuáles son las variables que más influyen en el objetivo a optimizar. En esta implementación de la metodología de las 73 variables, solo 8 fueron consideradas como KPI.

Para la implementación de la metodología se utilizó R Studio, sin embargo, se puede utilizar cualquier paquete informático de análisis estadístico que permita manejar grandes cantidades de datos.

Los valores óptimos se agruparon en 3 estilos: los mínimos deseados como tiempos, máximos deseados como el ROP y los discretos como el número de brocas.

En las variables con dispersión de datos significativos se recomienda tomar como valor óptimo a la mediana y para variables más condensadas se puede tomar como valor óptimo a la media.

Tabla 1. Número de pozos por clase y configuración

	J	S	Horizontal	Vertical
Clase 1	17	1	0	3
Clase 2	72	18	38	1
Clase 3	88	18	16	3

Tabla 2. Porcentaje de pozos por clase y configuración

	J	S	Horizontal	Vertical
Clase 1	6,2%	0,4%	0%	1,1%
Clase 2	26,2%	6,5%	13,8%	0,4%
Clase 3	32%	6,5%	5,8%	1,1%

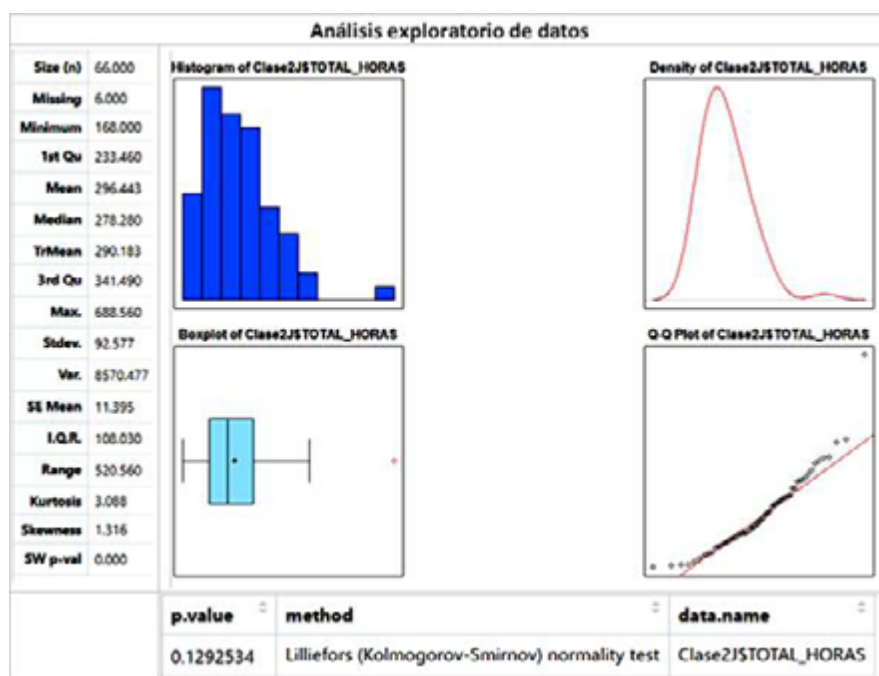


Figura 1. Análisis exploratorio de datos para el total de horas de operación. Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 3. Valores óptimos para el total de horas de operación

CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
j	s	h	v	j	s	h	v	j	s	h	v
182,5	-	-	-	296,5	378	243,5	-	501	552	695	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 4. Valores óptimos para el tiempo productivo

CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
j	s	h	v	j	s	h	v	j	s	h	v
178,993	-	-	-	286,608	367,255	235,277	-	471,659	509,786	648,487	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 5. Valores óptimos para los tiempos no productivos

CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1,5	-	-	-	3,5	11,882	3,25	-	9	5,25	23,72	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 6. Valores óptimos para tiempo de perforación

SECCIÓN	CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
	J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1	12,773	-	-	-	30,194	44,331	35,664	-	62,741	53,635	51,495	-
2	18,532	-	-	-	41,552	77,698	21,374	-	86,459	75,854	98,392	-
3	7,365	-	-	-	19,308	26,004	20,149	-	42,331	29,436	35,526	-

Fuente: Delgado y Narváez, 2020.

Tabla 7. Valores óptimos para tasa de penetración

SECCIÓN	CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
	J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1	182,441	-	-	-	126,934	123,635	179,058	-	119,125	105,268	122,497	-
2	183,638	-	-	-	125,479	102,803	152,074	-	58,227	52,238	56,836	-
3	70,036	-	-	-	73,207	61,601	61,172	-	48,184	46,395	44,038	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 8. Valores óptimos para tiempo de corrida de revestidores

SECCIÓN	CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
	J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1	4,002	-	-	-	8,611	10,458	8,264	-	17,087	12,665	17,133	-
2	7,127	-	-	-	11,746	16,139	8,248	-	18,22	16,8	19,625	-
3	7	-	-	-	11,488	12,896	9,795	-	17,648	17,533	16,857	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

Tabla 9. Valores óptimos para el número de ensamblaje de fondo

SECCIÓN	CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
	J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1	1	-	-	-	2	2	1	-	3	3	2	-
2	1	-	-	-	2	2	1	-	3	2	2	-
3	1	-	-	-	1	1	1	-	2	1	2	-

Fuente: Delgado y Narváez, 2020.

Tabla 10. Valores óptimos para el número de brocas

SECCIÓN	CLASE 1				CLASE 2				CLASE 3			
	J	S	H	V	J	S	H	V	J	S	H	V
1	1	-	-	-	1	1	1	-	3	2	2	-
2	1	-	-	-	2	2	1	-	3	2	2	-
3	1	-	-	-	1	1	1	-	1	1	2	-

Fuente: Delgado y Narváez (2020).

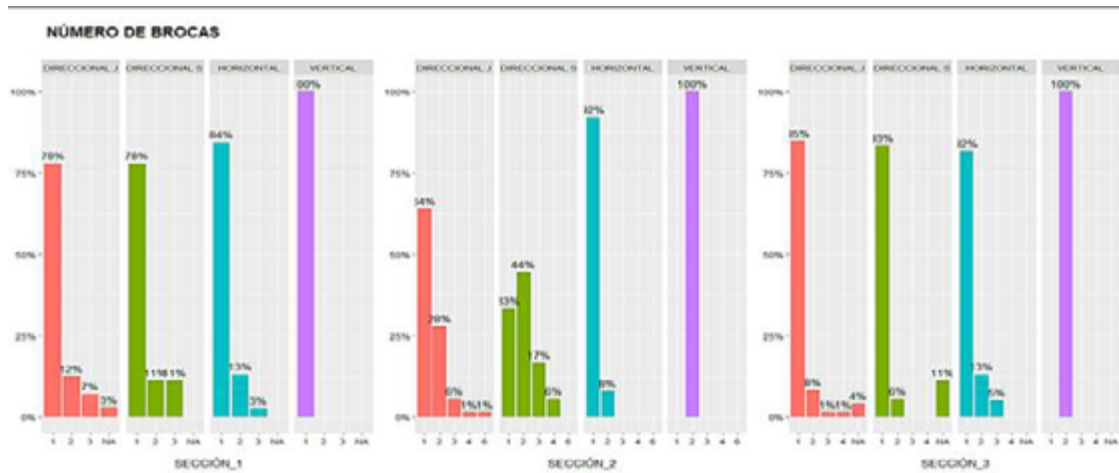


Figura 2. Análisis de frecuencias para el número de brocas.
Fuente: Delgado y Narváez (2020).

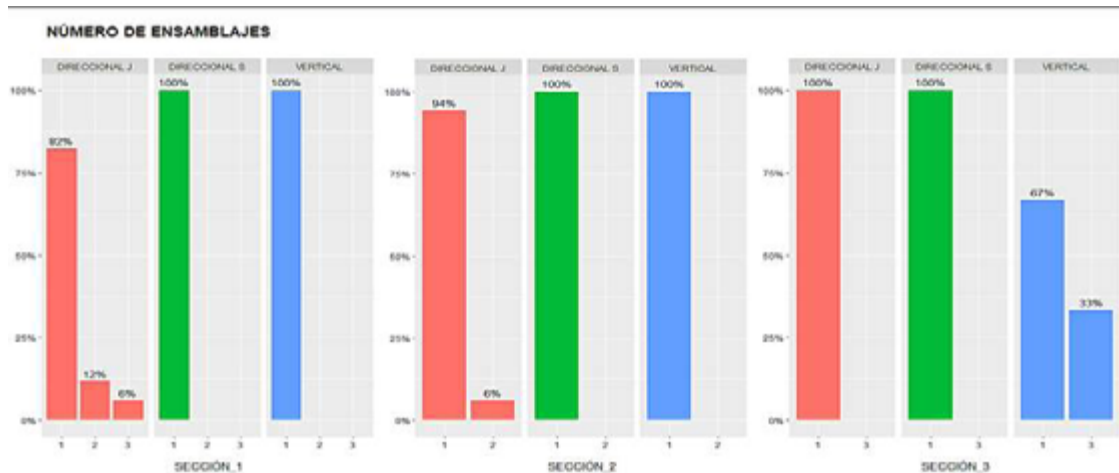


Figura 3. Análisis de frecuencias para los valores óptimos de ensamblaje de fondo.
Fuente: Delgado y Narváez (2020).

REFERENCIAS

Al Qassabi, K. 2019. *Rig performance analytics. The integrated approach*. Petroleum Development Oman. Recuperado de: <https://www.software.slb.com/-/media/software-media-items/software/documents/external/technical-presentations/sis-global-forum-2019/dr/rig-performance-analytics--the-integrated-approach.pdf?la=en&hash=2BAE8332C15D9423E6E513B595C-0D9052668DFBD>

Damski, C. and El Afifi, S. 2021. *The hard case for whole drilling optimization*. Middle East drilling technology conference and exhibition, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/202188-ms>

Delgado, S. y Narváez, A. 2020. *Análisis estadístico de indicadores de rendimiento para servicios de perforación en los últimos 5 años en el Ecuador* (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador. Quito.

Dhote, P., Al-Adwani, T., Al-Bahar, M., Al-Otaibi, A., Chakraborty, S. and Slobodan, S. 2019. *KPI based stan-*

ardizing static geomodeling practices for QA and QC of models. International Petroleum Technology Conference. DOI: <https://bvirtual.epn.edu.ec:2069/10.2523/IPTC-19123-MS>

Fernández, H. P., Sugiatmo, K. and Suryo, P. 2020. The effect of invisible lost time on drilling performance of geothermal wells. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.25105/jeeset.v3i1.6662>

Fierro-Herrera, M., Romero-Chacin, D., Schmidt, A., Eri-ves-Gonzalez, J. L., Dick, H. P., Dorantes-García-Barzallana, A. E., Amundsen, S., Guedes De Carvalho, R., López, J. C., Escobedo- Flores, M., Basso-Mora, M. A., Kim, A., Hoil-Marrufo, G. and García, H. 2017. *Overhauling KPI drilling performance trough RT Operations Integration Center*. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina. <https://doi.org/10.2118/185528-ms>

Gómez, J. 2018. *KPI: ¿Cómo medir la productividad en*

- perforación?* Recuperado de <https://perforador20.wordpress.com/2018/07/07/kpi-como-medir-la-productividad-en-perforacion/>
- Gutiérrez, D., Cornwall, R. C., Nuimi, S. M., Tripathi, D. T., Hidalgo, M. H., Alkuwaiti, H., Soni, S. and Isambertt, J. 2019. *True well performance validation using management by exception and data analytics to improve well test validation KPI*. SPE Kuwait Oil & Gas Conference and Show, Mishref, Kuwait. <https://doi.org/10.2118/198052-ms>
- Handoko, A. I., Khella, H. E., Couzigou, E. and Al-Marzouqi, A. A. 2021. *Enhancing the drilling performance management on a large drilling operation*. Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/202156-ms>
- Mohammed, S., Persad, D. and Baksh, K. 2021. *Development and execution of Heritage Petroleum Company Limited's first offshore workover campaign - a case history of successful implementation of performance management*. SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources, Trinidad y Tobago. <https://doi.org/10.2118/200959-ms>
- Rashid, F., Al Saadi, H. M., Duivala, S. Y., Butt, S., Al Mansoori, S. and Mughal, M. I. 2021. *Accurate drilling data interpretations brought significant values to a major drilling project*. Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/202073-ms>
- Rubanu, A., Cerri, P., Ciccorossi, P., Bianco, A. y Masi, S. 2017. *Field application of key performance indicators for digital oilfield to monitor and predict process upsets*. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy.
- Suryadi, H. 2021, junio. *A novel approach to drilling engineering sensitivity analysis and visualization*. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference. <https://doi.org/10.2118/201072-ms>
- Yunus, M. N. and Tarmizi, M. F. 2020. *Drilling minimum standard as regulatory benchmarking for drilling performance in Malaysia*. Offshore Technology Conference Asia, Kuala Lumpur, Malasia. <https://doi.org/10.4043/30384-ms>
- Zhang, H., Lu, B., Yang, S., Ke, K., Song, J., Hou, X., Wang, Z. and Jin, X. 2020. *A global drilling KPI analysis system based on modern data science techniques*. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/203378-ms>



ISSN-i 1390-7042 | ISSN-e 2602-8484

CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL AGUA DE LA LAGUNA COLTA. CHIMBORAZO, ECUADOR

Physicochemical quality of lagoon Colta water. Chimborazo, Ecuador

Sandra Escobar
Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (Ecuador)
Universidad de los Andes (Venezuela)
kasandraea@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3347-0282>

Ana Albuja
Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (Ecuador)
Universidad de los Andes (Venezuela)
ana.albuja@esPOCH.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8774-279X>

Felix Andueza
Universidad Central del Ecuador (Ecuador)
Universidad de los Andes (Venezuela)
fdandueza@uce.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9046-8883>

Recibido: mayo de 2021

Aprobado: julio de 2021

ARTÍCULO ORIGINAL

DOI: [10.29166/revfig.v1i1i.3135](https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1i.3135)

RESUMEN

Las lagunas de alta montaña son ecosistemas muy frágiles sujetos a variaciones en las características fisicoquímicas que influyen en sus condiciones biológicas y ecológicas. En Ecuador existen una gran diversidad de lagunas de alta montaña que se han estado investigando en los últimos años. En este sentido, se realizó el presente trabajo para conocer la dinámica estacional de los factores fisicoquímicos en la laguna Colta, situada en la provincia de Chimborazo, Ecuador a una altura de 3312 m s. n. m. Se realizaron mediciones de los parámetros fisicoquímicos conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos, temperatura y transparencia en diferentes partes de la laguna por un periodo de dos años utilizando un equipo multiparámetro y el disco Secchi. Los resultados obtenidos indican un pH alcalino con valores entre 8,36 y 9,20 y un valor promedio de 8,87, una temperatura entre 16,4 y 18,9 °C con un valor promedio de 17,91 °C, conductividad eléctrica elevada con un rango de valores a lo largo de la laguna desde 903 a 1253 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y un valor promedio de 1085 $\mu\text{s}/\text{cm}$, alta cantidad de sólidos totales disueltos que variaron entre 537 a 832 mg/L y un valor promedio de 680 mg/L y un índice de transparencia Secchi indicativo de un lago eutrófico con valores entre 0,76 y 3,5 metros, con un valor promedio de 1,54 metros. Los resultados obtenidos indican un ecosistema lacustre eutrófico con parámetros fisicoquímicos estables en toda la laguna a lo largo del tiempo.

ABSTRACT

High mountain lagoons are very fragile ecosystems subject to variations in the physicochemical characteristics that influence their biological and ecological conditions. In Ecuador there is a great diversity of high mountain lagoons that have been investigated in recent years. In this sense, the present work was carried out to know the seasonal dynamics of the physicochemical factors in the Colta lagoon, located in the province of Chimborazo, Ecuador at an altitude of 3312 meters above sea level. Measurements of the physicochemical parameters, electrical conductivity, pH, total dissolved solids, temperature and transparency were carried out in different parts of lagoon for a period of two years using a multiparameter equipment and the Secchi disk. The results obtained indicate an alkaline pH with values between 8.36 and 9.20 and an average value of 8.87, a temperate temperature between 16.4 and 18.9 °C with an average value of 17.91 °C, Elevated electrical conductivity with a range of

PALABRAS CLAVE Laguna Colta, lagunas de alta montaña, calidad fisicoquímica.

KEYWORDS Colta lagoon, high mountain lagoons, physicochemical quality

values throughout the lagoon from 903 to 1253 $\mu\text{s}/\text{cm}$ and an average value of 1085 $\mu\text{s}/\text{cm}$, high amount of total dissolved solids that varied between 537 to 832 mg/L and an average value of 680 mg/L and a Secchi transparency index indicative of a eutrophic lake with values between 0.76 and 3.5 meters, with an average value of 1.54 meters. The results obtained indicate a eutrophic lake ecosystem with stable physicochemical parameters throughout the lagoon over time.

INTRODUCCIÓN

Los lagos y lagunas como reservorios de agua dulce son ecosistemas muy importantes para el equilibrio ecológico y el reciclado de los elementos químicos en el planeta. Son excelentes sensores o detectores tempranos de cambios climáticos o ambientales, proporcionan información sobre las tendencias del clima a escala regional o mundial, el transporte de contaminantes atmosféricos a larga distancia, o la producción de lluvias ácidas, lo que les confiere la categoría de «ecosistemas estrella» (Granados y Toro, 2000).

Dentro de los ecosistemas lacustres encontramos las denominadas lagunas de alta montaña, ecosistemas acuáticos que se encuentran por encima de los 2200 m s. n. m., las cuales constituyen una red de amortiguación de caudales y sedimentos provenientes de las cuencas altas y del deshielo de glaciares, constituyendo una importante reserva hídrica (Dar *et al.*, 2020; Yarzabal *et al.*, 2021).

Las lagunas de alta montaña son uno de los recursos más vulnerables a la contaminación y a los cambios fisicoquímicos. En particular, los lagos altoandinos tropicales son ecosistemas acuáticos con características especiales, de los cuales existen pocos estudios (Rascón *et al.*, 2021). Principalmente, se localizan en Colombia, Ecuador y norte de Perú, entre los 2000 y 4000 m s. n. m. La dinámica de estos lagos tiene grandes diferencias con los lagos localizados en las zonas bajas tropicales debido a la altitud y a las condiciones climáticas dominantes (Gunkel 2003; López-Martínez *et al.* 2017).

En Ecuador existe una gran variedad de lagunas, tanto de alta montaña, como lacustres, cratéricas y humedales, algunas de ellas de origen volcánico sobre las cuales se han realizado algunos estudios geológicos, hidrológicos, limnológicos y químicos (Gunkel, 2003; Torres, 2016; Gómez, 2018; Tito-Ontaneda, 2018; Guaminga, 2019; Rodríguez, 2019; González *et al.*, 2020).

En este contexto, se presenta el presente estudio en donde se investigó desde el punto de vista de la calidad fisicoquímica de sus aguas, la laguna Colta, situada en la provincia de Chimborazo a 3312 m s. n. m.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Sitio de muestreo

El trabajo se realizó en la laguna Colta, ubicada en el cantón Colta de la provincia de Chimborazo. Esta laguna es un ecosistema lenticó dulceacuícola que se mantiene inundada todo el año; tiene 2800 metros de largo por 1000 metros de ancho y está rodeada de varias colinas, donde habitan varias comunidades indígenas (GAD Colta, 2016; Guaminga, 2019) (ver Figura 1).

Muestras

Para realizar la investigación se realizaron cuatro campañas de muestreos entre los años 2019 y 2021 en la laguna Colta, en diferentes épocas del año, a fin de poder incluir muestreos en la época de lluvia y muestreos durante la época de verano. Las muestras de agua se recolectaron por duplicado en 5 sitios seleccionados a lo largo y ancho de la laguna a nivel de la superficie. Se identificaron las coordenadas geográficas de los sitios de recolección mediante un GPS marca Hanna (ver Tabla 1).

En cada ocasión se recolectaron muestras de agua de 1 litro en cada uno de los sitios de muestreo seleccionados. Para la recolección de las muestras se utilizaron frascos esterilizados y un muestreador de agua Van Dorn. Las muestras se etiquetaron con sus respectivas condiciones, trasladándose bajo refrigeración en una cava hasta el laboratorio, donde se realizaron los análisis microbiológicos dentro de las 24 horas luego de la toma (NTE INEN 2169, 2013; NTE INEN 2176, 2013).

METODOLOGÍA

Análisis fisicoquímico *in situ* del agua de la laguna Colta, provincia de Chimborazo, Ecuador

Los análisis fisicoquímicos se realizaron *in situ* en el agua de la laguna Colta, en cada uno de los puntos de muestreos seleccionados (tabla 1), utilizando para ello



Figura 1. Ubicación geográfica de la laguna Colta. Provincia de Chimborazo, Ecuador (Google Maps, 2021).

Tabla 1. Geolocalización de los puntos de muestreos en la laguna Colta (Chimborazo, Ecuador)

Puntos de muestreo (Laguna de Colta)	Coordenadas X (m)	Coordenadas Y (m)	altitud (m s. n. m.)
P1 (norte de la laguna)	749313,6	9808261,5	3310
P2 (sur de la laguna)	749467,1	9808127,3	3307
P3 (este de la laguna)	749565,3	9807537,5	3311
P4 (oeste de la laguna)	749243,1	9808418,1	3309
P5 (centro de la laguna)	749719, 4	9808849,8	3312

Tabla 2. Valores promedios totales de los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en la laguna Colta (Chimborazo, Ecuador)

Puntos de muestreo	pH promedio	Temperatura promedio (°C)	Conductividad eléctrica promedio (µs/cm)	Sólidos totales disueltos promedio (mg/L)	Transparencia SEECCHI promedio (m)
1	8,94 ± 0,17	18,11 ± 0,28	10,79 ± 70,8	718 ± 71,2	0,94 ± 0,14
2	9,1 ± 0,13	18,31 ± 0,38	1095 ± 97,07	742 ± 93,65	1,17 ± 0,22
3	8,72 ± 0,11	17,78 ± 0,33	1104 ± 13,97	635 ± 54,89	1,31 ± 0,13
4	8,69 ± 0,13	18,01 ± 0,23	1123 ± 139,72	680 ± 107,1	1,43 ± 0,17
5	8,91 ± 0,17	17,36 ± 0,58	1024 ± 85,49	627 ± 51,42	2,85 ± 0,47
Promedio	8,87 ± 0,17	17,91 ± 0,36	1085 ± 3762	680 ± 50,3	1,54 ± 0,75

un equipo medidor multiparámetro de marca HANNA. Las lecturas de cada uno de los parámetros investigados: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y transparencia se tomaron por duplicado (Bedoya, 2015). En el caso de la transparencia se utilizó el disco Secchi de acuerdo con lo indicado por Bedoya (2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis fisicoquímico del agua de la laguna Colta, provincia de Chimborazo, Ecuador

En la tabla 2 se muestran los resultados promedios obtenidos en cada punto de muestreo durante las cuatro campañas de recolección de muestras realizadas entre los años 2019 y 2021 (año 2019, 2 muestreos;

año 2020, 1 muestreo; año 2021, 1 muestreo) en la laguna Colta, respecto a los parámetros fisicoquímicos analizados (ver Tabla 2).

El pH fue uno de los factores fisicoquímicos evaluados en el agua de la laguna Colta. Se obtuvo un valor promedio global para el agua de la laguna de 8,87, pH considerado alcalino y que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles según la normativa ambiental ecuatoriana vigente, que establece valores entre 6,50-9,00 para cuerpos de agua utilizados con fines recreativos (Tulsma, 2005).

Varios autores en diversas partes del mundo han indicado que las aguas de este tipo de ecosistemas lacustres presentan valores de pH entre 6 y 9, valores similares a los encontrados en el presente estudio (Quirós *et al.*, 2002; Locascio de Mitrovich, 2005; Roldán y Ramírez, 2008; Sierra, 2011; Toro *et al.*, 2012; Minor *et al.*, 2019; Ohba *et al.*, 2020; Verma and Prakash, 2020; Saber *et al.*, 2020; González *et al.*, 2020).

Una posible explicación para los valores pH alcalino observados pudiera estar en el hecho de que una alta actividad fotosintética, debida a la comunidad de algas y de bacterias que se encuentran en la laguna, pudiera sobresaturar de oxígeno al sistema acuático, provocando agotamiento de dióxido de carbono y con ello un aumento de los valores del pH del agua (Roldán y Ramírez, 2008).

La temperatura fue otro de los parámetros fisicoquímicos analizados, observándose un valor promedio global para la laguna de 17,91 °C, lo cual equivale a un agua con una temperatura templada. Los valores de temperatura obtenidos a lo largo de la investigación indican un patrón térmico estable con pocas fluctuaciones anuales (Tabla 2).

Se ha señalado que las cuencas de los lagos de alta montaña son relativamente pequeñas en comparación con los lagos de las zonas bajas y, como resultado, las características atmosféricas y climáticas de la zona tienen una gran influencia en las características de temperatura del agua embalsada (Roldán y Ramírez, 2008; Torres, 2016; Ventura, 2018; Rascón *et al.*, 2021).

Los resultados obtenidos en esta investigación, relacionados con la temperatura del agua de la laguna Colta, son similares a los obtenidos por otros investigadores en lagos de alta montaña de Ecuador y de otras partes del mundo (Locascio de Mitrovich, 2005; Meneses, 2013; Beltrán, 2020; Ohba *et al.*, 2020).

Dentro de los factores fisicoquímicos investigados estuvo también la conductividad eléctrica; los resultados obtenidos indican que un valor promedio para la conductividad eléctrica del agua de la laguna fue de 1085 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 2).

Los valores encontrados en la conductividad eléctrica indican que se trata de un agua de mineralización alta (conductividad eléctrica superior a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y no sería apta para consumo humano de acuerdo con la normativa nacional e internacional (Rodier, 1998; Roldán y Ramírez, 2008; Tulsma, 2015). Los resultados obtenidos son significativamente mayores a lo que se han indicado para diversos lagos de alta montaña en Ecuador y en otras partes del mundo, donde se observan valores entre 280 y 337 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pawar, 2010; Toro *et al.*, 2012; Ohba *et al.*, 2020) y similares a los señalados en el lago Cuicocha en Ecuador (Gunkel y Beulker, 2009).

Los resultados obtenidos en la conductividad eléctrica, pudiera indicar la actividad de procesos geoquímico y geomicrobiológicos dentro de la estructura del lago y/o un problema de arrastre de sedimentos de las zonas aledañas (Rodríguez *et al.*, 2010; Miot *et al.*, 2016; Torres, 2016; Ohba *et al.*, 2020).

Otro de los aspectos fisicoquímicos estudiados fue la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua de la laguna Colta, obteniéndose un valor promedio general para la laguna de 680 mg/L (tabla 2). Los resultados obtenidos son similares a los observados para el lago San Pablo (Gunkel, 2003) y mucho menores que los encontrados en Cuicocha (Gunkel y Beulker, 2009).

Los altos valores obtenidos de sólidos disueltos en el agua de la laguna Colta pueden deberse probablemente a la descarga de desechos domésticos y al arrastre de la escorrentía de abonos agrícolas utilizados por los habitantes de la zona, situación que pudiera estar evidenciando un problema significativo de aumento en los niveles de eutroficación en la laguna (Sierra, 2011).

En los análisis fisicoquímicos realizados se incluyó también la determinación del índice de transparencia del agua, utilizando el indicador Secchi que permite inferir el estado eutrófico de los ecosistemas acuáticos con base en su valor (Roldán y Ramírez, 2008). El valor promedio total obtenido en el agua de la laguna Colta para el índice Secchi fue de 1,54 metros (Tabla 2).

Se ha señalado que los valores en el índice Secchi menores a 1,5 metros, indicarían la presencia de un ecosistema lacustre hipertrófico, valores entre 1,5 a 3,0 metros un ecosistema eutrófico, entre 3 y 6 metros ecosistemas mesotróficos, de 6 a 12 metros ecosistemas oligotrofos y valores superiores a 12 metros ecosistemas ultra oligotróficos (Roldán y Ramírez, 2008; Bedoña, 2015; López y Madroñero, 2015). Los datos obtenidos apuntan a que estamos en presencia de un lago eutrófico con valores en el índice de Secchi entre

1,5 y 3,0 metros. Existen diferencias en las consideraciones de eutroficación en la laguna Colta; algunos investigadores la clasifican como una laguna de aguas oligotróficas (Rodríguez, 2019).

La calidad de los cuerpos de agua dulce, como es el caso del agua de lagos y lagunas, se puede determinar analizando dos componentes básicos, las características fisicoquímicas y la población de microorganismos presentes (Sierra, 2011), razón por la cual en el trabajo se realizó primero un estudio fisicoquímico.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los parámetros fisicoquímicos estudiados evidencian que la laguna Colta es un ecosistema acuático en un estado eutrófico con una alta productividad biológica y con características fisicoquímicas estables en las diferentes zonas de la laguna, a lo largo del año y de las estaciones climáticas que se presentan en la región. Los resultados obtenidos en las condiciones fisicoquímicas del agua de la laguna Colta permiten predecir la presencia en este ecosistema de una microbiota bacteriana aerobia mesófila escasa y poco diversa.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

Bedoya. 2015. *Estandarización de las metodologías para el análisis de pH, alcalinidad y turbidez en muestras de agua potable en el laboratorio de la Asociación Municipal de Acueductos Comunitarios de Dosquebradas (AMAC)* (Tesis doctoral). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química. Pereira, Colombia.

Dar, S. A., Bhat, S. U., Aneaus, S., Irfan Rashid. 2020. A geospatial approach for limnological characterization of Nigeen Lake, Kashmir Himalaya. *Environmental Monitoring Assessment*, 192, 121. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8091-y>

Gómez, G. 2018. *Determinación del estado trófico actual de la laguna Cube a través de la cuantificación de parámetros químicos (fosfatos, nitratos, clorofila «a») y transparencia Secchi* (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

González, M., Acuña, J., Escobar, J., Viteri, F., Villacís, L., Parra, Y., Araujo, L., Araque, J., Andueza, F. 2020. Calidad fisicoquímica del agua de la laguna volcánica cratérica Quilotoa. *Revista Perspectiva*, 21(1), 71-83. Cotopaxi. Ecuador.

Granados, I., Toro, M. 2000. *Conservación de los lagos y humedales de alta montaña de la península Ibérica* (pp. 33-50). Madrid, España: Servicio de Publicaciones, Universidad Autónoma de Madrid,

Gunkel, G. 2003. Limnología de un lago tropical de alta montaña en Ecuador: características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Revista Biología Tropical*, 51, 381-390.

Gunkel, G., Beulker, C. 2009. Limnology of the crater lake Cuicocha, Ecuador, a coldwater tropical lake. *International Review of Hydrobiology*, 94, 103-125.

INEN. 2013. NTE INEN 2169:2013. *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras* (1.ª ed.). Instituto Ecuatoriano de Normalización. Norma 2169. Quito-Ecuador.

INEN. 2013. NTE INEN 2176:2013. *Agua. Calidad del Agua. Muestreo de técnicas de Muestreo* (1.ª ed.). Instituto Ecuatoriano de Normalización. Norma 2176. Quito-Ecuador.

Locascio de Mitrovich, C., Villagra de Gamundi, A., Juárez, J., Ceraolo, M. 2005. Características limnológicas y zooplancton de cinco lagunas de la Puna-Argentina. *Ecología en Bolivia*, 40(1), 10-24.

López-Martínez M. L., Madroñero Palacios S. M. 2015. Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 21-42. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1430>

López-Martínez, M. L., Jurado-Rosero, G. A., Páez-Montero, I. D. y Madroñero-Palacios, S. M. 2017. Estructura térmica del lago Guamués, un lago tropical de alta montaña. *Luna Azul*, 44, 94-119. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.44.7>.

Meneses, L. 2013. *Bacterioplancton de tres lagunas de alta montaña tropical andina en el departamento de Boyacá, Colombia* (Tesis doctoral). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

Minor, E. C., Tennant, C. J. y Brown, E. T. 2019. A seasonal to interannual view of inorganic and organic carbon and pH in western Lake Superior. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 405-419. <https://doi.org/10.1029/2018JG004664>

Miot, J., Jézéquel, D., Benzerara, K., Cordier, L., Rivas-Lamelo, S., Skouri-Panet, F., Férard, C., Poinot, M., Duprat, E. 2016. Mineralogical diversity in lake Pavin: Connections with Water Column Chemistry and Biomineralization. *Processes Minerals*, 6, 24-43. <https://doi.org/10.3390/min6020024>

Ohba, T., Ooki, S., Oginuma, Y., Yoshida, H., Ntchantcho, R., Ako, A., Tawedi, R., Ayissi, M., Anyileke, G., Hell, J. 2020. Temperature and electrical conductivity of water in lake Nyos transmitted by an automatic observation buoy. *Journal of African Earth Sciences*, 172, 1-8.

Pawar, A. L. 2010. Seasonal variation in physicochemical quality of Lonar lake water. *Journal of chemical and pharmaceutical research*, 2(4), 225-231.

Quirós, R., Rosso, J. J., Rennella, A., Sosnovsky, A., Boveri, M. 2002. Análisis del estado trófico de las lagunas pampeanas. *Interciencia*, 27(11), 584-591. Argentina

Quirós, R. 2005. La ecología de las lagunas de las Pampas. *Investigación y Ciencia*. 1(6), 1-13.

Rascón, J., Corroto, F., Leiva-Tafur, D., Gamarra, O. 2021. Variaciones limnológicas espaciotemporales de un lago altoandino tropical al norte de Perú. *Ecología Austral*, 31, 343-356.

- Rodier, J. 1998. *Análisis de las aguas naturales, residuales y aguas de mar* (3.ª ed.). Barcelona: Omega s. A.
- Roldán, G. y Ramírez, J. J. 2008. *Fundamentos de limnología neotropical* (2.ª ed.). Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Rodríguez, S. 2019. *Determinación del estado trófico actual de la laguna de Colta mediante la cuantificación de parámetros químicos (fosfatos, nitratos) y transparencia Secchi* (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Rodríguez, I., Duque, C., Calvache, C., López-Chicano, M. 2010. Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, *Geogaceta*, 49, 107-110.
- Saber, A., James, D., Hannoun, I. 2020. Effects of lake water level fluctuation due to drought and extreme winter precipitation on mixing and water quality of an alpine lake. Case study: Lake Arrowhead, California. *Science of the Total Environment*, 714, 136-762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136762>.
- Sierra, C. A. 2011. Calidad del agua: evaluación y diagnóstico (1.ª ed.). Medellín: Universidad de Medellín.
- Tito-Ontaneda, B. M. 2018. *Estudio morfométrico de la laguna Cube* (Trabajo de titulación de pregrado). Carrera de Ingeniería Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Toro, D., Salazar, M., Ocampo, D., Correa, R. y Salgado, P. 2012. Estudio limnológico de la laguna Negra, zona de amortiguación del PNN Los Nevados. *Boletín Científico Museo de Historia natural*, 2(16), 23-28.
- Torres, J. 2016. *Evaluación de impacto ambiental y plan de manejo ambiental del proyecto «Malecón escénico laguna de Colta», provincia de Chimborazo* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Tulsma. 2015. Anexo 1 del libro VI del Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente. En *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua*. Registro Oficial, p. 185. Quito, Ecuador.
- Ventura, M. 2018. *Los lagos de alta montaña como sensores del cambio climático. Impactos en los ecosistemas acuáticos*. Centro de Estudios Avanzados de Blanes, CSIC, España. Disponible en: <http://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Lagos-alta-montaña-CC.pdf>.
- Verma, A. K., Prakash, S. 2020. Limnological studies of Semara Taal. A wetland of district Siddharthnagar (U.P.), India. *Journal of Fisheries and Life Sciences*, 5(1), 15-19.

GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN Y APROBACIÓN DE ARTÍCULOS

1

DE LAS INSTRUCCIONES SOBRE PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

El autor o los autores que deseen que se publique un artículo de su autoría deben seguir el siguiente procedimiento:

- La convocatoria para la presentación de artículos es abierta.
- El proceso de registro y envío se realiza en la plataforma de la revista.
- En un archivo, remitir el artículo en formato .doc o .pdf
- En otro archivo, poner los datos descritos en el apartado 4.2, que debe estar firmado por sus autores con nombres y apellidos o la declaración de autor institucional
- Para subir los archivos, se debe realizar lo siguiente:
 - i. ingresar a <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG>
 - ii. luego ir a la opción REGISTRARSE,
 - iii. llenar los datos que le solicitan (en letra minúscula),
 - iv. ingresar con el usuario que le llegará al correo electrónico ingresado, y
 - v. seleccionar la opción NUEVO ENVÍO y llenar los datos solicitados.
- Toda la información subsiguiente la recibirá al correo electrónico registrado.

2

DE LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

Una vez recibido un artículo para su publicación, se seguirá el siguiente proceso independiente que seleccionará aquellos a ser publicados en la revista indexada FIGEMPA *Investigación y desarrollo*.

EVALUACIÓN ETAPA 1. Verificación de que el tema esté en las líneas de publicación aprobadas por Latindex y que son ciencias de la ingeniería, ciencias exactas y naturales, energía, geología, ingeniería minera, ingeniería petrolera, tecnología, ciencias de la Tierra y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales no renovables. Esta verificación la realiza el consejo editorial.

EVALUACIÓN ETAPA 2. Verificación del cumplimiento de requerimientos académicos y éticos como son: declaración de originalidad y de que el artículo no ha sido enviado a otra revista para su publicación, que no exista indicios de plagio, cumplimiento de políticas y del formato para la publicación —que no exceda de 8000 palabras, fotografías, tablas, gráficos, ecuaciones y presentación adecuada de referencias—. La realiza una subcomisión del consejo editorial que informa a éste de los resultados para que se traslade a conocimiento de los autores.

EVALUACIÓN ETAPA 3. Es una evaluación técnico-científica que considera:

- (a) El Consejo Editorial dispone de una base de datos con nombres de profesores, investigadores y colaboradores técnicos internos y externos a la FIGEMPA para que actúen como revisores y evaluadores para todas las áreas en que ha sido calificada por Latindex.
- (b) Cada artículo será remitido a un par académico revisor conjuntamente con un formulario para la evaluación donde constan los indicadores técnicos que deben cumplir para su aprobación, quien mediante una evaluación objetiva informará si cumple con los criterios requeridos y proporcionará retroalimentación constructiva sobre cómo podría mejorarlo. Ésta es una evaluación conocida como doble ciego, ya que el revisor no conoce los nombres de los autores ni los autores conocen los nombres de sus evaluadores.
- (c) En caso de que existan observaciones, la dirección de la revista las remite a los autores para que las incorporen de considerarlas pertinente, y una nueva versión se recibe y se vuelve a enviar al revisor.
- (d) El consejo editorial de la revista conocerá y a través de la dirección notificará a los autores los resultados de la evaluación.
- (e) Los artículos que sean aprobados pasarán a las fases de edición técnica y gráfica y publicación.
- (f) Los artículos seleccionados deberán presentarse en un congreso.

3

DEL SISTEMA DE ARBITRAJE: EVALUACIÓN EXTERNA POR PARES Y ANÓNIMA

La revista FIGEMPA *Investigación y desarrollo* es una publicación científica, con periodicidad semestral, en formato papel y digital, que publica trabajos originales, nunca antes editados o difundidos en otras revistas, libros,

congresos, seminarios, etc. Queda establecido un sistema de arbitraje para la selección de artículos que se publican en cada número mediante dos revisores externos —sistema doble ciego— siguiendo los criterios habituales establecidos para las publicaciones científicas seriadas. La revista FIGEMPA admite propuestas redactadas en español e inglés. Los títulos, resúmenes y palabras clave se publican también en lengua inglesa. La revista dedica su mayor parte a artículos de investigación y posee también apartados dedicados a artículos de opinión, editoriales, reseñas bibliográficas. Va dirigida a profesionales de ciencias de la Tierra, ingenierías, tecnologías, innovación, seguridad, investigación científica, investigadores y profesionales relacionados con la práctica y la teoría. A partir de 2016 ha iniciado una nueva etapa, con una Dirección y Comité Editorial renovados, así como un comité científico de especialistas de reconocido prestigio, constituido por investigadores pertenecientes a universidades ecuatorianas, latinoamericanas, estadounidenses y europeas. La gestión editorial, el envío y recepción de originales, su revisión y edición se lleva a cabo mediante la plataforma digital Open Journal Systems (OJS).

El comité editorial de la revista FIGEMPA *Investigación y desarrollo*, una vez comprobado que el artículo cumple con las normas relativas a estilo y contenido indicadas en las normas a los autores para la presentación de originales, lo enviará a dos expertos revisores anónimos y ajenos al comité editorial, según el modelo doble ciego.

La valoración incidirá en el interés del artículo, su contribución al conocimiento del tema tratado, las novedades aportadas, la corrección de las relaciones establecidas, el juicio crítico desarrollado, los referentes bibliográficos manejados, su correcta redacción, el uso ético de la información, etc., indicando recomendaciones —si las hubiera— para su posible mejora.

Basándose en las recomendaciones de los revisores, el editor de la revista comunicará a los autores el resultado motivado de la evaluación por correo electrónico, en la dirección que éstos hayan utilizado para enviar el artículo. El editor comunicará al autor principal el resultado de la revisión —publicación sin cambios; publicación con correcciones; no aconsejable para su publicación— así como las observaciones y comentarios de los revisores.

Si el manuscrito ha sido aceptado con modificaciones, los autores deberán reenviar una nueva versión del artículo, atendiendo a las demandas y sugerencias de los evaluadores externos.

Los artículos con correcciones importantes podrán ser remitidos al comité editorial para verificar la validez de las modificaciones efectuadas por el autor.

Atendiendo al grado de cumplimiento de las modificaciones solicitadas, el comité científico se pronunciará sobre si procede o no la publicación del artículo.

La decisión final será tomada por los miembros del comité editorial. Dicha decisión será comunicada al autor por el editor de la revista.

4

DE LAS NORMAS DE PRESENTACIÓN

- ORIGINALIDAD. Los artículos presentados deben ser originales e inéditos y no estar postulados para su publicación en ninguna otra revista o publicación científica; se excluye también las presentaciones simultáneas. Si se trata un artículo basado un trabajo de titulación, éste debe constar en las referencias.
- USO ÉTICO DE LA INFORMACIÓN: (a) *comercialismo*, el material de naturaleza comercial es inaceptable en un documento técnico por la revista FIGEMPA; las descripciones genéricas pueden sustituir a los nombres comerciales; y (b) *el plagio* de la obra de otros es inaceptable; si se detecta, se aplicarán criterios de similitudes conforme a las recomendaciones técnicas de la Senescyt, y el artículo no será aceptado; si está basado en un trabajo de titulación, éste debe constar en las referencias.
- ESTRUCTURA. El artículo deberá contener: resumen en español e inglés, palabras claves en español e inglés, introducción, metodología, discusión de resultados, conclusiones y referencias bibliográficas.
- FORMATO. Su extensión no deberá ser mayor a 8000 palabras ni a 8 páginas incluidos gráficos, tablas y fotografías; evítese hacer afirmaciones que no estén claramente apoyadas por resultados de otras investigaciones o que han sido validados con estudios rigurosos. El idioma de la revista es el español.

4.1. TÍTULO PRINCIPAL

El título principal debe contener no más de 15 palabras y deberá también estar en inglés.

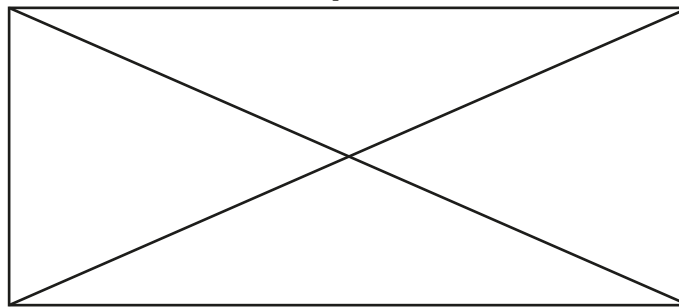
4.2. NOMBRES DE LOS AUTORES Y SUS E-MAILS

- Los nombres de los autores,
- ORCID (*Open Researcher and Contributor ID*),
- título más importante que ha obtenido,
- nombre de la institución a la que pertenece o trabaja,
- correos electrónicos, y
- estos datos deben subirse en un archivo aparte del artículo.

4.3. GRÁFICOS, FOTOGRAFÍAS Y TABLAS

- Todos los gráficos, fotografías y tablas se deben centrar. Todo debe de incluirse en el artículo. Recuerde que la calidad de los gráficos, fotografías y tablas deben tener una buena resolución.
- No colocar figuras antes de su primera mención en el texto. Los ejes de las figuras deberán tener nombres y no símbolos.
- Está permitido, si es necesario, que sus figuras, diagramas y tablas sean de página completa.
- Use mayúsculas solo en la primera palabra de cada título de las figuras y de las tablas. Las figuras y las tablas se deben numerar separadamente, así: Figura 1, Figura 2, etc.; Tabla 1, Tabla 2, etc.).
- Los títulos de la figura deberán estar centrados debajo de las figuras; los títulos de las tablas deberán estar centrados arriba de las tablas.
- Se permite el uso de imágenes a color.

Tabla 1. Lorem ipsum dolor sit amet



Fuente: Lorem ipsum suspendisse potenti.

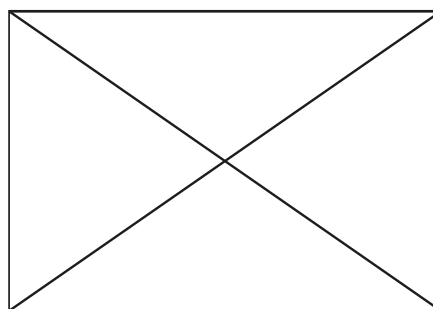
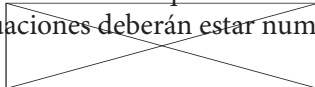


Figura 1. Lorem ipsum dolor sit amet
Fuente: Lorem ipsum suspendisse potenti.

4.4. ECUACIONES

Utilice símbolos que estén disponibles en inglés y en español, en las versiones de procesadores de textos. Las ecuaciones deberán estar numeradas con el número entre paréntesis y al margen derecho del texto.



Ec. (1)

Para su mención, utilice la abreviatura: Ec. (1). Utilice explícitamente la notación exponencial, es decir, 5.6×10^{-3}

4.5. ESTILO DE CITACIÓN

Emplear el sistema de citación Harvard de autor-fecha y siempre se privilegia la señalización del número de página, para las citas textuales y para la paráfrasis.

4.5.1. LAS CITAS TEXTUALES O DIRECTAS

Una cita reproduce de forma exacta el material, sin cambios o añadidos. Se debe indicar el autor, año y número de página. Si la fuente citada no tiene paginación, entonces se escribe el número de párrafo.

- Si la cita tiene menos de 40 palabras, se coloca como parte del cuerpo del texto, entre comillas y entre paréntesis se señalan los datos de la referencia.

Ejemplo (a):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua: «Lorem ipsum dolor sit amet...» (Pérez, 2010, p. 74)

Ejemplo (b):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua Pérez (2010): «Lorem ipsum dolor sit amet...» (p. 74)

- Si la cita tiene más de 40 palabras debe escribirse en un párrafo aparte, sin comillas, alineado a la izquierda y con un margen de 2,54 cm o 5 espacios de tabulador. Todas las citas deben ir a doble espacio.

Ejemplo (a):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua Pérez (2010):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum. (p. 74)

Ejemplo (b):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua:

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum. (Pérez, 2010, p. 74)

4.5.2. CITAS INDIRECTAS O PARÁFRASIS

En estos casos se reproduce con propias palabras la idea de otro. Siguen las normas de la citación textual, a excepción del uso de comillas y citas en párrafo aparte.

Ejemplo (a):

Lorem ipsum Pérez (2010) dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua Proin non diam ut est suscipit accumsan imperdiet a odio et ultrices posuere cubilia curae; phasellus vitae mattis tortor.

Ejemplo (b):

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua Proin non diam ut est suscipit accumsan imperdiet a odio et ultrices posuere cubilia curae; phasellus vitae mattis tortor (Pérez, 2010, p. 74).

En los únicos casos en donde se puede omitir de forma deliberada el número de página es en los de paráfrasis, y esto cuando se estén resumiendo varias ideas expresadas a lo largo de toda una obra y no una idea particular fácilmente localizable en la fuente citada.

4.5.3. OTRAS NORMAS DE CITADO

LIBROS EN PAPEL

Orden de elementos en las referencias:

Autor/Editor; año de publicación; título (en cursiva); edición (se debe incluir en el caso de que no sea la primera edición; la edición se abrevia como «ed.», por ejemplo: 3.^a ed); lugar de publicación: editor; y series y número de la serie (si es importante).

LIBRO CON 1 AUTOR

Cita en el texto

As we know (Bell 2010, p. 23) the most important part of the research process...

Referencia

Bell, J., 2010. Doing your research project. 5.^a ed. Maidenhead: Open University Press.

LIBRO CON 2 O 3 AUTORES

Cita en el texto

Goddard and Barrett (2007) suggested...

Referencia

Goddard, J. and Barrett, S., 2007. The health needs of young people leaving care. Norwich: University of East Anglia, School of Social Work and Psychosocial Studies

LIBRO CON MÁS DE 3 AUTORES

Cita en el texto

This was proved by Young et al. (2000)

Referencia

Young, H. D., Freedman R., Sandin, T. and Ford, A., 2000. Sears and Zemansky's university physics. 10.^a ed. San Francisco: Addison-Wesley

LIBRO CON EDITOR

Cita en el texto

The formation of professions was examined frequently (Prest 1987)

Referencia

Prest, W. (ed.), 1987. The professions in early modern England. London: Croom Helm

LIBRO SIN AUTOR

Cita en el texto

The Percy tomb has been described as «one of the master-pieces of medieval European art» (Treasures of Britain, 1990, p. 84).

Referencia

Treasures of Britain and treasures of Ireland, 1990. London: Reader's Digest Association Ltd.

LIBROS ELECTRÓNICOS (E-BOOKS)

Cuando un e-book es igual que un libro impreso en cuanto a páginas y detalles de publicación, habrá que referenciarlo como un libro en papel.

· UN LIBRO IMPRESO ACCESIBLE ONLINE: hay que referenciarlo como la edición impresa.

Cita en el texto

The process of adaptation is difficult to detect (Levin 2007, p. 19)

Referencia

Rose, M. R., 2007. Adaptation. In: S.A. Levin, ed. Encyclopedia of biodiversity. San Diego: Acade-

mic Press, pp. 17-23

· UNA OBRA DE REFERENCIA QUE SE PUBLICA EN PAPEL Y ONLINE. La versión online se actualiza regularmente; sin embargo, la edición impresa no se actualiza hasta que se publica una nueva edición.

Cita en el texto para la versión online

Rutherford's contribution (Badash 2008)

Referencia para la versión online

Badash, L., 2008. Rutherford, Ernest, Baron Rutherford of Nelson (1871-1937). In: Oxford dictionary of national biography, 2004. Available at: <http://www.oxforddnb.com/view/article/35891> (Accessed: 25 January 2013)

CAPÍTULOS DE LIBROS

Orden de elementos en las referencias:

Autor del capítulo (apellido seguido de las iniciales); año de publicación; título del capítulo; «En:» más autor/editor del libro; título del libro (en cursiva); lugar de publicación: editor; páginas del capítulo.

Cita en el texto

The view proposed by Franklin (2012 p. 88)...

Referencia

Franklin, A. W., 2012. Management of the problem. In: S.M. Smith, ed. The maltreatment of children. Lancaster: MTP, pp. 83-95.

ARTÍCULOS DE REVISTAS

Se simplifican los datos incluidos en las referencias bibliográficas, ya sean artículos en papel o electrónico. El orden de elementos en las referencias es:

Autor; año de publicación; título del artículo; título de la revista (en cursiva); volumen, número y mes (entre paréntesis); páginas; DOI.

ARTÍCULO DE REVISTA EN PAPEL O ELECTRÓNICO

Cita en el texto

...[T]he customer player the part of a partial employee (Dawes and Rowley 1998, p. 353).

Referencia

Dawes, J. and Rowley, J., 1998. Enhancing the customer experience, *Management Decision*, 36(5), pp. 350-357

ARTÍCULO DE REVISTA ELECTRÓNICA CON DOI

Cita en el texto

Shirazi's review article (2010)...

Referencia

Shirazi, T., 2010. Successful teaching placements in secondary schools: achieving QTS practical handbooks, *European Journal of Teacher Education*, 33(3), pp. 323-326. doi: 10.1080/02619761003602246

TESIS

Orden de elementos en la referencia:

Autor; fecha de presentación; título de la tesis (en cursiva); tipo documental (Ph. D. tesis); entidad que otorga el título.

O si está disponible online:

Disponible en: URL; (Accedido: fecha)

Cita en el texto

Research by Tregear (2001) and Parsons (2011)...

Referencia

Parsons, J. D., 2011. Black holes with a twist. Ph. D. tesis. Durham University. Disponible en: <http://etheses.dur.ac.uk/846> (Accedido: 14 agosto 2012)

Tregear, A. E. J., 2001. Speciality regional foods in the UK: an investigation from the perspectives of marketing and social history. Ph. D. tesis inédita. Newcastle University.

TRABAJOS DE FIN DE GRADO (TFG)

Orden de elementos en las referencias:

Apellidos del Estudiante; fecha de presentación; título del TFG (en cursiva); Trabajo de Fin de Grado inédito en... (p. ej. Cc. Ambientales...) o Proyecto Fin de Carrera inédito en...; entidad donde se presenta

O si está disponible online:

Disponible en: URL; (Accedido: fecha)

Cita

The topic of the essay (Labanda Paredes, 2012)...

Referencia

Labanda Paredes, A., 2012. Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante biorreactores de membrana. Proyecto Fin de Carrera inédito en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias.

REPOSITARIOS DIGITALES

Si el libro o artículo de revista está publicado referenciarlo de la misma manera que la publicación impresa.

Orden de elementos en las referencias:

Autor; año; título del artículo; publicado en (si conocemos este dato); título de la revista (en cursiva); volumen y número; [Preimpreso]; Disponible en: URL; (Accedido: fecha)

Cita en el texto

New research by Jeon, Lee and Park (2012)...

Referencia

Jeon, I., Lee, K. and Park, J.-H., 2012. Ramond-Ramond cohomology and $o(D, D)$ T-duality. Publicado en Journal of High Energy Physics [Preimpreso]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1206.3478> (Accedido: 24 agosto 2012)

PÁGINAS WEB

Orden de elementos en las referencias:

Autor; año de publicación del sitio web/fecha de última actualización; título de la página; web (en cursiva); Disponible en: URL; (Accedido: fecha).

AUTOR INDIVIDUAL

Cita en el texto

Yau (2001) provided information about the Chinese community.

Referencia

Yau, T., 2001. Dragon project. Disponible en: <http://www.geocities.com/dragonproject2000/> (Accedido: 14 marzo 2010)

ENTIDADES COMO AUTORES

Cita en el texto

The Open gardens cheme (British Red Cross, 2008)...

Referencia

British Red Cross, 2008. Open gardens. Disponible en: <https://www.redcross.org.uk/index.asp?id=39992> (Accedido: 17 Junio 2010)

PÁGINAS WEB SIN AUTOR (USAR EL TÍTULO DE LA PÁGINA WEB)

Cita en el texto

Illustrations of the houses can be found online (Palladio's Italian villas, 2005)

Referencia

Palladio's Italian villas, 2005. Disponible en: <https://www.boglewood.com/palladio/> (Accedido: 23

julio 2012)Universidad Autónoma de Madrid, 2015. *Citas y referencias bibliográficas. Harvard British Standard (Sistema de Autor-año de publicación)*, Biblioteca y Archivo, pp. 1-18. Disponible en: <https://biblioteca.uam.es/ciencias/documentos/HarvardStandardRefworksEspanol.pdf>.

4.6. ESTILO DE REFERENCIAS

Se organiza alfabéticamente y se coloca sangría francesa.

4.7. GENERALIDADES

4.7.1. ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Defina las abreviaturas y acrónimos la primera vez que sean utilizadas en el texto. Evite emplear abreviaturas en el título, salvo que resulte imprescindible.

4.7.2. CONCLUSIONES

En una conclusión puede repasar los puntos principales del documento, no reproduzca lo del resumen como conclusión. Una conclusión podría extender la importancia del trabajo o podría hacer pensar en aplicaciones y extensiones.

4.7.3. RECOMENDACIONES

De ser necesarias y conforme al artículo.

4.7.4. AGRADECIMIENTOS (OPCIONAL)

Exponga reconocimientos a instituciones y grupo de apoyo.



DITORIAL
UNIVERSITARIA



CiteFactor
Academic Science Journals



DOAJ

**DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS**

