

ISSN 1316-7081

ISSN Electrónico 2244-8780

CIENCIA e INGENIERÍA



Vicerrectorado Administrativo y
Académico
Mérida, Venezuela

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
(ULA)**

**Facultad de Ingeniería
Núcleo Universitario
«Pedro Rincón Gutiérrez»
Mérida - Venezuela**

Bioethics in Biomedical Engineering

Bioética en Ingeniería Biomédica

Rondón, Jairo^{1*}; Muñiz, Cristina¹; Lugo, Claudio²; Farinas-Coronado, Wilfredo¹; Gonzalez-Lizardo, Angel³

¹Biomedical Engineering Department, Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, USA.

²Laboratorio de Cinética y Catálisis, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Department of Electrical and Computer Engineering and Computer Science, Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, USA.

*jrondon@pupr.edu

Abstract

Bioethics is essential for guiding the ethical practice of biomedical engineering, ensuring that technological innovations are developed and applied responsibly for individual and social well-being. As healthcare evolves, ethical considerations become crucial for addressing moral dilemmas and aligning technological advancements with ethical principles. This study explores the definition, trends, and application of bioethics in biomedical engineering, using real-world examples and ethical frameworks to demonstrate how bioethics influences decision-making, research practices, and the development of medical technologies to improve patient care and outcomes. Using a qualitative-documentary methodology, the research utilized databases such as ACS Publications, ScienceDirect, etc, focusing on bioethics and biomedical engineering. Information was organized using Mendeley, guided by principles of bioethics and biomedical engineering

Keywords: Bioethics, Biomedical Engineering, Bioethical principles, Bioengineering, Medical technology.

Resumen

La bioética es esencial para guiar la práctica ética de la ingeniería biomédica, garantizando que las innovaciones tecnológicas se desarrollen y apliquen de manera responsable para el bienestar individual y social. A medida que la atención médica evoluciona, las consideraciones éticas se vuelven cruciales para afrontar los dilemas morales, alineando los avances tecnológicos con los principios éticos. Este estudio explora la definición, las tendencias y la aplicación de la bioética en la ingeniería biomédica, empleando ejemplos del mundo real y marcos éticos para demostrar cómo la bioética influye en la toma de decisiones, las prácticas de investigación y el desarrollo de tecnologías médicas para mejorar la atención y los resultados del paciente. Utilizando una metodología cualitativa-documental, la investigación utilizó bases de datos como ACS Publications, ScienceDirect, etc, con foco en bioética e ingeniería biomédica. La información se organizó utilizando Mendeley, guiado por principios bioéticos y de ingeniería biomédica.

Palabras clave: Bioética, Ingeniería biomédica, Principios bioéticos, Bioingeniería, Tecnología Médica.

1 Introduction

Bioethics in biomedical engineering is a fascinating discipline that sits at the intersection of ethics, technology, and medicine.

Bioethics plays a crucial role in guiding the ethical practice of biomedical engineering by ensuring that technological innovations are developed and applied responsibly. This approach promotes the well-being of individuals and society. In

today's rapidly evolving healthcare landscape, ethical considerations are more important than ever, as they help navigate complex moral dilemmas prevalent in society and the medical industry. They also ensure that technological advancements are aligned with ethical principles and values.

This study aims to explore the definition, trends, and principles of bioethics and its application in biomedical engineering. Real-world examples and ethical frameworks are used to recognize how bioethics shapes decision-making processes, influences research practices, and guides the development of medical technologies to improve patient care and

outcomes.

2 Methodology

For this research, a qualitative-documentary methodology was employed, relying on:

a. Search and data compilation: databases such as ACS Publications, ScienceDirect, Scopus, IEEE, SciELO, RedAlyC, and Google Scholar were utilized; key search terms included “Bioethics”, “Biomedical Engineering”, “Bioethical principles”, and “Bioengineering”.

b. Information selection and refinement: With a search period from 1970 to 2023, a comprehensive exploration was conducted. Utilizing Mendeley (Elsevier, 2021) as a bibliographic management tool, the data was organized based on their relevance to this study’s two foundational frameworks: the bioethical principles outlined in Lewis Vaughn’s “Bioethics: Principles, issues, and cases” (Vaughn, 2019), and the principles of biomedical engineering articulated in Professor William Mark Saltzman’s “Biomedical Engineering: Bridging medicine and technology” (Saltzman, 2015).

c. Selection of subtopics: the refined information facilitated the organization of the research structure and clarified the chosen subtopics related to the study.

d. Analysis of results: a critical analysis of the data was conducted, resulting in comprehensive conclusions found in this study (Rondón y cols., 2023).

3 Results and Discussion

3.1 Definition of bioethics

The term bioethics has a well-known etymological origin from the Greek language. Particularly, the word “bios” meaning life and “ethos” meaning ethics, with the combination commonly translated as “ethics of life” (Postigo, 2011). This term originated in the seventies, due to the need to address ethical challenges posed by scientific and technological advances concerning life and its survival on the planet.

Despite being new when compared to more traditional fields, bioethics has gained prominence in the biomedical sciences. It can be defined as a branch of philosophical ethics that encompasses appropriate concepts and behaviors aimed at safeguarding life and the environment. The field focuses on ethical arguments and addressing dilemmas when applying scientific advancements. Specifically, UNESCO defined bioethics as “the analysis of ethical issues raised by life-sciences, the application of technology, and medicine and health policies. It encompasses all fields of scientific development which affect human beings socially, judicially, and environmentally” (UNESCO, 2015).

The complexity of human experience highlights that of bioethics and underscores the need to establish an interdisciplinary environment. Currently, bioethics outlines the ethical questions raised by scientific facts within an environment of interdisciplinary and transdisciplinary discussion that

professionals in the life sciences must reach.

When concerned with the human perspective, bioethics involves decisions, legal arguments, and morality. The objective is to understand the wide moral diversity of humanity from an anthropological perspective by developing values, norms, and criteria to understand moral responsibility (Rachels & Rachels, 2023). Additionally, it evaluates the consequences for patients when materials or technological devices are applied to them. Considering this argument, an ethical standpoint resonates in this field, asking “what should I do” in contrast to “what can I do” (Triana, 2000).

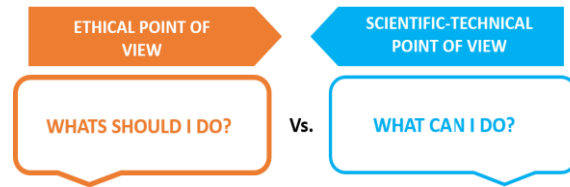


Fig 1. Bioethics, Points of View (Rondón, 2020).

1.2 The origins of bioethics

Bioethics arose in the seventies to confront ethical challenges presented by scientific and technological advances affecting life and its sustainability. Despite its recent emergence, the origins of bioethics are complex and widely debated. This emphasizes the importance of understanding its history and developmental context. Particularly, in topics including research involving human subjects, abortion, euthanasia, and related issues. Although, without a defined terminology, cultural efforts aimed to raise awareness and dedicate time to systematic examination.

In 1970, the scientific community was introduced to the term “bioethics” through the publication of “Bioethics, the science of survival” by Van Rensselaer Potter (1911-2011), a Dutch American biochemist, in the journal *Perspectives in Biology and Medicine* (Potter, 1970). Potter continued to use this term in subsequent works, including his 1971 book titled “Bioethics, Bridge the Future”. In these writings, Potter advocated for the development of a discipline focused on addressing humanity’s survival amidst ecological challenges, earning him recognition as the father of bioethics (Potter, 1970; Rosillo, 2000).

Before Van Rensselaer Potter popularized the term,” Fritz Jahr, a Protestant pastor, theologian, philosopher, and German educator, had already introduced it in 1927. Jahr’s (1927) use, in his article titled “Bio-Ethics: A review of the ethical relationships of humans to animals and plants” lacked the global application later proposed by Potter. Nevertheless, Jahr proposed a “bioethical imperative”, extending Kantian ethical principles from the 18th century to encompass all forms of life (Sass, 2007).

During that period, the global community witnessed alarming instances of science being exploited for nefarious purposes. Notably in atrocities including the atomic bombing

in the cities of Hiroshima and Nagasaki, which demonstrated the capacity for destruction of humanity. Similarly, during the Nuremberg trial of the crimes of the Nazi regime, experiments on human beings were revealed related to euthanasia, eugenics, abortion, and more in the name of science and reductionism (Shuster, 1997; Ghooi, 2011). Additionally, during the Cold War era the United States conducted ethically questionable experiments, such as the Tuskegee Study of Untreated Syphilis (1932-1970) on Afro-descendants, the Jewish Chronic Disease Hospital (JCDH) cancer experiment (1964) on non-cancerous patients, and the Willowbrook State School hepatitis experiment (1956-1970) on children with Down Syndrome (Asnariz, 2001). These experiments further underscored the urgent need for society to reflect on the inherent value of human life (Ciccone, 2015) and the ethical responsibilities of scientific research.

Consequently, the relationship between science, medicine, and humanity underwent a significant transformation alongside advancements in biotechnology. A part of this change is attributed to obstetrician André Hellegers, founder of the “Joseph and Rose Kennedy Institute of Ethics for the Study of Human Reproduction and Bioethics,” established in 1972 with sponsorship from the Kennedy family and later renamed the “Kennedy Institute of Ethics” in 1979. Hellegers pioneered the integration of the term “bioethics” into the academic, biomedical, and public environment.

In contrast to Potter’s environmental focus, Hellegers directed the field towards reproductive biology and medicine. The term gained official recognition with epistemological status in 1978, following its acknowledgement in Warren T. Reich’s publication, “Encyclopedia of Bioethics”. Where he defined bioethics as “the systematic study of human conduct in the area of the sciences of life and health, as this conduct is examined in the light of moral values and principles” (Reich, 1978). This definition highlights its scientific foundation, governed by fixed principles, and enriched by multidisciplinary dialogues in biosciences and human culture. In essence, bioethics encompasses all aspects of life and health sciences, including biological, psychological, mental, economic, commercial, legal, family, political, and social dimensions. Thus, emphasizing its ethical significance beyond mere scientific-technical considerations (González, 2017).

According to W. T Reich, Potter and Jahr are undoubtedly the originators of the term “bioethics”, while Hellegers played a crucial role in systematizing and popularizing it. However, philosopher Daniel Callahan of the “Hastings Center” in 1969 elucidated the goal of this emerging discipling by equipping professionals and the public with tools to comprehend ethical and social challenges stemming from bioscientific progress. Since then, it has been imperative to analyze facts ethically and explore decision-making methodologies with sensitivity, aiming for a balanced consideration of all variables (Contreras, 2004)

1.3 Ethics and bioethics

Ethics and bioethics are founded on the understanding of moral concepts, beginning with morality. Often linked to notions of goodness or righteousness, morality encompasses individuals’ beliefs, standards, and principles, guiding behavior and providing criteria for assessing moral value.

Ethics, also known as moral philosophy, goes beyond mere morality, employing methodologies like reflection and critical reasoning to systematically study morals. It provides a rational framework for exploring moral concepts and judgments, facilitating discussions on determining right and wrong actions, moral principles, virtues, personal objectives, and the definition of good and bad.

Ethics consists of three principal branches: normative ethics, metaethics, and applied ethics (Figure 2). Normative ethics concerns itself with establishing moral standards and principles that guide ethical decision-making. It addresses fundamental questions such as which moral principles should inform our judgments and the role of virtues in our lives. Debates in normative ethics often revolve around moral dilemmas, such as whether the principle of autonomy justifies certain actions or if there are exceptions to moral prohibitions, like the principle of “not killing”.



Fig 2. Branches of Ethics (Rondón, 2020).

In contrast, metaethics delves into the nature and validity of ethical concepts, exploring abstract questions about the foundations of morality. Unlike normative ethics, which focuses on practical ethical forms, metaethics investigates the meaning of ethical terms and the coherence of ethical arguments. It confronts questions about the existence of moral facts, the difference between moral and non-moral beliefs, the justification of moral standards, and the truth value of moral statements.

Finally, applied ethics addresses practical moral issues in specific contexts, such as healthcare and law. This branch of ethics seeks solutions to real-world ethical dilemmas faced by professionals in various fields. For example, science employs descriptive ethics to empirically study morality, focusing on behaviors, beliefs, and experiences that shape moral practices. This approach contrasts with normative ethics which address future-oriented questions about how we should live, whereas descriptive ethics focuses on present realities.

Thus, a subfield of applied ethics that employs the ideals of descriptive ethics must exist for ethical issues in healthcare, research, and technology. This branch is the field of biomedical ethics, or commonly referred to as bioethics. Bioethics confronts complex moral questions including those

related to medical treatment decision, reproductive technologies, and end-of-life care.

Bioethics addresses a wide range of complex moral questions, such as end-of-life care, reproductive rights, genetic testing, organ transplantation, and animal research. These include considerations such as whether it is ethically justifiable for a woman to undergo abortion following the detection of a developmental defect in the fetus, whether parents should have the right to select embryos based on specific genetic traits, the ethical obligations of medical professionals regarding honesty with patients, whether doctors should remove a ventilator from an elderly person sick with COVID-19 and give it to a young person sick with the same disease due to equipment shortages, the role of doctors in assisting terminally ill patients in end-of-life decisions, and the ethical dilemmas surrounding the allocation of scarce organs for transplantation.

The complexity of bioethical analysis necessitates input from a diverse range of experts, including healthcare professionals, legal scholars, scientists, clergy, and policymakers, as well as non-experts such as patients and their families. While moral philosophy forms the core of bioethics, it relies on a comprehensive understanding of medical, scientific, technological, and legal realities to effectively address ethical challenges (Vaughn, 2019).

1.4 Trends in bioethics

In bioethics discussions, it is crucial to recognize its origins in the United States, reflecting the industrialized, technological, and globalized nature of modern society. This discipline rapidly expanded to similarly situated nations, each infusing its cultural nuances into the analysis. Common themes emerge across diverse contexts, including euthanasia, patient autonomy, reproductive rights, resuscitation, quality of life, honesty with patients, genetic studies, transplants, and medical research ethics. All these themes are framed within the broader scientific and technical landscape but have expanded to encompass ecological concerns and environmental pollution.

For instance, variations in views for organ transplantation illustrate these trends. Anglo-Saxon countries often lean towards a market-oriented approach, where organs may be bought and sold, reflecting a more commercialized stance. Conversely, in Europe, the emphasis tends to be on altruism, where organ donation is primarily motivated by a desire to benefit others without expecting financial gain in return.

Similarly, debates surrounding medically assisted reproduction, such as surrogacy and postmenopausal motherhood, reveal contrasting perspectives on issues like donor anonymity and the rights of the unborn. For example, in Europe, there is an ongoing debate regarding the right to anonymity of the donor in assisted reproduction procedures. In contrast, Anglo-Saxon countries often prioritize the rights of the unborn child over the rights of the donor, leading to stricter regulations and limitations on donor anonymity.

Moreover, regulatory approaches differ significantly between the United States and Europe. In the United States and other Anglo-Saxon countries, there is a prevailing individualistic or autonomous perspective when it comes to regulation in experiments with human beings, genetic engineering, or informed consent. This approach emphasizes individual rights and freedoms, often resulting in less stringent regulation. In contrast, Europe tends to impose more restrictions in these areas, prioritizing ethical considerations and social welfare over individual autonomy (Neves, 1996).

Differences in regulatory approaches reflect broader cultural outlooks. Anglo-Saxon countries prioritize individual autonomy in matters like informed consent and genetic engineering, often influenced by factors such as media coverage, legal frameworks, and high-profile cases. For example, in the United States, bioethical discourse is shaped by media representation, legal precedents, and publicized moral dilemmas arising from technological advancements and notable legal trials. This influence has extended to the healthcare system, where the proliferation of specialized medical fields has led to depersonalization and dehumanization of patient care. Traditional medical paternalism is increasingly giving way to a model that emphasizes patient autonomy, albeit amidst challenges related to the equitable distribution of resources and evolving social norms surrounding civil rights. In contrast, Europe tends to adopt more stringent regulations.

The evolution of bioethics in North America and Europe is influenced by historical, cultural, and economic factors. In North America, bioethics tend to prioritize pragmatism and utilitarianism, often adopting a normative, deontological approach to ethical action, which emphasizes adherence to moral rules or duties regardless of their consequences. Conversely, European bioethics is characterized by their transdisciplinary and philosophical nature, drawing from ancient Greek ethical traditions and legal frameworks that emphasize human rights and autonomy. These European traditions contribute to a distinct philosophical approach to bioethical issues, rooted in the medical tradition of doing good and seeking excellence. Additionally, European bioethics is influenced by the political custom of justice dating back to the 4th century BC and shaped by the legal practice of human rights and autonomy since the onset of the 17th century. These opposing approaches at times converge and clash within modern bioethical discourse (Triana, 2000).

In 1974 the National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research, developed the principles of biomedical ethics, in what is known as the Belmont Report. These principles ensured proper conduct that followed basic ethical values: respect for persons, beneficence, and justice. From these three basic principles, American philosophers Beauchamp and Childress (2001) divided the concept of beneficence into two sections: nonmaleficence and beneficence. Their four principles – respect for autonomy, nonmaleficence, beneficence, and justice – provided the medical community with a framework for

recognizing and considering moral problems (Iserson, 1999), while allowing room for judgment in specific cases.

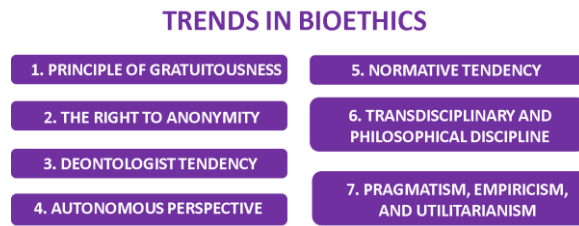


Fig 3. Trends in Bioethics (Rondón, 2020).

In their 1985 book “Principles of Biomedical Ethics”, Beauchamp and Childress highlight their intent behind the “four-principles approach” as a foundation from where detailed rules and policies could be produced. In this work, the first principle, respect for autonomy is defined as a person’s capacity “to rationally accept, identify with, or repudiate a lower-order desire or preference in a manner that is independent of the manipulation of desires” (Beauchamp & Childress, 2001). Additionally, they define an autonomous person as one who decides based on their chosen plan without lacking proper understanding. The latter has led to the implementation of informed consent as a fundamental practice in medical care.

The second principle, nonmaleficence, is defined as an obligation not to inflict harm or injury intentionally. The 1985 book further establishes the connection between this principle and the Hippocratic oath which emphasizes that medical professionals will use treatment to help the sick without injury or fallacy (Beauchamp & Childress, 2001). The intent behind nonmaleficence is to establish a framework that permits patients, caregivers, and medical practitioners to assess and decide on pursuing or denying treatments after considering the potential benefits and risks involved. This principle applies to both competent and incompetent patients, allowing for considerations of quality of life rather than ignoring them. In contrast, beneficence encompasses two doctrines: positive beneficence and utility. Positive beneficence highlights the provision of benefits, while utility involves balancing benefits and drawbacks in different forms of care.

Beauchamp and Childress distinguished the concepts of beneficence and nonmaleficence, despite their common use under a single principle in moral philosophy, to clarify pertinent differences. For instance, consider a surgical procedure. The principle of nonmaleficence ensures that a surgeon carefully assesses potential risks, such as infection, bleeding, or adverse reactions to anesthesia, and takes appropriate measures to minimize harm while achieving the desired outcome. Conversely, beneficence prompts surgeons to evaluate the potential benefits of the surgery, such as pain relief, improving function, or saving the patient’s life, against these risks and align the decision with the patient’s overall well-being and medical goals.

The fourth principle, justice, emphasizes fairness, equitable, and appropriate distribution of goods and benefits in a society (Beauchamp & Childress, 2001). It necessitates a thorough examination of the selection process for research subjects to ensure that certain groups, such as welfare recipients, specific racial or ethnic minorities, or those in institutional settings, are not chosen because of their easy availability, compromised status, or susceptibility to manipulation, but rather based on their relevance to the research problem. Moreover, in research supported by public funds which subsequently lead to therapeutic advancements, justice requires these benefits to be accessible to all, regardless of financial means. Throughout history, injustices have been observed in various research endeavors, as evidenced by the previously discussed cases such as the Tuskegee Study of Untreated Syphilis, the Jewish Chronic Disease Hospital cancer experiment, or the acts highlighted during the Nuremberg trial of the crimes of the Nazi regime (Shuster, 1997).

1.5 Biomedical Engineering

Defined as the application of engineering principles to human biology or medicine, biomedical engineering serves to enhance patient care through technological advancements (Moffatt, 2017). This interdisciplinary field encompasses various domains, including physiology, human biology, molecular imaging, and tissue reconstruction. With the objective to develop technologies designed for monitoring physiological functions and aiding in diagnosis and treatments. Originally rooted in electrical engineering, biomedical engineering shares a close connection with engineering principles while addressing healthcare challenges. Its curriculum integrates subjects such as mathematics, physics, programming, medicine, chemistry, and mechanics to (Aguilar & Gaibor, 2022) to develop tools and systems that contribute to healthcare improvements. While often associated with bioengineering and biological engineering, biomedical engineering has a more specialized focus, centering on medical applications (García, 2020).

Biomedical engineering plays a crucial role in medical practice by providing innovative solutions to clinical challenges, including the design and manufacture of medical equipment and technologies for diagnosis, therapy, and rehabilitation (Pineda, 2010). Despite its distinct focus, biomedical engineering, shares ethical responsibilities with medical professionals and engineers, ensuring adherence to their respective ethical standards. Biomedical engineering follows the principle of justice when addressing healthcare disparities in the fair selection of research subjects in respective specialties (Moffatt, 2017). Furthermore, its interdisciplinary nature fosters collaboration between different fields, such as computer science, leading to groundbreaking advancements in healthcare technology and delivery.

1.6 Origins of Biomedical Engineering

Biomedical engineering finds its roots in ancient Egypt, where rudimentary prostheses were crafted, and in the visionary works of Leonardo da Vinci's sketches which hinted at the fusion of anatomy and engineering. These early endeavors, while modest, laid the groundwork for more sophisticated techniques and technologies.

The late 19th century heralded significant advancements with figures like Lovett Garceau and Alfred Grass, whose pioneering work in electronic instrumentation paved the way for biomedical engineering. Garceau's utilization of vacuum tube-based amplifiers and Grass's creation of the first Electroencephalograph marked crucial milestones, illuminating the intricate workings of the human body with unprecedented clarity. Meanwhile, the mid-20th century witnessed a shift with the advent of cybernetics, as luminaries like Arturo Rosenblueth, Walter B. Cannon, and Norbert Wiener solidified the relationship between the two fields, fostering interdisciplinary collaboration (Pineda, 2010).

The evolution of the modern healthcare system reflects a transition from mystical explanations of illness to evidence-based medicine. Pioneers like Hippocrates revolutionized medical practice, emphasizing the body's inherent healing capabilities and documenting diseases with precision. The Renaissance saw a resurgence of intellectual curiosity, with figures like Leonardo da Vinci and Galileo Galilei advancing anatomical knowledge and promoting observation-based therapies. Despite these strides, hospitals in the Renaissance remained custodial institutions with limited efficacy. It was not until the 18th century that hospitals actively engaged in curative care, coinciding with broader humanitarian movements. However, early hospitals still faced challenges, with high mortality rates persisting into the 19th century.

A breakthrough in modern medicine came in the mid-nineteenth century with the development of the Germ Theory, stating that microorganisms cause infectious diseases. This theory, championed by figures like John Snow and Louis Pasteur, revolutionized medical understanding and paved the way for advancements in diagnostics and treatment. Florence Nightingale's contributions to nursing practices during the Industrial Era further improved patient outcomes by emphasizing the importance of hospital conditions. This period also witnessed the emergence of hospitals as comprehensive care centers, spurred by advancements in medical technology such as the electrocardiograph and x-rays, marking the integration of engineering and medical disciplines and the emerging stages of the biomedical engineering field.

Following the World War II, rapid technological innovations in electronics and medicine propelled the healthcare system into the modern era, with developments like telemetry devices, medical imaging techniques, and artificial organs transforming patient care (Enderle & Bronzino, 2012). For instance, in Colombia, engineer Jorge Reynolds Pombo's development of the pacemaker and biotelemetry in the 1960s underscored the country's early contribution to biomedical innovation (Pineda, 2010). This milestone, though regional

in space, echoed the global trajectory towards the integration of engineering and medicine.

During the 20th century, the development of new medical technologies erupted. One of the most impactful included the first whole-organ transplant in 1967, when surgeons successfully completed the first heart transplant. A procedure that was successful because of the availability of medical tools and devices, allowing for sustaining of life and organ transportation. However, more minute changes are also important such as the development of automated machines which paved the way for DNA sequencing which in turn has made the Human Genome Project possible. Additionally, the development of thermometers, pregnancy tests, blood glucose tests, glucose sensors, and blood pressure monitors have made it so continuous monitoring of our vitals is possible from the comfort of our home. Furthermore, the design, manufacturing, and implantation of artificial joints, limbs, and heart valves have been possible through the study of biomaterials and other synthetic components including metals and polymers (Saltzman, 2009).

These recent advancements in medicine and biomedical engineering continue to push the boundaries of medical innovation. Current research efforts, including the Human Genome Project and stem cell research, are paving the way for the possibility of personalized medicine, and regenerative therapies for the future (Enderle & Bronzino, 2012).

1.7 *The role of a biomedical engineer*

According to Mark Saltzman (2009) in his book "Biomedical Engineering: Bridging Medicine and Technology", biomedical engineering, in a broad sense, entails the education and training of individuals across three distinct roles: "the clinical engineer" specializing in healthcare, "the biomedical design engineer" focusing on industrial applications, and "the research scientist" exploring scientific inquiry.

At a more specific level biomedical engineering encompasses various subdisciplines, each addressing distinct challenges in human health. While the overarching roles of biomedical engineers encompass physiology and mathematical analysis, delving deeper reveals a multitude of specialized fields. These subdisciplines highlight the diverse applications of biomedical engineering and underscore the intricate roles they play in advancing medical technology and improving patient care.

Saltzman identifies physiological modeling as a subdiscipline of biomedical engineering, where mathematical models of biological systems are developed to understand and predict their behavior. For instance, engineers designing prosthetic hips use mathematical models to predict stresses and strains on artificial hips. This subdiscipline of biomedical engineering has far-reaching impacts, including analyzing blood flow in small vessels for the development of medical devices that treat diseases or ailments affecting the circulatory system, such as stents. By incorporating mathematical analysis, engineers in physiological modeling have

successfully understood the functions of the human body with mathematical support. The Hagen-Poiseuille law is one of these models used to explain vessel constriction and pressure loss. However, the Hagen-Poiseuille equation is also applied in fluid dynamics to understand non-biological systems.

Another subdiscipline is biomedical instrumentation, where engineers develop medical devices for medical use. These instruments range from heart monitors to pacemakers, and all play a vital role in patient care by providing feedback on the health of patients. This discipline has incorporated nanotechnology and microelectronics for miniaturization and improved functionality, allowing for the transplantation, like neural stimulators or drug delivery devices. Biomedical engineers in this field ensure that medical devices are dependable and safe.

Biomedical imaging is a revolutionary field led by biomedical engineers that has allowed physicians to collect medical images through machines. Biomedical engineers have successfully designed and constructed imaging equipment such as the computed tomography (CT) scan, magnetic resonance imaging (MRI), ultrasound, and X-Rays. Additionally, they incorporate continuous improvement by analyzing imaging data to enhance diagnostic accuracy, improving treatment outcomes.

The subdiscipline of biomechanics focuses on understanding the mechanical aspects of human physiology. Biomedical engineers in this field study the effects of mechanical forces on tissues and organs, design protective gear, and develop mechanical replacements for damaged body parts. In contrast, biomolecular engineering integrates chemical engineering principles with biology to design and analyze biological systems. In this field, biomedical engineers develop drug delivery systems, tissue engineering techniques, and diagnostic tools.

Continuously, biomedical engineers design artificial organs using synthetic materials combined with biological components. These artificial organs, such as vascular grafts, provide life-saving solutions for patients awaiting organ transplantation. Current methods focus on developing synthetic materials to improve the design of artificial organs to one day incorporate living cells leading “to implantable replacement cartilage, liver, or nervous tissue” (Saltzman, 2009). Biomedical engineers in this field have designed extracorporeal systems that simulate the function of real organs. For example, the process of hemodialysis incorporates an extracorporeal device that simulates the process conducted by the kidneys to filter the blood. Patients with kidney failure are able to undergo hemodialysis, having a machine function as their organ temporarily. Another example is the extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) machine used during cardiac surgery. This machine allows the heart to rest during surgery, by taking over the function of the heart and lungs. Thus, the patient still receives the necessary nutrients to maintain their organs while surgeons operate on the heart (Fournier, 2017).

Biomedical engineers also play a role in molecular and cellular analysis of biological systems. In systems biology, biomedical engineers develop computational models, analyze biological data, and design experimental techniques. Their success in this field has contributed to new methods for cellular manipulation used for genetic engineering. Biomedical engineering’s interdisciplinary approach in systems biology drives advancements in understanding biological processes and developing personalized medical interventions.

Professionals in biomedical engineering are interdisciplinary experts who apply engineering principles to healthcare challenges, contributing to the improvement and advancement of healthcare through sustainable technological solutions. They play integral roles in diagnostic, treatment, and control processes, including patient information management and policy development for healthcare services (García, 2020).

1.8 Applications of bioethics in Biomedical Engineering

In biomedical engineering, the integration of bioethical principles is of great significance. These ethical considerations are imperative for biomedical engineers engaged in innovative research and innovation. Just as medical professionals adhere to ethical guidelines set forth by the American Medical Association (AMA) in 1980, biomedical engineers must operate under a code of ethics. For instance, the American College of Clinical Engineers established a distinct code aimed at fostering ethical conduct among its members. This code mandates various principles, including the accurate representation of one’s level of responsibility, authority, experience, knowledge, and education. Additionally, it emphasizes the importance of disclosing conflicts of interest, respecting the confidentiality of information, and working towards the improvement of healthcare delivery. While this code underscores the profession’s commitment to minimizing harm, it may not comprehensively address ethical dilemmas in every scenario (Enderle & Bronzino, 2012) and other biomedical engineering specialties. Hence, the incorporation of bioethical considerations is crucial.

Consider the principle of respect for humans, which resonates deeply in the field. Consider the biomedical engineering subspecialty, bioinformatics, which focuses on studying the human genome. According to the NIH’s National Human Genome Research Institute (2024), bioinformatics incorporates the use of computer software to collect and study biological data, particularly DNA and amino acid sequences, to aid in diagnosis, treatment, and the understanding of diseases. When intervening in somatic cells to treat diseases, biomedical engineers must uphold the dignity of individuals. It is imperative that research subjects are not treated as objects of study but recognized as autonomous beings deserving of respect and protection. This principle underscores the ethical imperative to prioritize the well-being and autonomy of patients (Pineda, 2010).

Similarly, the principle of beneficence highlights the

ethical obligation of biomedical engineers to prioritize transparency and safety. By openly communicating their research findings and proposed technological advancements, biomedical engineers ensure that patients, healthcare providers, and policymakers are well-informed. This transparency facilitates the discussion and resolution of potential implications and ethical considerations within the realm of biomedical engineering disciplines.

Consider the field of biomaterials where biomedical engineers develop materials for a variety of medical devices. These devices include artificial ligaments and tendons, heart valves, hearing loss implants, dental implants, and contact lenses. They offer innovative solutions to address medical challenges, by implementing non-biological materials “to interface with biological systems to replace, treat, or support functions of the body” (Moffatt, 2017). However, it requires ethical responsibility to ensure safety, efficacy, and compatibility for their use in patients. For example, consider the development of a new biomaterial for use in artificial heart valves. Biomedical engineers must adhere to the principle of beneficence by conducting comprehensive testing to assess potential dangers and estimate the risks associated with the product. This testing regimen may encompass a wide range of parameters, including resistance to mechanical stress, durability under physiological conditions, biocompatibility, possibility of corrosion, electrical conductivity, and other factors that could impact its compatibility within the patient’s body. Complimentary to this, the principle of nonmaleficence must be considered, as any potential harm or adverse effects resulting from its use should be minimized or eliminated to the greatest extent possible.

Another area of interest in biomedical engineering concerning bioethics is tissue engineering. This discipline focuses on “integrating biology with engineering to create tissues or cellular products outside the body (ex vivo) or to use the gained knowledge to better manage the repair of tissues within the body (in vivo)” (Enderle & Bronzino, 2012). One of its objectives is to develop artificial organs for transplantation, which raises ethical concerns, particularly regarding the use of embryonic stem and germ cells. While these cells hold promise for regenerative medicine, their use is controversial due to ethical considerations surrounding the destruction of human embryos (Moffatt, 2017). Ensuring that research and applications in tissue engineering do not cause harm to human embryos aligns with the bioethical principle of nonmaleficence.

4 Conclusions

Bioethics serves as a guiding framework for the ethical practice and advancement of biomedical engineering, ensuring that technological innovations are developed and applied responsibly to benefit individuals and society. By upholding principles such as respect for autonomy, nonmaleficence, beneficence, and justice, biomedical engineers can navigate complex moral dilemmas, promote ethical awareness, and

foster interdisciplinary collaboration to address pressing healthcare challenges. Additionally, the understanding of past and present trends in bioethics worldwide will continue the dialogue of ethical standards. However, ethical considerations in biomedical engineering are ever evolving, requiring ongoing dialogue to adapt to emerging technologies and dilemmas. As the biomedical engineering discipline continues to push the boundaries of medical innovation, integrating bioethical principles will be essential in promoting ethical integrity, safeguarding patient well-being, and advancing the collective pursuit of healthcare excellence.

Referencias

- Asnariz, T. (2002). ¿De qué hablamos cuando hablamos de bioética? *Revista Selecciones de Bioética*, 1, 37-57.
- Beauchamp, T. L., & Childress, J. F. (2001). *Principles of biomedical ethics*. Oxford University Press, USA.
- Ciccone, L. (2005). *Bioética: Historia. Principios. Cuestiones*. Ediciones Palabra, S.A.
- Contreras, R. R. (2004). *Introducción a la Bioética. La ingeniería genética, la biotecnología y la reproducción: retos para el hombre de la postmodernidad*. Mérida: Universidad de los Andes. Editorial CELCIEC, Depósito legal. Lf23720045403205
- Elsevier. (2021). Mendeley (Version v1.19.8) [Computer software]. <https://www.mendeley.com/>
- Enderle, J., & Bronzino, J. (Eds.). (2012). *Introduction to biomedical engineering*. Academic press.
- Fournier, L. R. (2017). *Basic Transport Phenomena in Biomedical Engineering*, Fourth Edition Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- García, D. K. (2020). *La práctica de la ingeniería biomédica desde una perspectiva ética*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Ghooi, R. B. (2011). The Nuremberg Code-A critique. *Perspectives in clinical research*, 2(2), 72-76. <https://doi.org/10.4103/2229-3485.80371>
- González, E. C. (2017). Por una Historia de la Bioética. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1171-1179.
- Iserson, V. K. (1999). *Principles of biomedical ethics*. Emergency Medicine Clinics of North America.
- Iserson, K. V. (1999). *Principles of biomedical ethics*. *Emergency Medicine Clinics*, 17(2), 283-306. [https://doi.org/10.1016/S0035-9203\(02\)90265-8](https://doi.org/10.1016/S0035-9203(02)90265-8)
- Moffatt, S. (2017). Ethics of Biomedical Engineering: The Unanswered Questions. *Significances Bioeng. Biosci*, 1(1), 10-31031. <https://doi.org/10.31031/SBB.2017.01.000505>
- Neves, M. D. C. P. (1996). *Fundamentación Antropológica de la Bioética: Expresión de un Nuevo Humanismo Contemporáneo*. Contenidos, 8.

- Pineda Romero, M. M. (2010). *Bioética: Manual de bioética para ingenieros biomédicos* (Bachelor's thesis, Universidad de La Sabana).
- Postigo Solana, E. (2011). *Bioética: Concepciones Antropológicas y Corrientes Actuales*.
- Potter, V. R. (1970). Bioethics, the science of survival. *Perspectives in biology and medicine*, 14(1), 127-153.
- Potter, V. R. (1971). *Bioethics, Bridge to the Future*. Prentice-Hall.
- Aguilar, J. E. G., & Gaibor, J. S. Q. (2022). Aplicación de la Bioética en la Práctica Profesional del Ingeniero Biomédico. *Revista Observatorio de las Ciencias Sociales en Iberoamérica*, 20(20), 1-12.
- Rachels, James and Rachels Stuart. (2023). *The Elements of Moral Philosophy*. 10th Edition. McGraw-Hill.
- Reich, W. T. (1978). *Encyclopedia of Bioethics*, Vol. I (XIX). The Free Press Div Macmillan Publ Co.
- Rosillo Martínez, A. y Faz Arredondo, L. (2019). *Bioética, Derecho y Derechos Humanos*. 1ª ed. Aguascalientes-San Luis Potosí: CENEJUS-UASLP-CBSLP.
- Rondón, J. (2020). Module 1. Bioethics. Polytechnic University of Puerto Rico, USA.
- Rondón, J., Vázquez, J., & Lugo, C. (2023). Biomaterials used in tissue engineering for the manufacture of scaffolds. *Ciencia e Ingeniería*, 44(3), 297-308. Recovered from <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/19221>
- Saltzman, W. M. (2015). *Biomedical engineering: bridging medicine and technology*. Cambridge University Press.
- Sass, H. M. (2007). Fritz Jahr's 1927 Concept of Bioethics. *Kennedy Institute of Ethics Journal*, 17(4), 279-295.
- Shuster, E. (1997). Fifty years later: the significance of the Nuremberg Code. *New England Journal of Medicine*, 337(20), 1436-1440. <https://doi.org/10.1056/NEJM199711133372006>
- Triana, J. E. (2000). Bioética: Origen y Tendencias. *Revista de la Facultad de Medicina*, 48(4), 219-223.
- UNESCO and bioethics: make bioethics everyone's business, (2015). SHS/2015/PI/H/9
- Vaughn, L. (2019). *Bioethics: Principles, issues, and cases* (4th Ed.). New York: Oxford University Press.

Recibido: 07 de enero de 2024

Aceptado: 20 de marzo de 2024

Rondón Jairo, Doctor in Applied Chemistry, mention

Materials Study, 2015, University of the Andes. Professor in the Biomedical Engineering Department at the Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, PR-USA.

 <https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>

Muñiz Cristina, BSc. in Biomedical Engineering, 2025, Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, PR-USA. Email: muniz_113790@students.pupr.edu

 <https://orcid.org/0009-0003-0195-2468>

Lugo Claudio, Doctor in Chemistry in Applied Chemistry, *Materials Study*, 2017. (ULA). Professor at the University of the Andes, Faculty of Sciences, Kinetics and Catalysis Laboratory. Email: claudiolugo@ula.ve

 <https://orcid.org/0000-0001-8003-0354>

Farinas-Coronado, Wilfredo: Ph.D. Biomedical Engineering, 2002, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Professor; Head Department Director of the Biomedical Engineering Department at the Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, USA. Email: wfarinas@pupr.edu

 <https://orcid.org/0000-0003-2095-5755>

Gonzalez-Lizardo, Angel: Ph.D. Engineering, 2003, University of Dayton, Dayton, OH. Professor; Director, Plasma Engineering Laboratory and Sponsored Research Office at the Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, USA. Email: agonzalez@pupr.edu

 <https://orcid.org/0000-0002-0722-1426>

Estudio catalítico sobre RSM empleando óxidos mixtos Perovskitas $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$, obtenidas vía combustión en solución, SCS

Catalytic study on RSM using mixed oxides Perovskites $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$, obtained via solution combustion, SCS

Lugo, Claudio^{1*}; Ferreira, Carla¹; Petit, Eliel¹; Guerrero, Maryuri¹; Torres, Ruben¹; Pérez, Patricia²; Rodríguez, Pedro³; Rondón, Jairo⁴

¹Laboratorio de Cinética y Catálisis, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

²Laboratorio de Polímeros, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Casilla 160C, Chile.

⁴Biomedical Engineering Department, Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, USA.

*claudiolugo@ula.ve

Resumen

En el presente trabajo se han logrado preparar óxidos mixtos, específicamente del tipo perovskitas con fórmula ABX_3 ($A = \text{Sr}$ y Mg ; $B = \text{Co}$ y Ni ; $X = \text{O}$) a partir de la síntesis por combustión en solución, SCS, empleando glicina como combustible y radiación microondas como fuente de energía. Los óxidos mixtos fueron caracterizados vía espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier FTIR y por difracción de rayos X DRX. La FTIR evidencia la presencia de bandas características de interacciones MO (metal – oxígeno) a longitudes de onda menores a los 1000 cm^{-1} , indicando la presencia de estos metales en los óxidos sintetizados. La DRX demuestra que la fase predominante en estos materiales corresponde a los reportados para perovskitas tetragonales (grupo espacial: $I4/mmm$); además, se determinó el tamaño del dominio cristalino a partir de la Ecuación de Scherrer, encontrándose valores por debajo de los 20 nm. El test catalítico para la reacción de reformado de metano indica que las perovskitas bimetalicas P-CoNi-3 y P-CoNi-4, presentan la mayor conversión promedio del hidrocarburo; ésta varió entre 78 - 77 % a 700°C , con una selectividad promedio hacia Syngas de 40 y 21 % respectivamente.

Palabras clave: Óxidos mixtos, Perovskitas, reformado de metano, cambio climático.

Abstract

In the present work, mixed oxides have been prepared, specifically of the perovskite type with formula ABX_3 ($A = \text{Sr}$ and Mg ; $B = \text{Co}$ and Ni ; $X = \text{O}$) from solution combustion synthesis, SCS, using glycine as fuel and microwave radiation as a source of energy. The mixed oxides were characterized via Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD). The FTIR shows the presence of characteristic bands of MO (metal – oxygen) interactions at wavelengths less than 1000 cm^{-1} , indicating the presence of these metals in the synthesized oxides. The XRD demonstrates that the predominant phase in these materials corresponds to those reported for tetragonal perovskites (space group: $I4/mmm$); In addition, the size of the crystalline domain was determined from the Scherrer Equation, finding values below 20 nm. The catalytic test for the methane reforming reaction indicates that the bimetallic perovskites P-CoNi-3 and P-CoNi-4 present the highest average conversion of the hydrocarbon; this varied between 78 - 77 % at 700°C , with an average selectivity towards Syngas of 40 and 21 % respectively.

Keywords: Mixed oxides, Perovskites, methane reforming, climate change.

1 Introducción

La química como rama principal de la Ciencia, ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de las sociedades, por lo cual, no es ajena al ser humano como especie animal que

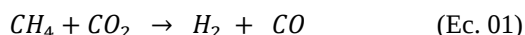
habita el planeta Tierra. Según estimaciones de la ONU, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, en condiciones ambientales cada vez más deterioradas. A raíz de esta problemática surge la necesidad de buscar soluciones entre las que destacan el empleo de energías renovables en

conjunto con la utilización de ciertos gases de invernadero para producir compuestos con una amplia variedad de usos en la industria. La Catálisis desde sus inicios, ha ido tomando relevancia hasta convertirse en las últimas décadas en una parte muy importante de la industria química en general (UNL, 2014).

El cambio climático es un problema global y sus impactos mayores serán a largo plazo e involucra complejos procesos naturales entre los que se destacan la lluvia ácida y el efecto invernadero. La mayor cantidad de gases responsables del efecto invernadero son producidos por el consumo de combustibles fósiles. Venezuela tiene grandes reservas de gas natural, lo que ha provocado desde hace más de 70 años, una política de exploración y producción del mismo. Una de las medidas tomadas para reducir las emisiones de gases invernaderos al ambiente es la transformación del gas natural, cuyo componente principal es el metano (Valderrama y col., 2005).

El gas natural es mezcla de metano y pequeñas cantidades de CO_2 , N_2 , H_2S o He ; además, es responsable de cerca del 22,33% de la demanda total energía a nivel mundial (Bonadonna 2020; OPEC 2020). En Venezuela el metano extraído contiene alrededor de 80% de metano y trazas de etano, propano y CO_2 . Luego del tratamiento estándar y una estandarización adecuada, se obtiene gas metano con una fracción de etano (Armor 1999).

Existe una materia prima (gas de síntesis), con gran utilidad para la generación de productos químicos en la industria petroquímica; se obtiene a partir del proceso catalítico llamado reformado de metano, además, existen tres rutas principales en función de su relación H_2/CO : 1.- Reformado húmedo (vapor de agua) con una relación (1:3), 2.- Oxidación parcial HC cuya relación es (1:2) y 3.- Reformado seco con CO_2 , donde la relación es (1:1) (Ec. 01). Dependiendo de la aplicación petroquímica, se utiliza alguna de las rutas antes mencionadas (Edwards y col., 1995).



Existe un grupo de óxidos mixtos conocidos como *perovskitas* que están siendo utilizadas como catalizadores heterogéneos en reacciones catalíticas como la de reformado de metano, RSM (García y col., 2010; Lugo y col., 2017 - 2019a - 2019b - 2020). Tienen gran capacidad para combinar elementos metálicos y no metálicos en su estructura fundamental ABX_3 , donde A corresponde al metal alcalino, alcalinotérreo o lantánido, B al metal de transición y X casi siempre al elemento oxígeno (Atkins 2008). La estructura cristalina en la perovskita es generalmente cúbica y en algunos casos ortorrómbica. La síntesis por combustión en solución, SCS (Civera y col., 2003; Specchia y col., 2004; Wang y col., 2009; Lugo 2010; Pérez 2015), es uno de los métodos más utilizados para la preparación de este tipo de materiales. Los métodos más utilizados para la síntesis de

este tipo de óxidos mixtos son: (a) Método de coprecipitación (Pecchi y col., 2008), (b) Método Sol-gel (Chen y col., 2004),

(c) Método hidrotermal (Rabenau 1985), (d) Descomposición de complejos inorgánicos (Rao 1994) y, (e) Síntesis por combustión, SC (Civera y col., 2003; Specchia y col., 2004; Wang y col., 2009). La síntesis por combustión, SC, presenta varias metodologías, 1.- Síntesis en fase sólida, 2.- Síntesis por auto-propagación a alta temperatura, SHS y en fase líquida, y, 3- Síntesis por combustión en solución, SCS (Varma y col., 1998).

Algunas ventajas de los métodos por combustión respecto de otras técnicas químicas serían: 1) el uso de una energía química en lugar de energía externa (rentabilidad), 2) la alta velocidad del proceso, 3) el calor liberado capa por capa (garantiza operatividad con grandes cantidades de materia) y 4) la posibilidad de incorporar el método en una línea de producción industrial. Aplicando la SCS es probable que se puedan controlar de manera efectiva algunas propiedades de las perovskitas, como la homogeneidad y estequiometría de los mismos, ya que el proceso ocurre en solución, rápido y sin la necesidad de equipos especiales.

La SCS requiere la presencia de un combustible, que generalmente reacciona con un sólido (especie oxidante) disuelto en un solvente (agua). El aumento de la temperatura de manera violenta durante la síntesis, garantiza alta pureza y cristalinidad del material; dicha metodología involucra tiempos muy cortos, lo que evita la sinterización de las partículas del sólido; la síntesis depende de la velocidad de ignición y la cantidad de gases expulsados del combustible, lo que favorece tamaños de partículas muy pequeños (Varma y col., 2003).

El objetivo de esta investigación fue preparar óxidos mixtos tipo perovskitas variando la cantidad de los metales presentes (Ni y Co) en su estructura, empleando la síntesis por combustión en solución SCS, con glicina como combustible y en presencia de radiación microondas. Las perovskitas se usarán como catalizadores heterogéneos en la reacción de reformado seco de metano, estudiando su efecto en la actividad y selectividad hacia la formación de gas de síntesis ($\text{H}_2 + \text{CO}$).

2 Procedimiento Experimental

2.1 Síntesis de Perovskitas

La preparación de las perovskitas se realizó siguiendo la síntesis por combustión en solución (SCS) descrito por Patil (Patil y col., 1997 y 2002), Mukasyan (Mukasyan y col., 2001 y 2007) y Varma (Varma y col., 2003); esta síntesis fue revisada por González-Cortes e Imbert (González-Cortes y col., 2013), y aplicada recientemente en el Laboratorio de Cinética y Catálisis de la Universidad de Los Andes por Pérez (Pérez y col., 2015), Briceño (Briceño y col., 2018) y Lugo (Lugo y col. 2017b - 2019a - 2019b - 2020 - 2022).

2.1.1 Ignición vía radiación Microondas

La mezcla precursora se colocó en una cápsula de porcelana modificada con orificios (en su cubierta) para permitir la salida de los gases generados durante la combustión del combustible (glicina). Seguidamente, se lleva a un microondas doméstico (en este trabajo se utilizó un microondas marca Premium, modelo PM7078 de 700W de potencia) para iniciar la radiación microonda a un 80% de su potencia máxima (Zhao y col., 2004).

La ignición de la mezcla precursora ocurre cerca de los 30 segundos de iniciada la radiación, se mantiene por unos 10 a 15 segundos en los que se generan de manera violenta llamas y gran cantidad de gases, debido a la ionización de los gases acumulados dentro de la cápsula de porcelana, elevando mucho más la temperatura. El tiempo total de la radiación de la mezcla precursora fue de ~ 90 segundos para todos los sólidos. Finalmente, se obtiene un polvo muy fino de color grisáceo (óxido mixto tipo perovskita).

2.1.2 Estequiometría de las Perovskitas

La tabla 1 muestra los óxidos mixtos tipo perovskitas obtenidas vía síntesis por combustión en solución, SCS.

Tabla 1. Fórmula/código de los óxidos mixtos tipo perovskitas de $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$ sintetizadas vía SCS.

Fórmula ($\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$)	Ignición	Código
$\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{CoO}_3$	Microondas	ACo-1
$\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{O}_3$		ACoNi-2
$\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$		ACoNi-3
$\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_3$		ACoNi-4
$\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{NiO}_3$		ANi-5

2.2 Caracterización Físicoquímica

Los materiales preparados fueron caracterizados por:

1) Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), utilizando un Espectrofotómetro Infrarrojo con transformada de Fourier, Marca Perkin Elmer, Modelo Frontier y,

2) Difracción de rayos X (DRX) en polvo (en ángulos superiores) usando un difractómetro Bruker D8 Advance, con radiación de $\text{Cu K}\alpha$ de longitud de onda 1.5406 Å, operando a 40 kV y 40 mA. El registro de datos fue en el rango de 2° a 70° , con un tiempo por paso de 0.6 s y 0.02035° .

3 Discusión y Resultados

3.1 Espectroscopia Infrarroja, FTIR

Los espectros infrarrojos de los óxidos mixtos tipo perovskitas de $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0.0- 0.3- 0.5- 0.7- 1.0$), preparadas vía SCS, en presencia de glicina y asistida

por radiación microondas, se muestran en la figura 1. En todos los sólidos se observa una banda $\sim 3402.4 \text{ cm}^{-1}$ asociada con estiramientos de tensión del grupo O-H, debido a la presencia de moléculas de agua coordinadas en los óxidos mixtos (Ramos y col., 2015; Neira y col., 2016).

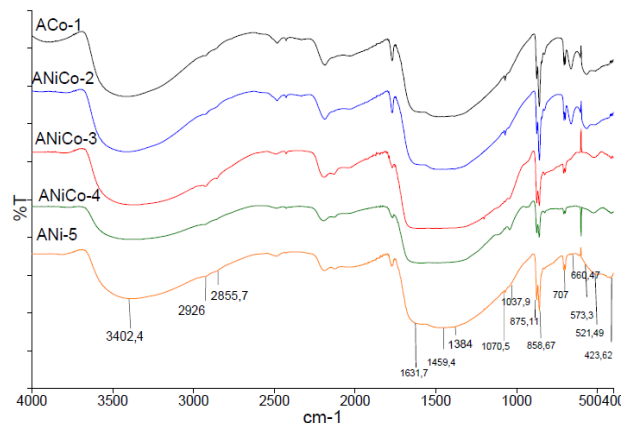


Fig. 1. Espectros infrarrojos FTIR de los óxidos mixtos tipo perovskitas de $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$.

Las bandas de baja intensidad ubicadas entre 2926 y 2855.7 cm^{-1} se relacionan con vibraciones de tensión $-\text{CH}_2-\text{C}=\text{O}$ (sp^3); estos grupos aparecen del probable exceso de combustible durante la síntesis del óxido (Wade 2004). El pico de mediano tamaño cerca de 1631.7 cm^{-1} se debe a la deformación asimétrica del ion carboxilato COO^- (Hernández y col., 2006). En 1459.4 cm^{-1} aparece una señal intensa y ancha debido a las vibraciones de estiramiento asimétrico de nitratos (NO_3^-) obtenidos durante la síntesis y/o carbonatos (CO_3^{2-}) absorbidos de la atmósfera (Gao y col., 2012; Silva y col., 2015; Darroudia y col., 2016; Song y col., 2016). La banda ancha en 1384 cm^{-1} , pertenece a modos de tensión simétrico del NO_2 (enlace N-O) relacionado a compuestos de coordinación bidentados (Rendón y col., 2006); además, puede contener información acerca del ion amonio NH_4^+ proveniente del combustible ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$) o del NH_4OH añadido al momento de optimizar el pH en el medio de reacción.

Existen dos señales de poco tamaño entre 1070.5 y 1037.9 cm^{-1} relacionadas con modos de flexión del enlace C-O (acetales y alcoholes primarios alifáticos saturados), así como a flexiones fuera del plano del enlace C-H debido al NH_4OH utilizado en el ajuste del pH (Gómez 2010).

Las bandas ubicadas a baja longitud de onda (huella dactilar), se atribuyen a enlaces entre los distintos cationes de los metales y no metales (Sr^{2+} , Mg^{2+} , Co^{2+} y Ni^{2+}) con grupos OH y átomos de oxígeno enlazados a esos metales (O-M-O) (Anacona y col., 2013). Por los 875.11 cm^{-1} se observa una señal asociada a vibraciones de flexión del enlace Sr-O en un sitio octaédrico (Sithole y col., 2017; Briceño y col., 2020). En 858.67 cm^{-1} se observa un pico correspondiente a las vibraciones de formación del enlace Mg-O cúbico (Pei y col., 2010). Cerca de $707,17 \text{ cm}^{-1}$ se observa una señal relacionada

a las vibracionales de tensión del enlace Sr-O (Villaquirán y col., 2015). La banda cercana a los 648.65 cm^{-1} corresponde

a modos de deformación del enlace del enlace Co-O (Radev y col., 2008).

Tabla 2. Asignación de bandas del espectro FTIR para las perovskitas tipo $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$.

v (Ref.)	v (cm^{-1})	Enlace	Asignación
3440	3402.4	O-H	Estiramientos de tensión simétricos y asimétricos (ancha) O-H
3050-2870	2926-2855.7	$\text{CH}_2\text{-C=O}$	Estiramiento de tensión (<i>m</i>) C-H
1650-30	1631.7	COO-M	Deformación asimétrica del carboxilato COO-M
1470-40	1459.4	N-O/C-O	Vibraciones de estiramiento asimétrico $\text{NO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$
1384	1384.0	N-O	Tensión simétrica del enlace N-O
1040	1070.5	C-O	Flexión en el plano del enlace C-O
1025	1037.9	C-H	Flexión fuera del plano del enlace C-H
862	875.11	Sr-O	Vibraciones de flexión del enlace Sr-O en un sitio octaédrico
860	858.67	Mg-O	Vibraciones de formación del Mg-O
717	707	Sr-O	Vibración de tensión del enlace Sr-O
678	660.47	O-Co-O	Modos de deformación Co-O
590	573,3	Co-O	Vibración de estiramiento Co-O
522	521.49	Ni-O	Vibración de tensión del enlace Ni-O
470	~430	Ni-O	Vibraciones del enlace Ni-O
~430	~424	Sr-O	Vibración asimétrica de flexión del enlace Sr-O

El pico a longitud de onda de $573,3\text{ cm}^{-1}$ corresponde a vibraciones de estiramiento del enlace Co-O (Radev y col., 2008). La banda observada en 521.49 cm^{-1} corresponde a vibraciones de tensión del enlace Ni-O (Rahdar y col., 2015). El pico situado a baja longitud de onda en 430 cm^{-1} se atribuye a vibraciones asimétricas de flexión del óxido metálico Ni-O (Gao y col., 2012; Rahdar y col., 2015). Por último, la señal cerca de los 424 cm^{-1} se debe a la vibración asimétrica del enlace metal-oxígeno (Sr-O) (Sultana y col., 2015). La tabla 2 muestra la asignación de las señales de los espectros infrarrojos obtenidos para las perovskitas sintetizadas.

3.2 Difracción de Rayos X, DRX

La figura 2 muestra los patrones de difracción de las perovskitas tipo $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$. Para identificar (por comparación) la(s) fase(s) presente(s) en los materiales sintetizados, se utiliza el software X'Pert Highscore Plus 2.1 el cual permite manejar la base datos PDF2-2004 de la ICDD.

La fase que predomina en todos los sólidos es una perovskita tetragonal (grupo espacial: $I4/mmm$) óxido de estroncio y níquel (Sr_2NiO_4), identificada con la ficha 01-070-0509 (Grande y Müller-Buschbaum, 1977). La formación de la fase perovskita, se ve favorecida en los sólidos preparados con glicina, debido a que se alcanzan mayores temperaturas durante el proceso de combustión, induciendo a la formación de la fase perovskita (Pérez y col., 2015). Se debe tomar en cuenta que un calentamiento a temperaturas elevadas puede romper la estructura perovskita, lo cual resulta en la formación de fases metálicas llamadas *Ruddlesden-Popper* que tienden a formar *perovskitas en capas* tipo $\text{A}_{n+1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}$ (Savinskaya y col., 2007).

La fase de perovskita identificada con la ficha 01-070-0509 sugiere una estructura de *perovskita en capas*, $\text{A}_{n+1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}$, donde $n=1$, es decir del tipo A_2BO_4 ,

específicamente Sr_2NiO_4 . Este tipo de material cerámico se forma como consecuencia de defectos de vacancias durante su formación a temperaturas elevadas (Askeland y Phulé, 2004).

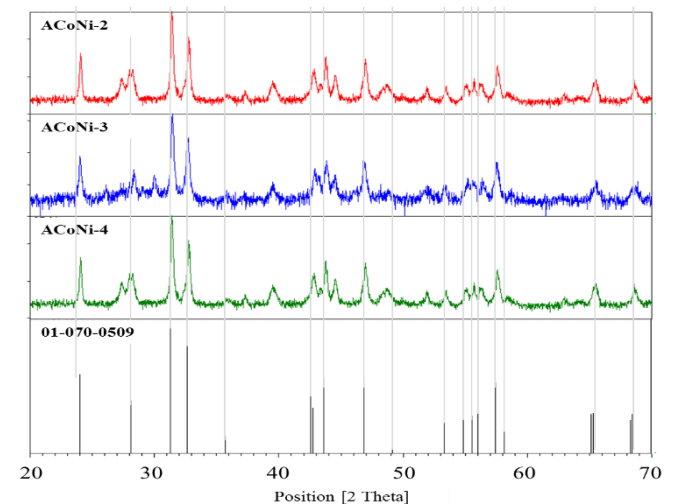


Fig. 2. Patrones de difracción de las perovskitas tipo $\text{Sr}_{0.7}\text{Mg}_{0.3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$. Ficha: 01-070-0509 (Sr_2NiO_4).

3.2.1 Cálculo del dominio cristalino

Se determinó el tamaño promedio del dominio cristalino en los óxidos mixtos donde estaban presentes los elementos metálicos Ni y Co (muestras 2, 3 y 4), utilizando la ecuación de Scherrer (Ec. 02) (Langford y col., 1978).

$$d = \frac{Kw \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(2\theta)} \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde,
 d = tamaño del dominio cristalino
 Kw = constante de Scherrer (0.89)

λ = longitud de onda de la radiación utilizada (λ_{Cu}) en nm
 β = ancho a la altura media del pico de difracción en el ángulo θ

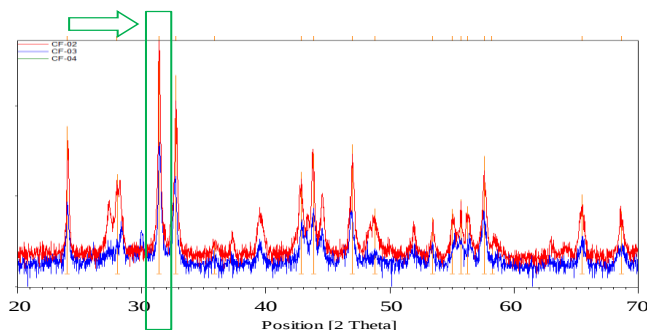


Fig. 3. Pico de mayor intensidad (línea (103)) del Patrón de difracción de los óxidos sintetizados, utilizado para el cálculo del tamaño de dominio del cristalito.

Tabla 3. Parámetros usados en la ecuación de Scherrer y diámetros del dominio cristalino determinados.

Fórmula ($Sr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_xCo_{1-x}O_3$)	Código	Kw	λ (Cu)	2 θ	cos2 θ	β	d(nm)
$Sr_{0.7}Mg_{0.3}CoO_3$	ACo-1	---	---	---	---	---	---
$Sr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_{0.3}Co_{0.7}O_3$	ACoNi-2	0.89	1.54	31.411	0.99999	0.2494	5.496
$Sr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_{0.5}Co_{0.5}O_3$	ACoNi-3	0.89	1.54	31.451	0.99940	0.1076	12.749
$Sr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_{0.7}Co_{0.3}O_3$	ACoNi-4	0.89	1.54	31.418	1.00000	0.0846	16.204
$Sr_{0.7}Mg_{0.3}NiO_3$	ANi-5	---	---	---	---	---	---

3.3 Test Catalítico: Reformado seco de Metano

3.3.1 Respuesta Instrumental (TCD en el CGases)

El factor de respuesta del detector de conductividad térmica (TCD) del cromatógrafo de gases (CGases), se determinó utilizando argón como gas de arrastre, con un flujo de 30 mL/min en el sistema de columnas internas del cromatógrafo de gases. El horno del cromatógrafo de gases (CGases) operó en condiciones isotérmicas ~ 150 °C. El factor de respuesta es diferente para cada compuesto (ver tabla 4).

Tabla 4. Respuesta al CO respecto del Detector TCD.

Compuesto (gas)	Respuesta TCD (respecto el CO)
Hidrógeno, H_2	8.29
Metano, CH_4	3.76
Dióxido de Carbono, CO_2	1.26
Monóxido de Carbono, CO	1.00

3.3.2 Pretratamiento de las Perovskitas

Los óxidos sintetizados ($Sr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_xCo_{1-x}O_3$) se pretrataron con un flujo de hidrógeno, H_2 , a razón de 30 mL/min, en una rampa de calentamiento de 10 °C/min, desde

A partir de esta ecuación es posible relacionar el ancho y la intensidad del pico, con el tamaño de los dominios cristalinos; el ancho del pico integrado (β) de la señal es inversamente proporcional al tamaño del dominio del cristal. Para realizar este cálculo se seleccionaron los picos de mayor intensidad de la fase mayoritaria presente en los óxidos obtenidos (ver figura 3).

En la tabla 3 se muestran los tamaños del dominio cristalino, determinados utilizando la ecuación de Scherrer (Ec. 02), en la cual se puede observar que los sólidos preparados tienen un tamaño promedio por debajo del rango establecido para considerarse nanopartículas, es decir, diámetros menores a 100 nm.

temperatura ambiente hasta los 700 °C. En esta temperatura permaneció alrededor de 15 minutos (ver figura 4).

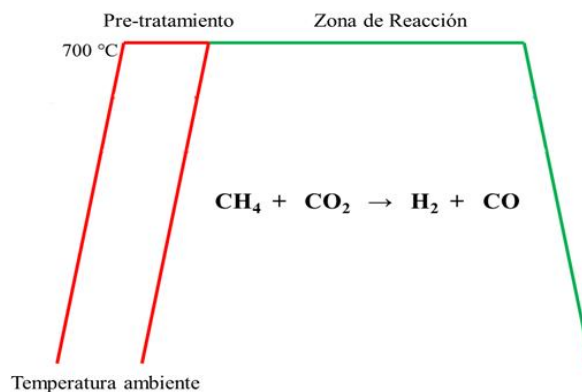


Fig. 4. Ciclo térmico de análisis en la reacción de reformado seco de metano.

3.3.3 Calibración de los parámetros de Rx.

La determinación de parámetros como la masa, el flujo y los rangos de temperatura y velocidad espacial, para un régimen cinético en la reacción, incluye la realización de varios experimentos preliminares. La tabla 5 muestra las condiciones ideales para estudiar la cinética en los catalizadores propuestos en el sistema de reacción utilizado.

3.3.4 Condiciones del Sistema de Rx. (para RSM)

Se pesaron ~30 mg de cada sólido/perovskita para ser utilizado como catalizador en la reacción de RSM. Esta masa se colocó en un reactor de cuarzo en forma de U. Se fijó una temperatura de 700 °C. La relación molar CH_4/CO_2 en la alimentación del sistema fue 1:1 con un flujo volumétrico total de 50 mL y una velocidad espacial de 120.000 mL/g.h.

Tabla 5. Condiciones reales del análisis por *CGases*, obtenidas por experimentación.

Parámetro	Valor
Masa de catalizador (mg)	$\geq 0,030$
Flujo total (mL/min)	≥ 50
Rango Temperatura (°C)	700
Rango velocidad espacial $\times 10^{-3}$ (mL/g.h)	120-240

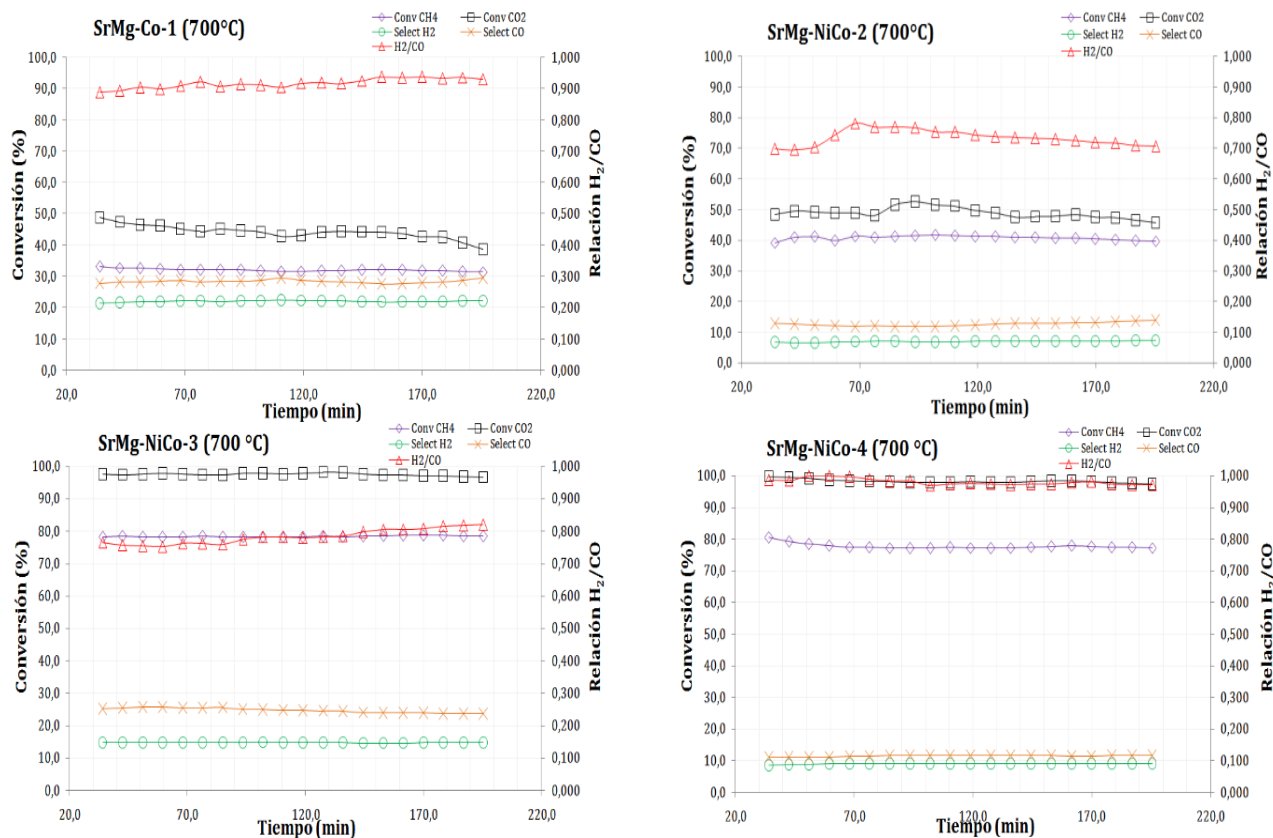
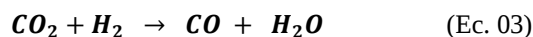
3.3.5 Resultados Catalíticos para RSM

Las conversiones del hidrocarburo (metano) y el CO_2 , las selectividades hacia gas de síntesis y la relación molar H_2/CO para las perovskitas $\text{Sr}_{0,7}\text{Mg}_{0,3}\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0,0-0,3-0,5-0,7-1,0$) a 700 °C, se muestran en la figura 5.

El test catalítico muestra que la sustitución parcial del cobalto por el níquel, favorece la actividad y selectividad de

la reacción de reformado seco de metano a gas de síntesis (ver figura 5). Todas las perovskitas presentan una buena estabilidad térmica a lo largo de los 200 minutos del tiempo de reacción, lo que demuestra que son resistentes a la sinterización y sufren poca desactivación por deposición de carbono. La estabilidad se relaciona con tamaño pequeño de partículas de Ni promedio obtenidos, así como a sitios metálicos con fuertes interacciones con la estructura incluso en altas temperaturas (Sierra y col., 2009; García y col., 2010). La conversión de dióxido de carbono se ve favorecida respecto del metano en todos los sólidos, debido a la presencia de reacciones colaterales competitivas como la reacción inversa de desplazamiento de vapor de agua, en la que CO_2 puede reaccionar con el H_2 formado, para producir CO y vapor de H_2O (Lugo y col., 2017b).

Por otro lado, la relación molar H_2/CO muestra valores por debajo de 1, debido en principio, a la reacción inversa de desplazamiento de agua (Ec. 03), que provoca un aumento en la cantidad de CO y por consiguiente una disminución de la relación H_2/CO final del gas de síntesis, correspondiente a la estequiometría de la reacción de RSM (Lugo y col., 2010).



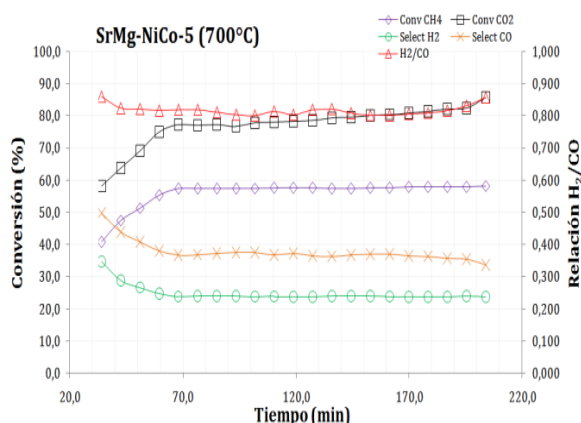


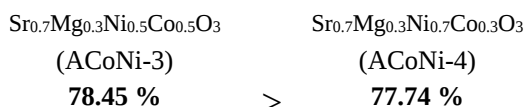
Fig. 5. Conversiones de CH₄, CO₂, Selectividad a Syngas y relación H₂/CO para los óxidos ti-poSr_{0.7}Mg_{0.3}Ni_{1-x}Co_xO₃ a 700 °C.

Tabla 6. Conversión porcentual PROMEDIO de CH₄ y CO₂, relación molar H₂/CO y selectividad hacia gas de síntesis, durante el tiempo de reacción, a 700 °C, para las perovskitas sintetizadas.

Catalizador	ACo-1	ACoNi-2	ACoNi-3	ACoNi-4	ANi-5
Conversión (%) CH ₄	32,13	40,78	78,45	77,74	56,03
Conversión (%) CO ₂	43,93	48,75	97,48	98,24	77,18
Relación H ₂ /CO	0,918	0,733	0,786	0,980	0,818
Selectividad (%) H ₂	22,16	7,04	14,76	9,06	24,86
Selectividad (%) CO	28,57	12,75	24,69	11,57	37,87
Σ>Selectividad (%) H ₂ +CO	50,73	19,80	39,45	20,63	62,73

La selectividad hacia los productos de la reacción (H₂ y CO) es baja, por debajo del 30 % para todos los catalizadores, debido probablemente a las condiciones extremas del análisis y a reacciones colaterales que compiten por los sitios metálicos del catalizador.

Las perovskitas con la mayor conversión (promedio) de metano para el RSM a 700 °C durante todo el tiempo de reacción fueron,



El efecto sinérgico entre los metales Co y Ni probablemente mejora las propiedades del sitio activo metálico (ver tabla 6).

Agradecimientos

Se agradece al Laboratorio de Rayos X, de la Universidad Industrial de Santander, en especial a su director, el Profesor José Antonio Henao Martínez por su valiosa colaboración en la realización de los análisis por Difracción de Rayos X de las muestras (óxidos mixtos) sintetizados en este trabajo.

Conclusiones

Se sintetizaron óxidos mixtos tipo perovskitas a través del método de combustión en solución (SCS), esta síntesis permite obtener nanomateriales de manera rápida, eficiente y

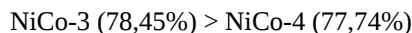
económica. El análisis mediante espectroscopia infrarroja (FT-IR) mostró la presencia de diversas bandas características de las interacciones metal-oxígeno, a longitudes de onda entre 900 y 400 cm⁻¹, estas a su vez demuestran la presencia de los metales en los sólidos sintetizados.

El análisis por DRX de los sólidos (óxidos mixtos) permitió identificar la fase mayoritaria presente, asociado a un óxido tipo perovskita por comparación con la base de datos de ICDD, cuyo patrón de referencia de ficha 01-070-0509 corresponde a una perovskita tetragonal (grupo espacial: *I4/mmm*) óxido de estroncio y níquel (Sr₂NiO₄). Además, se calculó a partir de la DRX (Ec. Scherrer) el tamaño del dominio cristalino, encontrándose que los óxidos sintetizados presentan valores por debajo de los 100 nm, con lo que es posible aseverar la presencia de nanopartículas en la estructura de los sólidos.

En lo referente al test catalítico (RSM), se encontró que con las perovskitas como catalizadores heterogéneos, la sustitución parcial del cobalto por níquel, favorece la actividad y selectividad de la reacción a gas de síntesis. La mayoría de los sólidos demostraron buena estabilidad térmica a lo largo del tiempo de reacción, lo que indica la baja desactivación por deposición de carbono.

La conversión de dióxido de carbono se ve favorecida en comparación a la de metano, debido a la presencia de reacciones colaterales como la reacción inversa de desplazamiento de vapor de agua.

La mayor conversión promedio de metano para las perovskitas sintetizadas fue:



Las perovskitas bimetálicas presentan un efecto sinérgico entre los metales Ni y Co que mejora las propiedades del sitio activo y de esta forma mejora la conversión del hidrocarburo.

Las relaciones molares (H_2/CO) arrojan valores menores que la unidad. Esto indica que ocurre de forma simultánea con el RSM la reacción inversa de desplazamiento de agua provocando un aumento en la cantidad de CO y en consecuencia una disminución en la relación H_2/CO final.

La selectividad hacia gas de síntesis es baja ($> 40\%$) para todos los catalizadores bimetalicos, debido a las condiciones extremas del análisis y a reacciones colaterales que compiten por los sitios metálicos en la superficie de la perovskita.

Referencias

- Anaconda, O., García, D., Kiminami, R. y Raigoza, C. (2013). Efecto de la temperatura en la estructura cristalina de polvos cerámicos de $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ obtenidos por el método de reacción por combustión, *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 33 (1), pp. 108-115.
- Askeland, D. y Phulé P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. D.F. México: Thomson.
- Armor J. (1999). The multiple roles for catalysis in the production of H_2 . *Applied Catalysis A: General*, 176 (2), pp. 159-176.
- Atkins, P. (2008). *Química Inorgánica* (4a edición). España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Briceño, J., Lugo, C., García, E., Rondón, J., Pérez, P., Rodríguez, P., Del Castillo, H. y Imbert, F. (2020). Síntesis de perovskitas basadas en Ni y Fe vía SCS con radiación microondas y su empleo en el reformado seco de metano. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 41 (2), pp. 205-216.
- Bonadonna, T. (2020). Perspectivas Energéticas 2021-2040. Petróleo y Gas Natural. https://cavecon.org.ve/wp-content/uploads/2020/11/Perspectivas_Energeticas_2021_Petroleo_y_Gas_Natural.pdf
- Chen, L., Sun, X., Liu, Y. y Li, Y. (2004). Preparation and characterization of porous MgO and NiO/MgO nanocompositos. *Applied Catalysis A: General*, 265 (1), pp. 123-128.
- Civera, A., Pavese, M., Saracco, G. y Specchia, V. (2003). Combustion synthesis of perovskite-type catalysts for natural gas combustion. *Catalysis Today*, 83, pp. 199-211.
- Darroudia, M., Bagherpour, M., Hosseini, H. y Ebrahimic, M. (2016). Biopolymer-assisted green synthesis and characterization of calcium hydroxide nanoparticles. *Ceramics International*, 42 (3), pp. 3816-3819.
- Edwards, J. y Maitra, A. (1995). The chemistry of methane reforming with carbon dioxide and its current and potential applications. *Fuel Processing Technology*, 42 (2-3), pp. 269-289.
- Gao, H., Wang, G., Yang, M., Tan, L. y Yu, J. (2012). Novel tunable hierarchical Ni-Co hydroxide and oxide assembled from two-wheeled units. *Nanotechnology*, 23 (1), pp. 1-9.
- García, E., Rondón, J., Belandria, L., Meléndez, H., Lugo, C. y Imbert F. (2010). Dry methane reforming over Ni-Co supported by impregnation on MgO nanoparticles, *Revista Ciencia e Ingeniería*, 31 (2), pp. 77-82.
- Gómez, J. (2010). *Síntesis y caracterización del sistema LaSrCrFeO₃ soportado sobre óxidos de cerio dopados con elementos de transición interna*. Tesis Doctoral en Ciencias Químicas, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, pp. 156-158.
- González-Cortes S. y Imbert F. (2013). Fundamentals, properties and applications of solid catalysts prepared by solution combustion synthesis (SCS). *Applied Catalysis A: General*, 452, pp. 117-131.
- Grande, B., & Müller-Buschbaum, H. (1977). Zur Kenntnis von $\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Br}_2$ mit einem Beitrag über La_2NiO_4 . *Journal of Inorganic and General Chemistry*, 433(1), 152-156.
- Hernández, J., Castillo, S., Esparza, H., Téllez, E. y Duarte, J. (2006). Síntesis y caracterización de nanomonocristales de Glicina-Nitrato de Sodio, GSN, con propiedades ópticas no-lineales. *Tecnura*, 9 (18), pp. 4-9.
- Langford, J. y Wilson, A. (1978). Scherrer after sixty years: A survey and some new results in the determination of crystallite size. *Journal of Applied Crystallography*, 11, pp. 102-113.
- Lugo, C., García, E., Rondón, J., Meléndez, H., Pérez, P. y Del Castillo, H. (2010). Síntesis de óxidos mixtos de Co, Ni y Cu sobre MgO por el método de combustión con urea y estudio en la reacción de reformado seco de metano con CO_2 . *Revista Ciencia e Ingeniería*, 31 (1), pp. 53-60.
- Lugo, C., Pérez, M., Quintero, M., Rondón, J., Pérez, P., D'Angelo, R., Meléndez, H., Villarroel, M., Rodríguez, P., Imbert, F. y Del Castillo, H. (2017). Study of the reaction of dry reforming of methane using mixed oxide perovskites type $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Ni}_y\text{Al}_{1-y}\text{O}_3$. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 38 (1), pp. 17-30.
- Lugo, C. (2017b). *Síntesis de nanopartículas de metales de transición tipo óxidos mixtos, y su aplicación en reacciones catalíticas heterogéneas*. Tesis Doctoral en Química Aplicada, mención Estudio de Materiales, Postgrado Interdisciplinario en Química Aplicada, PiQA, Departamento de Química, Facultad de Ciencias,

- Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, pp.8-22.
- Lugo, C., Pérez, M., Pérez, P., Rondón, J., Meléndez, H., García, E., Rodríguez, P., Imbert, F. y Del Castillo, H. (2019a). Síntesis de perovskitas $A_{1-y}A''_yB_{1-x}B''_xO_3$ (A= La, Ca, Sr y B=Ni, Co) preparadas por el método de combustión en solución, vía radiación microondas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 40 (1), pp. 97-106.
- Lugo, C., Pérez, P., Pérez, M., Rondón, J., Meléndez, H., García, E., Rodríguez, P., Imbert, F. y Del Castillo, H. (2019b). Study of reactions catalyzed as methane reforming and selective catalytic reduction of NOx on perovskites of type $La_{0.7}Ca_{0.3}Ni_{1-x}Co_xO_3$ obtained via SCS. Part I. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 40 (2), pp. 137-148.
- Lugo, C., García, E., Rondón, J., Briceño, J., Pérez, P., Rodríguez, P., Del Castillo, H. y Imbert, F. (2020). Study of reactions catalyzed as methane reforming and selective catalytic reduction of NOx on perovskites of type $La_{0.7}Sr_{0.3}Ni_{1-x}Co_xO_3$ obtained via SCS. Part II. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 41 (2), pp. 135-146.
- Lugo, C., Rosal, H., Hidalgo, J., Rondón, J., Pérez, P., Rodríguez, P., Del Castillo, H. y Imbert, F. (2022). Preparation of single and layered Perovskites (A= La and Sr/Ca; B = Ni/Co and Ni/Al) from solution combustion synthesis, SCS, via microwave radiation. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 43 (3), pp. 245-256.
- Mukasyan, A., Costello, C., Sherlock, K., Lafarga, D. y Varma, A. (2001). Perovskite Membranes by Aqueous Combustion Synthesis: Synthesis and Properties. *Separation and Purification Technology*, 25 (1-3), pp. 117-126.
- Mukasyan, A., Epstein, P. y Dinka, P. (2007). Solution combustion synthesis of nanomaterials. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 (2), pp. 1789-1795.
- Neira, A., Gómez, J. y Vera, E. (2016). Synthesis and characterization of a simple $La_{0.8}Sr_{0.2}CrO_3$ perovskite (Universidad del Valle). *Revista de Ciencias*, 20 (1), pp. 79-94.
- Patil, K., Aruna, S. y Ekambaram, S. (1997). Combustion synthesis. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2 (2), pp. 158-165.
- Patil, K., Aruna, S. y Mimani, T. (2002). Combustion synthesis: an update. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6 (6), pp. 507-512.
- Pei, L., Yin, W., Wang, J., Chen, J., Fan, C., & Zhang, Q. (2010). Low Temperature Synthesis of Magnesium Oxide and Spinel Powders by a Sol-Gel Process. *Materials Research*, 13(3), 339-343.
- Pecchi, G., Reyes, P., Zamora, R., Campos, C., Caduus, L. y Barbero, B. (2008). Effect of the preparation method on the catalytic activity of $La_{1-x}Ca_xFeO_3$ perovskite-type oxides. *Catalysis Today*, 133, pp. 420-427.
- Pérez, M., Lugo, C., Quintero, M., Pérez, P., Villarroel, M., Rodríguez, P., Imbert, F. y Del Castillo, H. (2015). Síntesis de óxidos mixtos tipo perovskitas de $La_xSr_{1-x}Ni_yAl_{1-y}O_3$ preparados vía combustión en solución (SCS). *Revista Ciencia e Ingeniería*, 36 (2), pp. 93-104.
- Rabenau, A. (1985). The Role of Hydrothermal Synthesis in preparative Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 24 (12), pp. 1026-1040.
- Radev, L., Pavlova, L., Samuneva, B., Kashchieva, E., Mihailova, I., Zaharescu, M., Malic, B. y Predoana, L. (2008). Sol-gel synthesis and structure of La_2O_3 -CoO-SiO₂ powders. *Processing and Application of Ceramics*, 2 (2), pp. 103-108.
- Rahdar, A., Aliahmad, M. y Azizi, Y. (2015). NiO Nanoparticles: Synthesis and Characterization. *Journal of Nanostructures*, 5 (2), pp. 145-151.
- Ramos, K., Jiménez, Y. y Linares C. (2015). Síntesis y caracterización de óxidos MgAl, MgFe, FeAl y MgFeAl para la degradación de fenol con foto-fenton solar. *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35 (2), pp. 315-325.
- Rao, C. (1994). *Chemical Approaches to the Synthesis of Inorganic Materials*. New Delhi: John Wiley & Sons, Wiley Eastern Ltd.
- Rendón, J., Moreno, L. y Valencia, J. (2006). Síntesis y caracterización de perovskitas de $LaCoO_3$ por el método citrato. *Revista colombiana de Física*, 38 (2), pp. 906-909.
- Savinskaya, O., Nemudry, A. y Lyakhov, N. (2007). Sythesis and properties of $SrFe_{1-x}M_xO_{3-z}$ (M = Mo, W) perovskites. *Inorganic Materials*, 43 (12), pp. 1350-1360.
- Sierra, G., Gallego, J., Batiot-Dupeyrat, C., Barrault, J. y Mondragón, F. (2009). Influence of Pr and Ce in dry methane reforming catalysts produced from $La_{1-x}A_xNiO_{3-\delta}$ (A= Pr, Ce). *Applied Catalysis A: General*, 369, (1-2), pp. 97-103.
- Silva, B., Kulesza, J., De Araújo, D. y Kienneman, A. (2015). Nickel-based Catalyst Precursor Prepared Via Microwave-induced Combustion Method: Thermodynamics of Synthesis and Performance in Dry Reforming of CH₄. *Materials Research*, 18 (4), pp. 732-739.
- Sithole, M., Omondi, B., & Ndungu, P. (2017). Synthesis and characterization of $Ce_{0.6}Sr_{0.4}Fe_{0.8}Co_{0.2}O_{3-\delta}$ perovskite material: Potential cathode material for low temperature SOFCs. *Journal of Rare Earths*, 35(4), 389-397.
- Song, S., Sheptyakov, D., Korsunsky, A., Duong, H. y Lu L. (2016). High Li ion conductivity in a garnet-type solid electrolyte via unusual site occupation of the doping Ca ions. *Materials and Design*, 93, pp. 232-237.
- Specchia, S., Ciera, A. y Saracco, G. (2004). In situ combustion synthesis of perovskite catalysts for efficient and clean methane premixed metal burners. *Chemical Engineering Science*, 59 (22-23), pp. 5091-5098.
- Sultana, S., Mohammad, R., Khan, Z., Umar, K., Ahmed, A., & Shahadat, M. (2015). SnO₂-SrO based

nanocomposites and their photocatalytic activity for the treatment of organic pollutants. *Journal of Molecular Structure*, 1098, 393-399.

Universidad Nacional del Litoral, UNL (2014). *Catálisis, la gran aliada de la Ecología*. https://www.unl.edu.ar/noticias/leer/16252/Catalisis_la_gran_aliada_de_la_ecologia.html. Consulta: 14 de noviembre de 2022, hora: 13:27.

Valderrama, G., Goldwasser, M. (2005). *Reformación de metano con CO₂ sobre perovskitas La_{1-x}Sr_xMO₃ (M = Co, Ni, Fe, Mn) sintetizadas por el método de auto-combustión*. *Saber*, 17 (2), pp. 195-201.

Varma, A., Rogachev, A., Mukasyan, A. y Hwang, S. (1998). *Combustion Synthesis of Advanced Materials: Principles and Applications*. *Advances in Chemical Engineering*, 24, pp. 79-226.

Varma, A., Mukasyan, A., Deshpande, K., Pranda, P. y Erii, P., (2003). *Combustion Synthesis of Nanoscale Oxide Powders: Mechanism, Characterization and Properties*. *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 800, pp. 113-125.

Villaquirán, C., Medina, C., & Tirado, L. (2015). Effect of cobalt-incorporation on the proper-ties of Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆ system. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 281-300.

Wade L. (2004). *Química Orgánica* (quinta edición). Madrid-España: Pearson Educación S.A, 500, 505, 1207.

Wang, K., Zhong, P. y Zhu, J. (2009). Preparation of Highly Active and Stable Perovskite-like Catalyst by Combustion Method: Effect of Complex. *Catalysis Letters*, 131, pp. 672-675.

Zhao, Y., Hong, L., Hong, J. y Zhu, J. (2004). Synthesis of lead sulfide nanocrystals via microwave and sonochemical methods. *Materials Chemistry and Physics*, 87 (1), pp. 149-153.

Recibido: 09 de noviembre de 2023

Aceptado: 15 de febrero de 2024

Lugo González, Claudio Antonio: Doctor in Chemistry in Applied Chemistry, Materials Study, 2017. (ULA). Professor at the University of the Andes, Faculty of Sciences, Kinetics and Catalysis Laboratory. Mérida, Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0001-8003-0354>

Ferreira Chacón, Carla Yanosky: Licenciada en Química, 2023, Departamento de Química (Lab. de Cinética y Catálisis) de la Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: carlayanosky@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-2961-7802>

Petit, Eliel: Licenciado en Química, 2023, Departamento de Química (Lab. de Cinética y Catálisis) de la Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: elielpetit4@gmail.com



Torres Ibarra Rubén Darío: Licenciado en Química, 2023, Departamento de Química (Lab. de Cinética y Catálisis) de la Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: rubendti.16@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0000-3600-8571>

Guerrero Rojas, Maryuri: Licenciada en Química, 2023, Departamento de Química (Lab. de Cinética y Catálisis) de la Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: mar94688@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0000-8230-7038>

Pérez Dávila, Patricia: Ph.D. en Química de Medicamentos, 2017, Instituto de Investigaciones Científicas, Facultad de Farmacia y Bioanálisis. Profesora del Lab. de Polímeros, Facultad de Ciencias, ULA. Mérida, Venezuela. Correo electrónico: perezdpatricia@gmail.com



<https://orcid.org/0000-0003-0591-2351>

Rodríguez Sulbarán, Pedro: Ph.D. en Química Aplicada, mención Estudio de Materiales, 2016, Universidad de los Andes. Estudiante de Doctorado en la Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Edmundo Larenas 129, Casilla 160C, Chile. Correo electrónico: pedrojrs@gmail.com



<https://orcid.org/0000-0002-1309-8532>

Rondón Contreras, Jairo: Ph.D. en Química Aplicada, mención: Estudio de Materiales, 2015, Universidad de Los Andes. Profesor del Departamento de Ingeniería Biomédica en la Polytechnic University of Puerto Rico. San Juan, PR-USA. Correo electrónico: jrondon@upr.edu



<https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>

Aportes al plan para la mitigación de riesgos en el sector central del parque Metropolitano Albarregas, Mérida, Venezuela

Contributions to the plan for risk mitigation in the central sector of the Albarregas Metropolitan Park Mérida, Venezuela

Mejía, Luis^{1*}; Segura, Deivi¹; Mora, Luis²; Pérez, Alberto²

¹ Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida – Venezuela.

² Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*luismejia637@gmail.com.

Resumen

El crecimiento de la población ha generado la falta de planificación urbana, asentando centros poblados en zonas no recomendadas para dicho uso o sin la toma de previsiones necesarias en cuanto al riesgo y desastre estipuladas en las leyes. La presente investigación tuvo como objetivo generar aportes al desarrollo de un plan para la mitigación de riesgos, para ello se calcularon parámetros hidráulicos de profundidad del tirante de agua y velocidad de flujo en el modelo HEC-RAS 5.0.3, los cuales indicaron los criterios para evaluar los niveles bajo, medio y alto de amenaza por desborde para diferentes períodos de retorno (25, 50, 100, 200, 500 años), por medio de datos tomados de caudales máximos, Q25= 519,3 m³ /s, Q50= 600,6 m³ /s, Q100= 688,4 m³ /s, Q200= 765,7 m³ /s y Q500= 873,3 m³ /s, tomados de Rojas, (2017). De la misma forma se desarrolló escenarios de riesgo sísmico, evaluando consecuencias probables. Los análisis y organización de la información siguieron la pauta metodológica y de técnicas de cálculo desarrolladas por el Dr. Argimiro Castillo en su tesis doctoral sobre escenarios de comportamiento de edificaciones ante eventos sísmicos. Se tomó el método “Sísmico” “Determinístico” como resultado del análisis de riesgos en dos posibles eventos con intensidades de I = VI y I = IX en la Escala de Mercalli, los efectos inducidos (efectos locales del suelo y deslizamientos de tierra) se determinaron mediante la metodología de estimación de pérdidas sísmicas HAZUS. Sus aplicaciones permitieron la generación de mapas de zonificación de amenazas para estimar pérdidas ante un evento sísmico e hidrogeomorfológico y entender que, la socavación se convierte en el principal agente generador de amenaza ya que las grandes alturas que presentan los taludes limitan la posibilidad de desbordes.

Palabras clave: Riesgo sísmico, intensidad, crecidas, Hec-ras, Hazus, efectos locales, mitigación, deslizamiento.

Abstract

The growth of the population has generated the lack of urban planning, settling populated centers in areas not recommended for such use or without taking necessary precautions in terms of risk and disaster stipulated in the laws. The objective of this investigation was to generate contributions to the development of a risk mitigation plan, for which hydraulic parameters of depth of the water depth and flow velocity were calculated in the HEC-RAS 5.0.3 model, which indicated the criteria to evaluate the low, medium and high levels of overflow threat for different return periods (25, 50, 100, 200, 500 years), through data taken from maximum flows, Q25= 519.3 m³ /s, Q50 = 600.6 m³ /s, Q100= 688.4 m³ /s, Q200= 765.7 m³ /s and Q500= 873.3 m³ /s, taken from Rojas, (2017). In the same way, seismic risk scenarios were developed, evaluating probable consequences. The analysis and organization of the information followed the methodological guideline and calculation techniques developed by Dr. Argimiro Castillo in his doctoral thesis on behavior scenarios of buildings in the face of seismic events. The "Seismic" "Deterministic" method was taken as a result of the risk analysis in two possible events with intensities of I = VI and I = IX on the Mercalli Scale, the induced effects (local effects of the soil and landslides) were determined using the HAZUS seismic loss estimation methodology. Its applications allowed the generation of hazard zoning maps to estimate losses in the face of a seismic and hydrogeomorphological event and to understand that scour becomes the main threat-generating agent since the great heights of the slopes limit the possibility of overflows.

Keywords: Seismic risk, intensity, floods, Hec-ras, Hazus, local effects, mitigation, landslide

1 Introducción

Actualmente, el riesgo se suele valorar en términos físicos debido a que la vulnerabilidad social es muy difícil de cuantificar. Por otro lado, el nivel de riesgo de una sociedad está relacionado con sus niveles de desarrollo y su capacidad para afrontarlos. Una comunidad puede enfrentar distintas vulnerabilidades o debilidades ambiental, física, económica, social, institucional (Wilches-Chaux, 1993), en ella se evidencia un incremento de la vulnerabilidad, como consecuencia de los cambios en los patrones de precipitaciones, producto de la variabilidad natural del clima, las cuales generan escenarios de riesgos diferentes dependiendo de las características y exposición a la amenaza de cada comunidad. Cuando no se interviene en ese riesgo, se genera la emergencia si ésta sobrepasa la capacidad de respuesta de la comunidad se desencadena el desastre, con pérdidas económicas y de vidas.

Mérida es una ciudad tropical de montaña enclavada dentro de Los Andes Centrales Venezolanos, específicamente dentro de la porción central de la cuenca hidrográfica del río Chama, siguiendo su emplazamiento físico una orientación NO-SE. Por su posición geográfica, características geológicas y topografía, presenta una compleja variedad de aspectos climáticos, hídricos, ambientales y bióticos.

El área seleccionada para la investigación se corresponde con la cuenca del río Albarregas en el tramo 4 y 5 de la zona central del Parque Metropolitano Albarregas, siendo esta una de las zonas con un crecimiento urbano acelerado y localización de grandes áreas de servicios públicos, como lo son; La alcaldía del municipio Libertador, el aeropuerto Alberto Carnevali, CAMIULA, Corposalud y otros entes gubernamentales. Por esta razón la importancia de desarrollar herramientas que permitan a las zonas urbanas establecer acciones que mitiguen y proporcionen una respuesta oportuna ante una posible amenaza.

Por ende, resulta importante establecer técnicas metodológicas que ayuden a los habitantes de las zonas urbanas a establecer tanto sus posibles vulnerabilidades físicas y sociales ante las amenazas naturales como su nivel de riesgo, para que luego puedan establecer acciones que mitiguen los posibles riesgos.

Lo descrito anteriormente conlleva a plantear el siguiente objetivo general: Realizar aportes al desarrollo de un plan para la mitigación de riesgos sísmicos e hidrogeomorfológicos utilizando los modelos numéricos HAZUS, MHMR3 y HECRAS en la Zona central del parque Metropolitano Albarregas.

Para lograrlo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Conocer las condiciones de estabilidad geotécnica y de riesgos sísmicos e hidrogeomorfológicos del área partiendo de una revisión de estudios que permitan un diagnóstico de la situación actual de la zona de estudio.
- ✓ Zonificar espacios bajo condiciones de riesgo aplicando metodologías propuestas para los modelos numéricos a utilizar, identificando las áreas más susceptibles a riesgo sísmico e hidrogeomorfológico.
- ✓ Proponer una base de datos mediante el análisis e interpretación de los resultados, que posibilite la cuantificación de pérdidas materiales ante eventos sísmicos e hidrogeomorfológicos.

La zona norte de Venezuela se caracteriza por formar parte de los límites entre las placas de América del Sur y el Caribe. La zona de subducción del Caribe debajo de la placa de América del Sur da lugar a las cadenas montañosas de los Andes las cuales se caracterizan por ser un límite de placas múltiples ramas conocida como zona de falla de Boconó. La traza principal de la Zona de Falla de Boconó (BFZ), así como las fallas secundarias sub paralelas, son fallas de rumbo-deslizamiento lateral derecha orientadas al NE Figura 1.

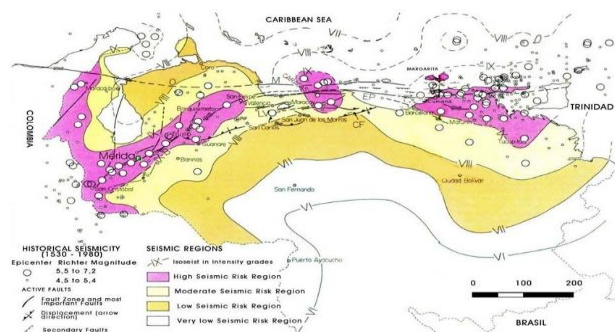


Fig. 1. Mapa histórico de sismicidad de Venezuela (Schubert, 1984).

Los estudios en Mérida sobre sismicidad la identifican como una zona con importante sismicidad de diferentes fallas y sistemas de fallas. Varios autores, a través de diferentes metodologías, han realizado varios estudios de sismicidad para Mérida; estos se describen brevemente cronológicamente con la metodología utilizada y los resultados relevantes obtenidos.

Basado en un enfoque determinista (DSHA), este autor identifica ocho fuentes sismogénicas, ver Tabla 1, y por registros históricos e instrumentales identifica eventos de escenario para cada una de las fuentes.

En esta investigación se establece el evento 1812, $M = 8$ Richter, I (MMI) = X como escenario sísmico para la ciudad de Mérida, asociado a la Zona de Falla de Boconó como fuente sismogénica (Laffaille, 1996).

Tabla 1. Fuentes sismogénicas para la ciudad de Mérida (100-km radius) (Laffaille, 1996)

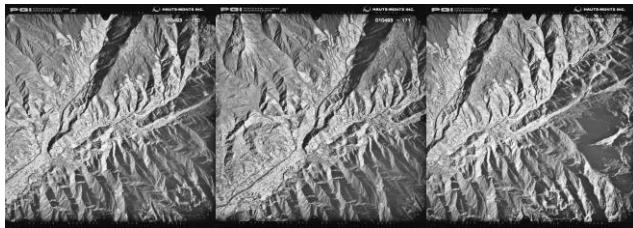
Fuente	Distan- cia (km)	Magnitud (Mb)	Intensidad (MM)
Boconó	12.5	8	IX – X
Granates	15	6.9	VII – VIII
Celoso	25	6	V – VI
Soledad	40	6	V – VI
Piede- monte	35	6.9	VI – VII
Icotea	45	< 6.0	V

2 Materiales y Métodos

El procedimiento metodológico de la investigación se conformó en cuatro (4) fases o etapas de trabajo:

- Fase I: Recopilación y revisión Bibliográfica.
- Fase II: Reconocimiento y adquisición de datos en campo.
- Fase III: Simulación y zonificación.
- Fase IV: Análisis e interpretación de resultados y propuestas.

Las fotografías fueron facilitadas por la oficina del Parque Metropolitano Albarregas (PAMALBA), allí, se identificaron rasgos geológicos como estructuras geológicas (fallas, pliegues, discordancias), litologías, rasgos geomorfológicos que permiten inferir la presencia de fallas geológicas (alineamiento de drenajes, facetas triangulares, drenajes desplazados, entre otros.), zonas pobladas y usos de la tierra. Dichos rasgos contribuyeron a la caracterización del área estudiada.

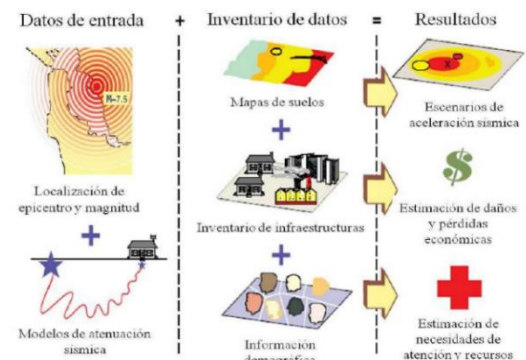
**Fig. 2.** Fotografías aéreas de la misión 010497 (170 / 171 / 172).

La metodología HAZUS MH, fue creada en los Estados Unidos de Norteamérica por La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (Fema, 2017). Los especialistas y planificadores de FEMA desarrollaron esta herramienta metodológica con el fin de atender los efectos generados por desastres naturales.

En HAZUS MH, se contemplan una serie de variables Figura4. Que se interrelacionan para obtener posibles daños materiales en infraestructura y sus efectos en la sociedad.

Dentro de las variables que se contemplan están:

- ✓ La simulación de escenarios sísmicos, a partir de los que se obtienen mapas de aceleración pico del terreno que luego se reclasifican para obtener valores de intensidad de Mercalli Modificada.
- ✓ La utilización de ecuaciones de atenuación sísmica del terreno.
- ✓ Se realiza un inventario de las infraestructuras involucradas y que se pueden ver afectadas por el sismo, se consultan mapas de suelos y sus características de respuesta ante el efecto de las ondas sísmicas.

**Fig. 3.** Esquema de la metodología del programa HAZUS MH. Fuente: FEMA 2008.

El modelo de simulación hidráulica HEC – RAS 5.0.3, permite conocer la capacidad del cauce para transportar una determinada creciente partiendo de datos geométricos (secciones transversales) y los datos asociados a éstas, así como, diferentes elementos que pudiesen encontrarse a lo largo de la red de drenaje: bancos, puentes, alcantarillas, represas, diques, vertederos, entre otros.

En este sentido, el modelo requiere como datos de entrada:

- La geometría del cauce (secciones transversales).
- La rugosidad del lecho y de los bancos.
- Los caudales de diseño.

Con base en el catálogo sísmico histórico, y estudios previos realizados, se procedió a identificar y ubicar las fuentes sísmicas y a analizar el potencial sísmico de las mismas, considerando para este estudio, sismos de importante capacidad destructiva. Este análisis se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Terremotos ocurridos en el occidente de Venezuela. Fuente: (Chirinos, 2010).

Fecha	Tiempo	Epicentro macrosísmico	Intensidad	Fuente de mapa de isosistas
16 de enero de 1674	15:30	8,9°N 70,90°W	VIII	Palme y Altez 2002
26 de marzo de 1812	17:00	8,37°N 71,07°W	IX	Altez, 2005
28 de abril de 1894	22:15	8,7°N 71,70°W	IX	Kingland, Torres y Inglessis, 2008
14 de marzo de 1932	18:00	8,15°N 72,03°W	VIII	Escoba y Rengifo, 2001
03 de agosto de 1950	17:50	9,74°N 69,83°W	IX	INGEO-MIN

En el desarrollo de ese trabajo, se ha empleado con el fin de estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno (25, 50, 100, 200 y 500 años) considerando como puntos de cierre de la cuenca el sector Brisas del Alba de la Ciudad. (Rojas, 2017). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Síntesis de la estimación de caudales generados por HEC- HMS 4.2 para el río Albarregas y algunos de sus afluentes (Rojas, 2017).

Punto de Generación	Caudales máximos (m ³ /s) para los diferentes periodos de retorno				
	25 años	50 años	100 años	200 años	500 años
Qda. Milla	102,4	116,9	132,5	147,5	167,6
Qda. La Pedregosa	247,8	308,7	367,6	419,5	501,0
Qda. Carvajal	97,7	112,4	128,2	143,1	161,9
Qda. Montalbán	107,4	133,3	158,5	182,6	217,2
Río Albarregas en el sector Brisas del Alba	519,3	600,6	688,4	765,7	873,3
Río Albarregas en el sector La Mata baja	1180,9	1383,6	1593,0	1787,4	2056,5
Río Albarregas metros arriba de su confluencia con el río Chama	1404,1	1651,3	1904,8	2141,9	2468,4

En la etapa de simulación y zonificación está enfocada en la aplicación de las de las herramientas computacionales para la estimación y simulación del riesgo ante eventos sísmicos y de inundación del área de estudio.

Con el programa HAZUS MH-MR3, se tiende a generar los modelos que identifican el riesgo sísmico, identificando particularmente las zonas que estarían más vulnerables a deslizamientos de suelos por efectos de sismos de magnitud considerable, específicamente donde se encuentran los elementos urbanos y antrópicos del Parque Metropolitano Albarregas. Por su parte con la metodología de simulación hidráulica HEC-RAS 5.0.3 se pretende modelar bidimensionalmente el flujo inestable del río Albarregas y

simular las huellas de inundación asociadas al mismo en escenarios sísmicos e hidrogeomorfológicos asociados.

El Modelo Hazus

Es un programa desarrollado en los años 90 por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias (FEMA), junto con el National Institute of Buildings Sciences (NIBS), para evaluar las pérdidas potenciales por amenazas naturales en las ciudades de los Estados Unidos. Involucra un diseño de metodologías y software para estimar perdidas por amenazas múltiples (MH), análisis de las Amenazas por inundaciones (MR-2), perdidas por deslizamiento de terrenos por incidencia sísmica (MR-3).

En síntesis, permite estimar las potenciales perdidas en edificaciones e infraestructura debido a terremotos, a las inundaciones fluviales y costeras, y a los vientos huracanados (Fema, 2017).

El Modelo HEC-RAS

Es un programa desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE. UU (liberado en 1995), que modeliza la hidráulica de flujo de aguas de ríos naturales y de otros canales, de cambios de forma de sección de cruce, curvas, y otros aspectos bidimensionales y tridimensionales del flujo, así como transferencia de sedimentos. Incluye numerosas capacidades de almacenamiento y gestión de datos y capacidades gráficas y de informes.

Está compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente.
- Modelización de flujo en régimen no permanente.
- Modelización del transporte de sedimentos.
- Análisis de calidad de aguas.

3 Resultados y Discusión

El lugar se caracteriza principalmente por la presencia del río Albarregas, este divide la terraza de Mérida que a su vez están conectadas por medio de viaductos y enlaces, presenta un relieve empinado, con pendientes abruptas y crestas bien definidas, los cuales son típicos de materiales resistentes, esto se muestra en la Figura 4

Elaboración de la cartografía base

Los perfiles topográficos proporcionaron la información más general de la zona de estudio, como la toponimia, vialidad, hidrografía y topografía a través de las curvas de nivel, esto se muestra en la Figura 5.

El mapa de pendientes de la Figura 6, forma parte de la información preliminar, su confección, se realizó a

partir del mapa topográfico.

Los valores de las pendientes o desniveles en grados ($^{\circ}$) con rangos variables que pasan los 40 grados, datos que son gran importancia para ser aplicado a la **metodología Hazus**.

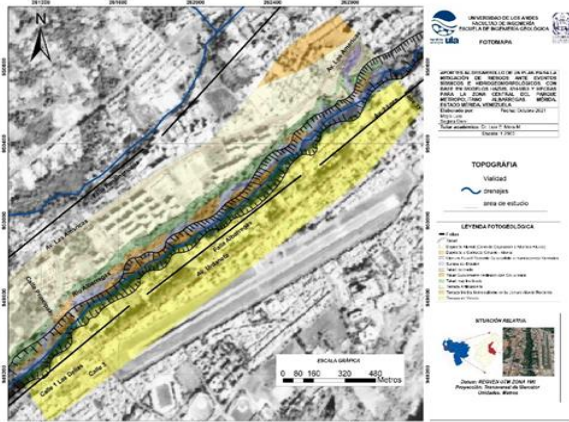


Fig. 4. Fotointerpretación de procesos y geoformas.

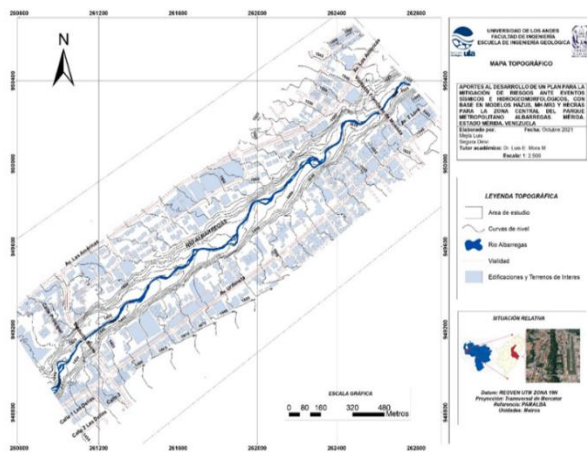


Fig. 5. Mapa topográfico del área de estudio.

En cuanto al control estructural se pueden señalar varias fallas, las cuales condicionan en gran parte la acción de los procesos erosivos en la zona, principalmente los relacionados con los movimientos en masa y profundización de los cauces de los cursos de agua.

Identificación geológica geotécnica del área de estudio

El rasgo geológico más resaltante de la fotografía es identificado (con trazas de color negro) y corresponden a alineaciones estructurales, que prueban la presencia de una zona de falla, que según la geología estructural local corresponden a La Falla del Albarregas, que divide la ciudad, siguiendo el curso del río y la falla de la Panamericana que recorre gran

parte de la Avenida Los Próceres (en su flanco norte), esto se muestra en la Figura 7.

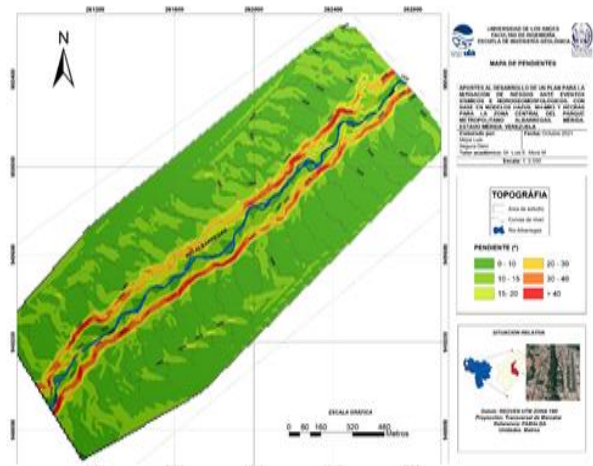


Fig. 6. Mapa de pendientes del área de estudio.

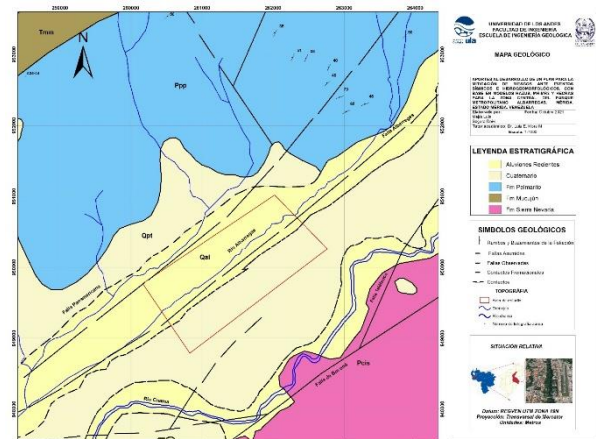


Fig. 7. Mapa Geológico estado Mérida.

Mapa de susceptibilidad

En el proceso de recopilación de información cartográfica, se recurrió a imágenes satelitales tomadas de *Google Earth* y posteriormente georreferenciadas a través del software *Sas Planet*, así como también de la geomorfología, estudios de campo, antecedentes del lugar, entre otros estudios que involucran la geología, se lleva a cabo la elaboración del mapa de susceptibilidad. Esto se presenta en la Figura 8.

A partir de esta zonificación se establecieron cuatro niveles de susceptibilidad, poniendo de manifiesto altos niveles de susceptibilidad que se traducen en zonas con pendientes de moderadas a altas y zonas de talud a lo largo de las márgenes del río Albarregas, donde la acción del río expone de manera regular el material cubierto por vegetación permitiendo que los agentes externos meteorizantes actúen y

ocurran desplazamientos de terreno.

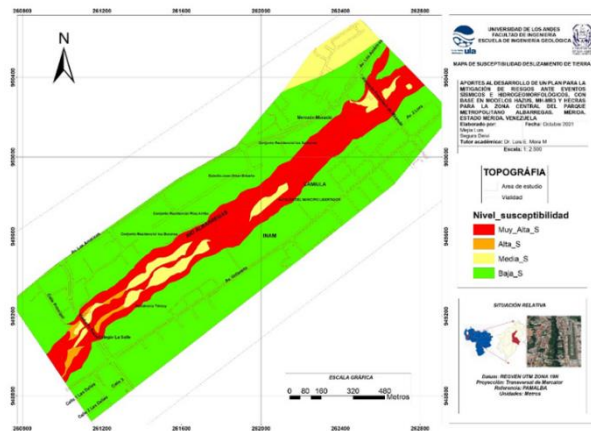


Fig. 8. Mapa de susceptibilidad.

Mapa de efectos locales del suelo

El subsuelo de la meseta de Mérida se caracteriza por poseer dos tipos de suelos, dependiendo de su posición geográfica con respecto al río Albarregas: arcillo-arenosos con poca grava, al Norte y areno-limosos con grava, al Sur, ubicaciones cercanas a cañones profundos, crestas o en cuencas aluviales con geometría compleja específica, pueden generar efectos significativos inesperados en el movimiento del suelo.

Con base en lo anterior, es importante considerar los efectos locales del suelo, ya que pueden generar una amplificación en cuanto a la intensidad del sismo, en la Figura 9 se puede apreciar en el lado Sur de coloración naranja, presenta un incremento de media unidad de intensidad, con respecto al lado Norte.

Mapas de Desplazamiento de tierra por deslizamiento de tierra

Por medio de la metodología de Hazus, se exponen los resultados de la aplicación del modelo de simulación de Desplazamiento de tierra Permanente (DTP), los resultados del análisis de estabilidad de taludes para las características particulares en el área de estudio

Se obtiene que para el escenario de $I = IX$ los terrenos con susceptibilidad de deslizamiento de VIII a X pueden sufrir deslizamiento, cabe destacar que los deslizamientos de tierra ocurren o no dentro de los depósitos susceptibles dependiendo de si la aceleración máxima inducida del suelo a_{is} excede o no la aceleración crítica a_c , en un cierto porcentaje de la superficie total del sitio evaluado, como resultado de estudio para el escenario $I = IX$ la a_c : 0.10 es menor que la a_{is} : 0.1646 y para el escenario de $I = VI$ la a_c : 0.10 es casi

similar a la a_{is} : 0.0899.

Lo expuesto anteriormente indica que el porcentaje de desplazamiento es relativamente alto. La Figura 10, muestra para el escenario $I = VI$ el valor de DTP fue de 0,2402 cm entrando en el rango establecido en la metodología de Hazus. si bien se producen desplazamiento de tierra, los efectos pueden ser muy locales, quedando expuesto algunos sitios del talud.

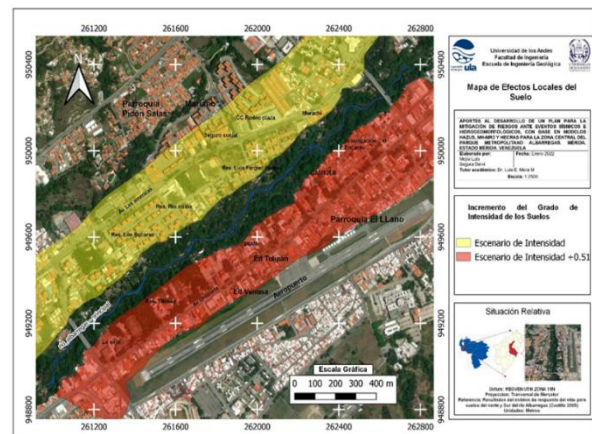


Fig. 9. Mapa de efectos locales del suelo.



Fig. 10. Mapa de desplazamiento de tierra permanente para $I=VI$.

De igual manera para el escenario $I = IX$ el cálculo DTP fue de 1,1899 cm, para este evento el valor obtenido es mucho más amplio que el evento anterior.

Se muestra en la Figura 11, que la totalidad del talud en ambos márgenes se encuentran ampliamente expuestos a desplazamiento. Tal como se mencionó anteriormente, este valor queda dentro del rango establecido por la metodología de Hazus, el cual indica que el máximo desplazamiento de tierra es de 14,8292 cm.

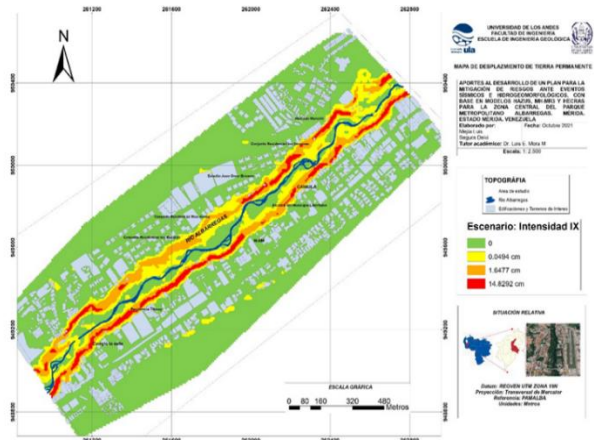


Fig. 11. Mapa de desplazamiento de tierra permanente para I=IX.

Con base en los resultados obtenidos, se planteó crear un mapa de normativa para la construcción de edificaciones en los márgenes de los ríos y taludes, como se muestra en la Figura 12, partiendo de las leyes (Ley de Gestión Integral de Riesgos Socio naturales y Tecnológicos (Gaceta Oficial N° 39.095 del 9 de enero de 2009) y Ley de aguas 2018)

Las franjas identificadas con color azul y gris corresponden a las áreas que no cumplen con el distanciamiento reglamentario respecto al talud y los bordes del río Albarregas, presentando un alto porcentaje de exposición.

Posterior a la evaluación de las normativas, se genera el mapa de exposición a desplazamiento de tierra.

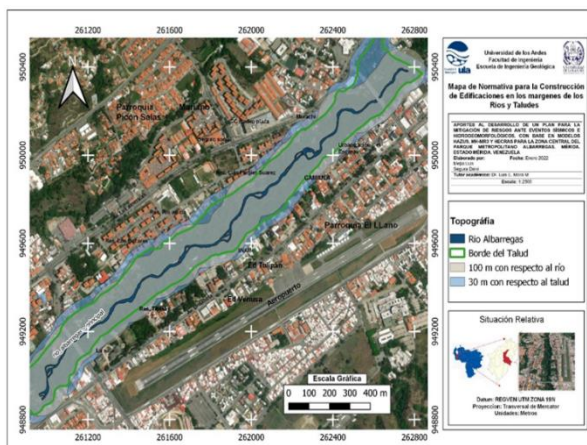


Fig. 12. Mapa de normativa para la construcción de edificaciones en los márgenes de los ríos y taludes

Se desarrolla la Figura 13. Que relaciona un evento de intensidad IX y los efectos locales del suelo. Se destaca que gran parte de estas edificaciones no cuentan con un plan de mitigación para dar respuesta a los eventos sísmicos planeados.

La clasificación muy Alta dada en la Figura 13, corresponde a toda la zona Sur del talud, en la misma, se han tomado en cuenta los efectos locales del suelo y pendiente que superan los 35°.

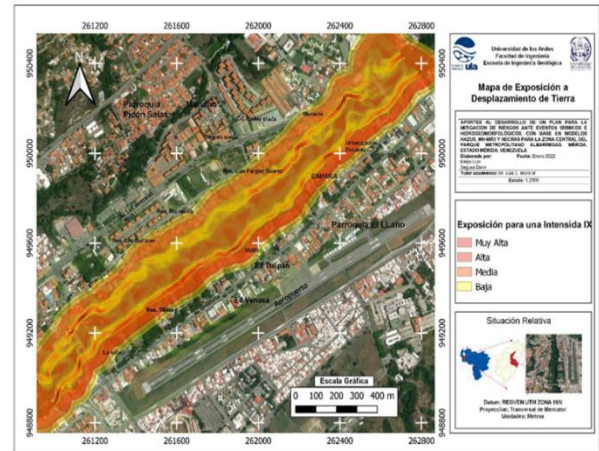


Fig. 13. Mapa de exposición a desplazamiento de tierra.

Evaluación del riesgo geológico en edificaciones, debido a peligros sísmicos.

Los Desplazamientos Permanentes de Suelo producidos por fenómenos como los deslizamientos de tierra, pueden generar daños considerables al entorno edificado y consecuentemente distribuir pérdidas de diferente naturaleza (humana, económica y social).

La altura de los taludes en el área de estudio varía entre los 15 a 30 metros de altura con respecto a la horizontal.

En la Figura 14. se identifican las zonas que no cumplen con un margen de retiro, otro factor importante evaluado fue el de los periodos fundamentales del suelo y los periodos predominantes en algunas edificaciones no mayores a 4 plantas correspondiente al área analizada.

Se estima que los periodos fundamentales de vibración del suelo para la terraza de Mérida, varían en un rango de 0,09 y 1 segundo, en el área de estudio, los valores se encuentran entre 0,2 y 0,3 y en cuanto a los periodos de las edificaciones (edificio Tulipán y Venusa) son 0,177 y 0,208.

Cabe destacar que, las edificaciones tienen un período natural, que es la cantidad de segundos que le toma al edificio vibrar naturalmente de un lado a otro, si el período de movimiento del terreno coincide con el periodo natural de un edificio, entonces tendrá las mayores oscilaciones

posibles y sufrirá el mayor daño.

Con base en lo expuesto anteriormente y tomando en cuenta los efectos locales del suelo (amplificación), desplazamiento de tierra y que los periodos del suelo comparados con aquellos de las edificaciones sean coincidentes, el riesgo de daño sísmico en las edificaciones evaluadas es muy alto, por ende pudieran sufrir daños considerables.

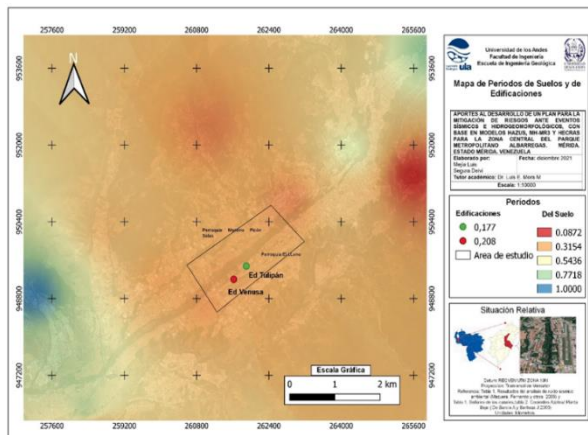


Fig. 14. Mapa de periodos de suelos y de edificaciones.

Es importante resaltar, que muchas de las edificaciones en Mérida no cumplen con la Norma Venezolana COVENIN 1756:2001 Edificaciones Sismorresistentes.

Modelización Hidráulica, mediante el programa HEC – RAS 5.0.3.

Se realiza la modelización hidráulica con el software HEC-RAS para el análisis de sitios susceptible a crecidas e inundaciones.

Análisis de sitios susceptibles

Las simulaciones hidrológicas e hidráulicas fueron realizadas para un tramo del cauce principal del río Albarregas, los mapas de Manchas de Desborde en el municipio del Libertador, ubicado entre las parroquias El Llano y Mariano Picón Salas del estado Mérida, fueron generados utilizando el software QGIS 3.16.7 y por medio del complemento RiverGIS, con base en los resultados de la modelación hidrodinámica de las crecientes simuladas a través del modelo HEC-RAS 5.0.3 para los diferentes periodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años, comprendida entre el viaducto Miranda al viaducto Sucre.

La zona de estudio presenta taludes con alturas entre 10-30 m. aproximadamente, pendientes inclinadas en su mayoría por debajo de 35 grados y en algunas partes superan los 45 grados, como puede observarse en las Figuras 15 a la 19. correspondientes a los mapas de mancha de desborde para

cada periodo de retorno simulado

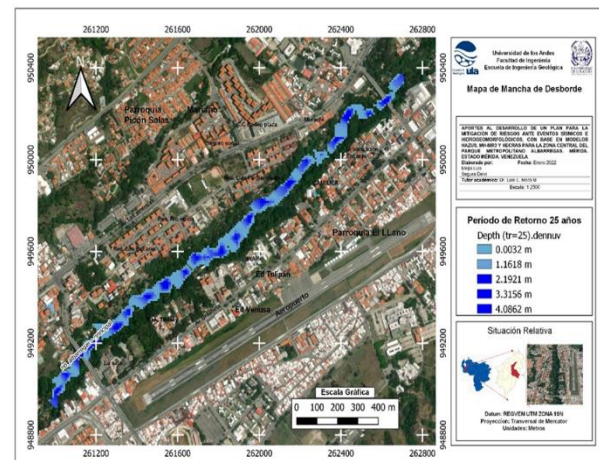


Fig. 15. Mancha de desborde, Tr = 25 años y Q= 519,3 m³/s.

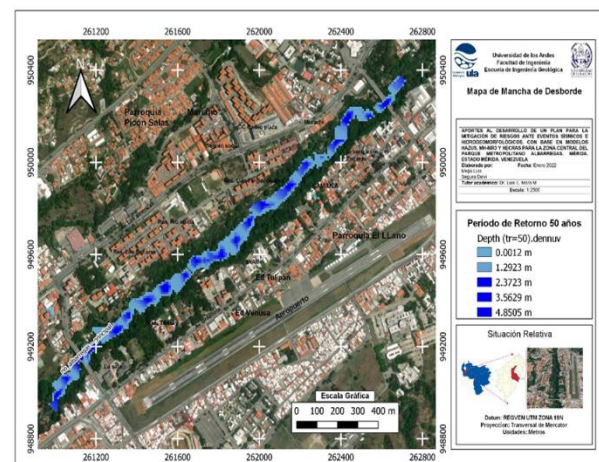


Fig. 16. Mancha de desborde, Tr = 50 años y Q=600,6 m³/s.

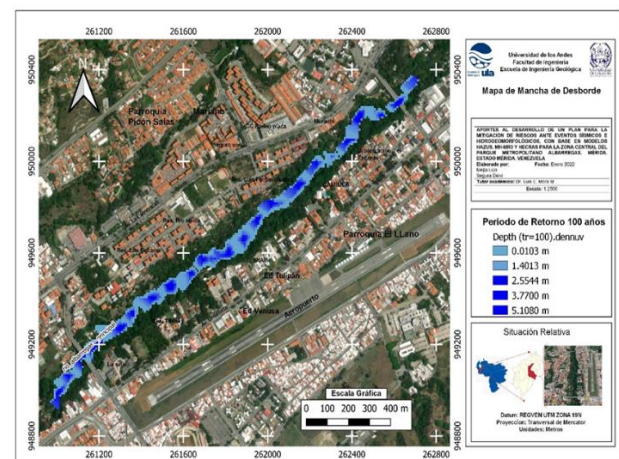
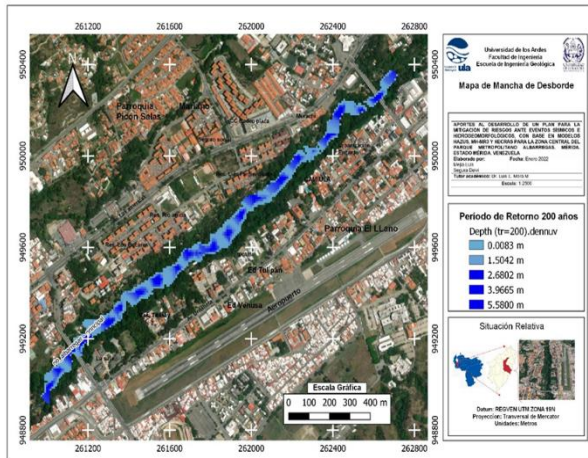


Fig. 17. Mancha de desborde, Tr = 100 años y Q=688,4 m³/s



s. Fig. 18. Mancha de desborde, $T_r = 200$ años y $Q = 765,7$ m³/s

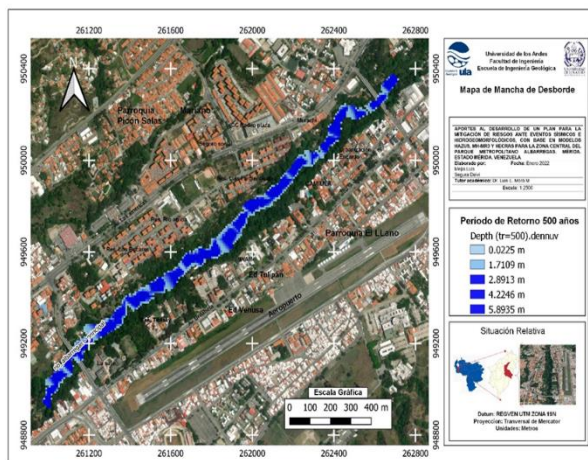


Fig. 19. Mancha de desborde, $T_r = 500$ años y $Q = 873,3$ m³/s.

De acuerdo a los resultados de la simulación, dichas zonas no se verán comprometidos ante eventos de desborde ya que los taludes presentan grandes alturas. Sin embargo, se debe considerar el aporte de sedimentos y la socavación del talud, lo cual pudiese maximizar las zonas afectadas, de los resultados estudiados, se desprende que el río Albarregas presenta alta propensión a crecidas, esto quiere decir, que al momento de presentarse una precipitación excepcional se incrementaría el flujo de agua.

Zonificación de amenaza por desborde y socavación del talud

Se procedió a implementar la metodología para zonificación de amenaza, que permitió establecer niveles de amenaza bajo, medio y alto, con sus respectivos colores: amarillo, naranja y rojo, el nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia) considerando la magnitud, que viene dada por la profundidad y la velocidad Figura 20.

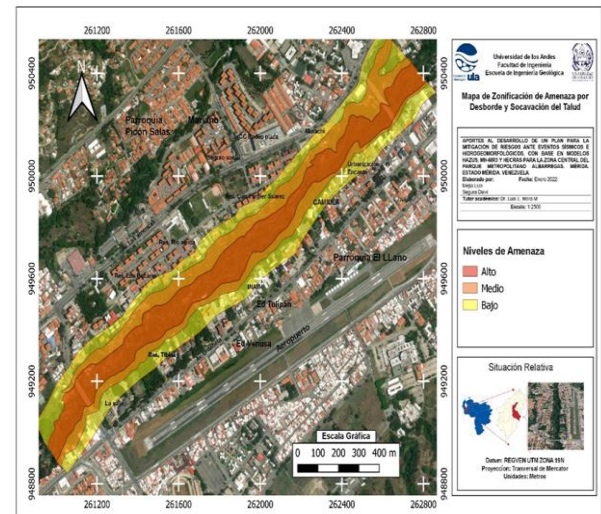


Fig. 20. Mapa de Zonificación de amenaza por desborde y socavación del talud.

El escenario realizado para este tipo de amenaza, (Figura 20) contempla el periodo de retorno máximo que es el de 500 años, a lo largo del cauce principal del río Albarregas, se refleja como los taludes especialmente el talud derecho (aguas abajo) ha sido gravemente expuestos, cabe destacar que en nuestra área de estudio no se han tomado medidas estructurales como muros longitudinales; a esto se suma los acelerados procesos de desarrollo y expansión urbana que se han llevado a que allí se siga construyendo y que se busquen otras áreas que se ubican dentro de la planicie de desborde del río.

4. Conclusiones y Recomendaciones

La Metodología para pérdidas por deslizamiento de terrenos por incidencia sísmica HAZUS, MH-MR3 y la simulación que modeliza la hidráulica de flujo de aguas de ríos naturales y de otros canales HEC-RAS, se aplicaron en la ciudad de Mérida-Venezuela, específicamente entre los viaductos Miranda y Sucre del municipio Libertador obteniéndose resultados altamente significativos.

Las metodologías propuestas, permiten evaluar los riesgos sísmicos e hidrogeomorfológicos con el fin de generar aportes para un plan de mitigación de riesgos.

- ✓ A pesar de que la metodología HAZUS MH-MR3 fue diseñada para las condiciones de amenaza sísmica en los Estados Unidos, se pudo adaptar y aplicar dicha metodología para ser utilizada en el parque metropolitano Albarregas.
- ✓ A partir del trabajo de campo se logró visualizar y recabar información sobre los asentamientos poblacionales establecidos en los márgenes del río, que presentan un alto grado de exposición si ocurriera un movimiento de

masa.

Se creó el mapa de normativa para la construcción de edificaciones en los márgenes de los ríos y taludes, porque durante el recorrido a lo largo del área de estudio.

Se denota claramente que la mayoría de las edificaciones presentes no cumplen con normativas sismo-resistentes consideradas al momento de ocurrir un sismo, allí se aprecian las edificaciones que están asentadas dentro de los límites no aptos para su construcción más útil permitiendo evaluar su vulnerabilidad a eventos sísmicos

- ✓ El análisis de riesgo sísmico probabilístico permite evaluar dos eventos de escenario con intensidades de $I = VI$ y $I = IX$ y magnitudes de $M_s = 5.1$ y $M_s = 6.8$ respectivamente, al ser aplicados a las ecuaciones para conocer el desplazamiento de terrero (DTP) se obtiene que para el escenario $I = VI$ el valor de DTP es de 0,2402 cm mientras que para el $I = IX$ el cálculo DTP es de 1,1899 cm.

Con los resultados anteriores se logra generar los mapas de desplazamiento de tierra permanente para ambos escenarios apreciándose los sectores y las áreas más propensas a sufrir daños por deslizamientos y en consecuencia generar pérdidas de distinta naturaleza.

- ✓ Observando las zonas donde se presenta mayor porcentaje de daño en edificaciones para la ocurrencia de un sismo de intensidad de $I = VI$ y $I = IX$ en la escala de Mercalli, por medio de los mapas Figura 9. y Figura 14, se puede deducir, que la zona Sur correspondiente a la parroquia el Llano, presenta un incremento de media unidad de intensidad, respecto al lado Norte perteneciente a la parroquia Mariano Picón Salas, este incremento se manifiesta por los efectos locales del suelo antes mencionados.

Al comparar lo dicho anteriormente con los períodos del suelo y el periodo natural de la estructura, se deduce que el grado de daño en estructuras por riesgo sísmico es mayor hacia el lado Sur que en el lado Norte del río en ese sector.

- ✓ Históricamente la cuenca del río Albarregas ha sido propensa a sufrir crecidas y desbordes, esto como consecuencia de las altas precipitaciones, para el tramo de la zona de estudio comprendido entre los viaductos Miranda y Sucre la amenaza por desborde se limita por las grandes alturas que presentan los taludes, debido a que los cambios se producen en profundidad y magnitud, sin embargo, la socavación que experimentan los mismos

puede convertirse en el principal inconveniente, desencadenando gran cantidad de problemas a los habitantes que residen en las adyacencias del río.

- ✓ La utilización del software QGIS 3.16.7 fue de gran utilidad, además posee un gran desarrollo de complementos realizado por diferentes universidades e institutos de investigación, en esta ocasión se utilizó RiverGIS, el cual permitió la modelación hidrodinámica de las crecientes simuladas a través del modelo HEC-RAS 5.0.3 para los diferentes períodos de retorno de 25, 50, 100, 200 y 500 años.

- ✓ La utilización de estudios hidrológicos previos referentes a la generación de caudales máximos, fue de gran utilidad para la determinación de tirantes máximos en eventos de crecidas.

Así pues, se obtiene para un $Q_{25} = 519,3$ m³/s la $P = 4.0862$ m, $Q_{50} = 600,6$ m³/s la $P = 4.8505$ m, $Q_{100} = 688,4$ m³/s la $P = 5.1080$ m, $Q_{200} = 765,7$ m³/s la $P = 5.5800$ m y $Q_{500} = 873,3$ m³/s la $P = 5.8935$ m.

- ✓ Tomando en cuenta los resultados antes señalados, se realizó la zonificación de amenaza por desborde y socavación del talud en niveles de bajo, medio y alto, para los sitios de interés, en función de la frecuencia del evento y la magnitud de la crecida.

- ✓ Los análisis anteriores permiten aportar nuevos elementos al desarrollo de un plan para la mitigación de riesgos ante eventos sísmicos e hidrogeomorfológicos en la zona de estudio.

En cuanto a las recomendaciones: í

- ✓ Es importante que el Municipio Libertador y las diferentes instituciones relacionadas a la gestión de desastres, utilicen este proyecto de investigación para dar solución a las tres etapas de gestión del riesgo, las cuales son: el conocimiento, la reducción y el manejo, con el fin que puedan tomar decisiones frente a los planes de prevención, mitigación y atención, frente a desborde de los ríos y eventos sísmicos.
- ✓ Es conveniente sistematizar y extraer información útil en los diversos sectores ubicados a orillas del río Albarregas, con base en las distintas investigaciones que se han realizado, para el análisis de crecidas; de manera que esta sea compilada y esté disponible para que la población en general tenga conocimiento y pueda utilizarla en la toma de decisiones.

- ✓ Hacer una revisión minuciosa en materia de cumplimiento urbanos, retiros, construcción y otros aspectos referidos a la ocupación del territorio y la edificación en los espacios de estudio.
- ✓ Realizar estudios que consideren el Cambio Climático (CC) y la influencia que puede tener el aumento o disminución de los caudales en la zona de investigación.
- ✓ Por último, se recomienda a las autoridades, que en las zonas más críticas, las cuales han sido detectadas en este estudio, se implementen intervenciones estructurales de defensa, como muros y/o canalizaciones para evitar el socavamiento del río a los taludes.
En igual orden de ideas, se recomienda realizar estudios geotécnicos que logren caracterizar las propiedades mecánicas presentes en el área, todo esto con la finalidad de determinar los métodos para la estabilización de las zonas más propensas a deslizamientos y derrumbes, así como también medidas no estructurales, tales como un adecuado ordenamiento territorial o una reubicación de la población expuesta al riesgo por inundación y por sismo.
- ✓ De forma general se recomienda profundizar más en la línea de investigación o inclusive crear nuevos proyectos en los cuales se desarrolle cada aspecto importante inmerso en el trabajo como refuerzos sismorresistentes, planes para estabilizar zonas bajo amenaza, aplicación de las metodologías para otras áreas de la ciudad o inclusive fuera de ella.

5 Referencias

- Ackerman, C. (2009). HEC-GeoRAS. Manual de Usuario. Version 4.2. US Army Corps of Engineers. 246. p.3.
- Aguirre, P. (1980). Hidráulica de canales. CIDIAT-ULA: Mérida-Venezuela
- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Editorial Episteme, 6ta edición. Caracas Venezuela.
- Arteaga, M. (2017). Evaluación del modelo Hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas en la cuenca baja del río Cañar. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
- Ayala, R. (2016). La gestión urbana y la ocupación del territorio: Comprensión de las implicaciones que tiene para el desarrollo del país los riesgos ambientales de las ciudades. Instituto de Geografía y CRN. Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- Blaikie, P. (1996). Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres. Red de estudios sociales en Prevención de desastres en América Latina. Ciudad de Panamá. Panamá.
- Bendito A. (2000). Análisis de sismicidad y curvas de isoaceleración para estados de desempeño estructural en el occidente venezolano. Tesis de Maestría, Postgrado de Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes-Mérida.
- Camarasa, A. (2002). Crecidas e Inundaciones. Riesgos naturales. Barcelona: Ariel.
- Camargo, M. y Guerrero, O. (1997). Repercusiones ambientales significativas en la ciudad de Mérida. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Cardona, O. (2003). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo en "Los riesgos no son naturales". Colecciones de la Red latinoamericana de Desastres: Bogotá.
- Castillo, A., y Pérez, A. (2017). Escenarios de riesgo sísmico para edificaciones y líneas vitales y su impacto en espacios públicos de la ciudad de Mérida, Venezuela. Mérida: CIDIAT- Universidad de Los Andes.
- Castillo, A. (2005). *Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Cerrada, M., Klarica, S., Choy, J., Guada, C., Aranguren, R., Laffaille, J., Mazuera, F., Reinoza, C., Schmitz, M., Rocabado, V., Morales, C., y Yegres, L. (2015). Determinación de microzonas sísmicas preliminares del área metropolitana de Mérida. Boletín de Geología, 37 (1): 67-74.
- Chacón, G. y Uzcátegui, A. (2004) Caracterización Geomorfológica de la Terraza de Mérida y sus Alrededores, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología. Mérida-Venezuela.
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. Bogotá: McGraw Hill
- Córdova, J. y López, J. (2015). Eventos extremos: inundaciones, deslaves y sequías. Agua en Venezuela: una riqueza escasa. Caracas: Fundación Empresas Polar.
- Dara, L. (2011). La debilidad de la gestión del riesgo en los centros urbanos. Revista de Geografía Norte Grande, 47, 5-26.
- Dávila, M. y Requena, M. (2004). Zonificación de la amenaza hidrológica en un cono de deyección usando modelos de Simulación Hidrológica e Hidráulica. Aplicación a la quebrada La Pedregosa, sector La Pedregosa, estado Mérida. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes. Mérida.
- Delgadillo, A. (2014). Evaluación de las amenazas por crecidas del río Mocotíes en Tovar y Santa Cruz de Mora, con especial énfasis en el evento hidrometeorológico de febrero de 2005. Revista Forestal Venezolana. 58, 97-104. Tomado de: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/43524>.
- Duran, M. y Silva, G. (2017). Análisis de los controles

- geomorfológicos en la microcuenca del río Aracay, para generar una zonificación preliminar de amenaza hidrogeomorfológica, municipio Cardenal Quintero, estado Mérida, Venezuela. Trabajo Final de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida.
- Escobar A, Rengifo M. (2003). Los sismos de Aricagua 1956 y 1959. *Geogr. Venez*, 44, 77- 96.
- Fema. (2017). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS@MH MR4 Technical Manual*. Tomado de National Institute of Building Sciences: <https://www.fema.gov/es/flood-maps/productstools/hazus>
- Ferrer, C. (1991). Geomorfología de una secuencia de flujos de detritos en los Andes venezolanos. *Acta Científica Venezolana*. 42. Sup.1: p 110. (Resumen).
- Ferrer, C. Y Laffaille, J. (2005). Un estudio de amenazas múltiples en la cuenca media del río Chama (Andes centrales venezolanos): caso zanjón El Paraíso. *Revista Geográfica Venezolana*, Número especial 2005, 93-117.
- Garciacono E. (1997). Microsismicidad, tectónica y potencial sísmico en el sistema de fallas de Boconó, Caracas: Universidad Simón Bolívar.
- González De Vallejo, Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Grases, J. (1994). Amenazas Naturales, terremotos, maremotos y huracanes. Caracas: Academia de ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela y la cámara de Aseguradores de Venezuela.
- Laffaille J. (1996). Escenario sísmico de la ciudad de Mérida. [Tesis de Maestría, Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Universidad de Los Andes., Mérida Venezuela].
- La Marca, E. (1997). Origen y evolución geológica de la Cordillera de Mérida. Cuadernos de la Escuela de Geografía. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Linsley, R., Kohler, M. y Paulhus, J. (1997). *Hidrología para ingenieros*. New York: Mc Graw - Hill.
- Moreno, C. (2015). Bases de datos relacionados con la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, líneas vitales e instalaciones críticas, que se encuentran cercanas o dentro de la poligonal del Parque Metropolitano Albarregas, ante la amenaza potencial de desastre sísmico. Mérida: ULA - CIDIAT.
- Ministerio de Obras Públicas. (1976). *Microzonificación sísmica de la Meseta de Mérida*. Tomos I Y II. Caracas.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). (1976). *Microzonificación sísmica de la meseta de Mérida*. Publicaciones Técnicas, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Desarrollo Urbanístico. Caracas: Secretaría Técnica.
- Oliveros, O. (1997). Estudio geotectónico de la ciudad de Mérida y sus alrededores. Congreso Geológico Venezolano V, ministerio de Energía y minas,- Sociedad Venezolana de Geólogos TIV . P. 1779-1798.
- PAMALBA CIDIAT, ULA. (2008). Parque Metropolitano Albarregas. Obtenido de <http://www.parquealbarregas.ula.ve>
- Pérez O. J., Jaimes M. A. and Garciacaro E. (1997). “*Micro-seismicity evidence for the subduction of the Caribbean plate beneath the South American plate in northwestern. Venezuela*”. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No B8, Pp. 17,875-17,882, August 10, 1997.
- Quiñones, E. y Dal Pozzo, F. 2012. Visualización de zonas de desborde usando HEC-GeoRAS. Microcuenca del río La Pedregosa, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 53(1) 2012, 77-91.
- Reinoza C, Klarica S y Sánchez J, 2006, Modelado geofísico del basamento del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Estado Mérida, Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes.
- Rengifo M. (1982). Sismicidad en los alrededores de Mérida, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Rojas, Y. (2017). Simulación de crecidas del río Albarregas empleando el modelo HEC – HMS, Mérida – Venezuela. Mérida-Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Silva, G., Abarca, O. y Picón, G. 1991. Análisis de la problemática de las crecidas en el área metropolitana de Mérida. Ministerio del Ambiente. Mérida – Venezuela. 34 p.
- Varnes, D (1984). Zonificación del peligro de desplazamientos de tierra: una revisión de los principios y la práctica. *Revista de Serie de peligros naturales*. Int. Assoc. Eng. Geol., Unesco. N.º .3, p.10. Paris.
- Villet, J. 2012. Viviendas afectadas y estado de alerta generó crecida del Albarregas. *Diario Frontera*. (febrero 24; p.6).
- Vivas, L. (1992). *El Cuaternario*. Universidad de los Andes, Consejo de Publicaciones, Mérida- Venezuela
- Wilches-Chaux, G. (1993). Anotaciones sueltas para la Filosofía de los Desastres Conferencia presentada en el Primer Seminario sobre el Manejo Participativo de Calamidades Publicas, Fundación Participar. Bogotá-Colombia.
- Zamora, R. (2002). Glosario de términos relacionados con riesgos y desastres. En: Ayala-Carcedo, F. y Olcina, J. (eds.). *Riesgos naturales*. Barcelona: Ediciones Ariel Ciencia.

Recibido: 01 de diciembre de 2023

Aceptado: 20 de marzo de 2024

Mejía, Luis: Ingeniero Geólogo, Universidad de los Andes..

 <https://orcid.org/0009-0003-8569-4215>

Segura, Deivi: Ingeniero Geólogo, Universidad de los Andes. Correo electrónico: danielparedes2596@gmail.com.

 <https://orcid.org/0009-0003-3952-6421>

Mora, Luis: Dr Ciencias Aplicadas ULA. MSc. Recursos Hidráulicos ULA-UCLA. Especialista en Gestion des Eaux ENTPE-France. Profesor Titular en CIDIAT-ULA. Coordinador del Postgrado en Gestión ARTA. Coordinador de Enseñanza CIDIAT-ULA. Correo electrónico: luis-mora.aps@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3499-4520>

Pérez, Alberto: Geógrafo egresado de la Universidad de los Andes, Magister en desarrollo Regional y Rural (1993) ULA. Especialista en Ordenamiento Territorial ULA. Profesor titular en CIDIAT-ULA.

Correo electrónico: lagumila@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0009-9218-2000>

Elaboración del mapa de riesgo geotécnico a movimientos en masa en taludes de suelo en el Sector Mucuchíes – El Vergel, Municipio Rangel del Estado Mérida

Elaboration of the geotechnical risk map for mass movements on soil slopes in the Mucuchíes - El Vergel Sector, Rangel Municipality of Mérida State

González, Balmari^{1*}; Iglesias, Marya¹; Rivas, Daniel²

¹Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica,

²Departamento de Geomecánica, Universidad de Los Andes,
Mérida, Mérida, Venezuela.

*balmarig@gmail.com

Resumen

La zona de estudio se ubica en el municipio Rangel del estado Mérida, en donde se evalúan diez taludes de suelo que bordean la Troncal 007 entre Mucuchíes y El Vergel. El estudio tiene como objeto elaborar el mapa de riesgo geotécnico a la ocurrencia de movimientos en masa en taludes de suelo, determinando la estabilidad en base a la geometría de los taludes y propiedades geomecánicas de sus materiales. Estas propiedades se obtienen a través de ensayos de laboratorio realizados a muestras de suelo. Se obtiene el peso unitario (con valores entre 17,68 kN/m³ y 22,68 kN/m³), la cohesión (variando entre 11,99 kN/m² y 39,89 kN/m²), y el ángulo de fricción interna (entre 10° y 42°). Se determinó que estos suelos se componen granulométricamente de arenas con contenido de arcillas, y corresponden con suelos secos, ligeramente plásticos, cohesivos-friccionantes. Los factores de seguridad correspondientes se obtuvieron a partir de simular estas propiedades en el software Slide, siendo en condición estática seca el más estable el TMV-05 con un FS de 2,097 y el más inestable el TMV-09 con 0,393. El grado de riesgo presente en el área se evalúa a través de la metodología propuesta por Suarez (2012), que consiste en analizar los parámetros indicativos de amenaza y vulnerabilidad; estos datos se exportan a un SIG para interpolar la información y elaborar los mapas de cada caso, que se solapan para generar el mapa de riesgo geotécnico. De los resultados obtenidos, la zona presenta un riesgo “bajo” en el 44% del área, distribuido en su mayoría sobre el poblado de Mucuchíes, un 38% de riesgo “moderado” localizado en la Troncal 007 a las afueras de Mucuchíes, y solo un 3% de riesgo “alto”, ubicado en las adyacencias del talud TMV-09.

Palabras claves: Movimientos en masa, factor de seguridad, amenaza, vulnerabilidad, riesgo

Abstract

The study area is in the Rangel municipality of Mérida state, where ten soil slopes bordering Troncal 007 between Mucuchíes and El Vergel are evaluated. The study aims to generate the geotechnical risk map for the occurrence of mass movements in soil slopes, determining the stability based on the slopes' geometry and their materials' geomechanical properties. These properties are obtained through laboratory tests carried out on soil samples. The unit weight (with values between 17.68 kN/m³ and 22.68 kN/m³), the cohesion (varying between 11.99 kN/m² and 39.89 kN/m²), and the angle of internal friction (between 10° and 42°) are calculated. It was determined that these soils are granulometrically composed of sand with clay content and correspond to dry, slightly plastic, cohesive-frictional soils. The corresponding safety factors are obtained from simulating these properties in the Slide software, being in the dry, static condition, the most stable TMV-05 with an SF of 2.097 and the most unstable TMV-09 with 0.393. The degree of risk present in the area was evaluated through the methodology proposed by Suarez (2012), which consists of analyzing the indicative parameters of hazard and vulnerability; These data are exported to a GIS to interpolate the information and prepare the maps for each case, which are overlapped to generate the geotechnical risk map. From the results obtained, the area presents a "low" risk in 44% of the area, distributed mainly over the town of Mucuchíes, 38% of "moderate" risk located on the 007 trunk road on the outskirts of Mucuchíes, and only 3% of "high" risk, located in the vicinity of the TMV-09 slope.

Keywords: Landslide, security factor, hazard, vulnerability, risk

1 Introducción

La superficie de la tierra nunca es perfectamente plana, sino que está conformada por diferentes tipos de laderas (Tarbuck y Lutgens, 1999). Estas laderas son afectadas por procesos geodinámicos de distinta índole, que pueden provocar deslizamientos, los cuales producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, entre otros (Suarez, 2012).

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas (Suarez, 2012), tal es el caso del área de estudio, que por estar ubicada en Los Andes venezolanos, específicamente en una de las zonas parameras del estado Mérida, se caracteriza por ser una zona montañosa de pendientes abruptas, desarrollada en forma de ramales alineados correspondientes a prolongaciones de la Sierra de la Culata y de la Sierra Nevada, con el característico clima de páramo, donde las temperaturas oscilan entre un máximo de 16,8° C y un mínimo de 6° C (Corpoandes, 2007). También cabe destacar la influencia tectónica de la Falla de Boconó, cuya traza se curva 30° en el sentido de las agujas del reloj al oeste de la población de Mucuchíes, originando esfuerzos transtensivos que generan una cuenca en tracción (Alvarado, Cantos, Pérez, y Audemard, 2015).

Suarez (2012) indica que el volumen total de daños causados por estos procesos de deslizamientos es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan medidas de prevención o control. Con este objetivo se plantea el presente trabajo, mediante el cual se genera un mapa de riesgo geotécnico para el área urbana de Mucuchíes y sus alrededores, prestando especial atención a los taludes que bordean en esta zona la Troncal 007 o carretera Trasandina, vía de comunicación vital entre los estados Mérida, Barinas y Trujillo, a través del estudio de las propiedades geomecánicas de los materiales que forman dichos taludes, y la simulación de su comportamiento con la ayuda de software especializados como Slide

2 Descripción del área de estudio

El sector Mucuchíes - El Vergel, se encuentra ubicado en el occidente de Venezuela, hacia el Noreste del estado Mérida dentro del municipio Rangel (Fig. 1). Su principal y única vía de acceso es la Troncal 007 o carretera Trasandina.

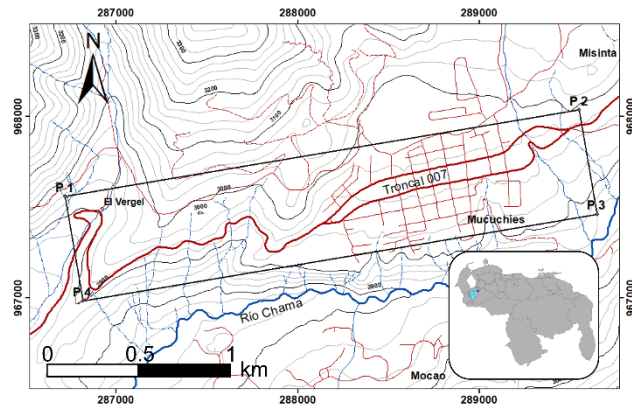


Fig. 1. Mapa topográfico con la ubicación del área de estudio.

Ticart (1966), describe a Mucuchíes como el sector del valle superior del río Chama, ubicando toda la zona debajo de unos 3000 m de altitud; dominado al noreste por la Sierra de la Culata, que alcanza poco más de 4300 m de altitud y al suroeste por la Sierra Nevada de Mérida.

Se caracteriza por ser una zona montañosa de pendientes abruptas con la presencia de terrazas, conos de deyección, colinas redondeadas y fondos de valles donde se desarrolla la mayor parte de la actividad económica y social de la zona.

Generalmente se presentan dos períodos climáticos, uno seco y frío de diciembre a marzo y otro lluvioso de abril a octubre. La temperatura oscila entre un máximo de 16,8° C y un mínimo de 6° C. Tipo de clima de Páramo (Corpoandes, 2007).

La hidrografía de la zona de estudio se encuentra principalmente dominada por la parte alta de la cuenca del río Chama y algunas quebradas como la quebrada El Molino, quebrada Curva del pan, quebrada La Parra y quebrada Misintá.

La litología presente en el área de estudio, tal como es plasmada en el “Mapa geológico de la Sierra Nevada, al sur de Mucuchíes” (Grauch, 1975), comprende principalmente un basamento de rocas metamórficas (gneiss y esquistos) correspondientes a la Asociación Sierra Nevada (Peis), sobre el que se han depositado terrazas (Qpt) y aluviones cuaternarios (Qal).

Estructuralmente, el área es controlada por la Falla de Boconó, la cual es el principal accidente geológico del occidente Venezuela. Se manifiesta con movimientos rumbo deslizantes dextrales con componente normal. En la zona entre las poblaciones de Tabay y La Toma, estado Mérida, se ha identificado que la falla se dispone de forma paralela y en algunos casos controla, al valle del río Chama (Alvarado y col., 2015).

En la Fig. 2 se muestra el mapa geológico de la zona como resultado de la integración del mapa geológico de Grauch (1975) y la interpretación visual de imágenes satelitales. La traza de la falla se asumió a través de evidencias de falla observadas en las imágenes y su correspondencia con la descripción de Alvarado y col. (2015).

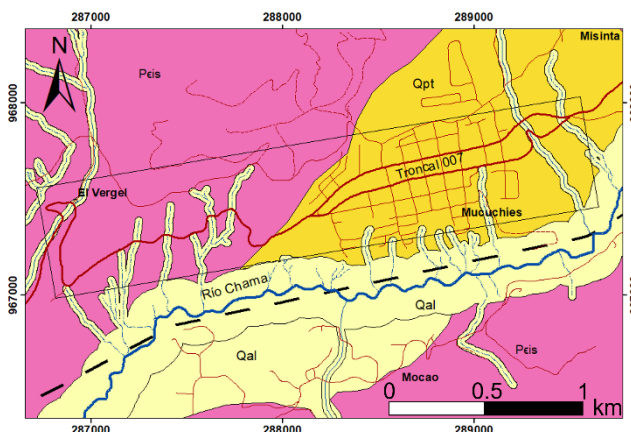


Fig. 2. Mapa geológico del área de estudio.

3 Marco Teórico

3.1 Suelos

Es la cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración (mecánica, química y biológica) de los minerales de las rocas preexistente. Los mismos pueden ser residuales (se encuentran en el sitio donde se formaron) o transportados.

3.2 Talud o ladera

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente (Suarez, 2012).

3.3 Movimiento en masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Suarez, 2012).

3.3 Factores condicionantes y desencadenantes

Son factores capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Los factores condicionantes (pasivos), son factores internos: naturaleza, estructura y forma del terreno, los factores desencadenantes (activos) se consideran factores externos que provocan o desencadenan los movimientos en masa (precipitaciones, sismos, erosión) estos determinan el grado y la magnitud del movimiento. (González de Vallejo, y col., 2002).

3.4 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Consisten en análisis que se basan en las propiedades geomecánicas de los materiales y la geometría de los taludes

para definir posibles superficies de rotura y grado de estabilidad. Existen dos métodos: equilibrio límite y numéricos

3.5 Método de equilibrio límite.

Este método supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla. El análisis se puede realizar directamente estudiando la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. (Suarez, 2012).

3.6 Factor de seguridad (FS).

Empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2012). Para establecer una condición asociada a la estabilidad a partir del factor de seguridad se emplea la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del factor de seguridad asociados a la estabilidad de laderas. Tomado de Rivas, Belandria, Bongiorno y Moreno (2015) citado en (Rivas, 2016)

ESTABILIDAD	FACTOR DE SEGURIDAD	CONDICIÓN CINEMÁTICA.
Muy Estable.	$>2,5$	Configuración cinemática inactiva.
Estable.	$1,5 < F.S. < 2,5$	Cinemática aparentemente inactiva.
Ligeramente Estable.	$1,2 < F.S. < 1,5$	Poca o nula densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.
Inestable	$1 < F.S. < 1,2$	Media densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.
Muy Inestable	$F.S. < 1$	Alta densidad e incidencia de procesos de remoción en masa, asociada a la cinemática de planos estructurales.

3.7 Amenaza

Amenaza natural es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor, en un área específica dentro de un determinado período de tiempo (Varnes, 1984, citado en Suarez, 2012).

Rivas, Belandria, Bongiorno y Moreno (2015) (Citado en Rivas, 2016) proponen una escala de clasificación de los diferentes factores de seguridad donde se tiene que si el FS arroja un resultado mayor a 2,5 indica que el talud es muy estable, entre 1,5 -2,5 taludes estables, entre 1,2 -2,5 ligeramente estables, de 1 a 1,2 inestable y finalmente los FS menores a 1 serán muy inestables.

3.8 Vulnerabilidad

Grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada. (González de Vallejo, y col., 2002). Suarez (2012) plantea tres tablas para la evaluación multicriterio de la vulnerabilidad, las cuales toman en cuenta la vulnerabilidad social, vulnerabilidad económica y vulnerabilidad física y en obras civiles. Los

resultados se estiman en grado de vulnerabilidad con un índice promedio de 0 hasta 1, en donde la vulnerabilidad muy baja con un índice 0, vulnerabilidad baja de 0,25, vulnerabilidad media de 0,5, vulnerabilidad alta de 0,75, y vulnerabilidad muy alta de 1.

3.9 Riesgo

El riesgo es una medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, la salud, la propiedad o el ambiente. Se mide en vidas humanas, propiedades en riesgo y daños ambientales. El riesgo generalmente es estimado como el producto de la probabilidad de la amenaza por las consecuencias para los elementos en riesgo. (Suarez, 2012). Se calcula usando la Ecuación 1. La estimación del grado de riesgo se realiza a partir de la tabla.

$$\text{RIESGO} = \text{AMENAZA} \times \text{VULNERABILIDAD}$$

Ecuación 1. Cálculo del riesgo.

4 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, se diseña el esquema metodológico mostrado en la Fig. 3, en el que se mencionan las etapas del trabajo y cada una de sus actividades. Se trabaja en tres etapas, Pre-Campo, Campo y Post Campo, las cuales se describen a continuación:

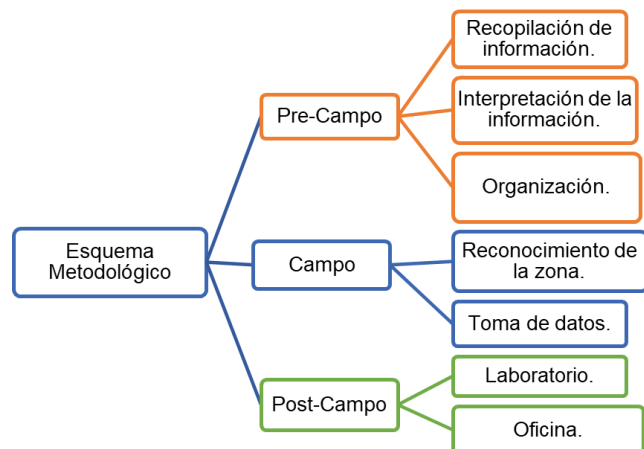


Fig. 3. Esquema metodológico del estudio.

4.1 Etapa de Pre – Campo.

Esta primera etapa consiste en la revisión y recopilación de la información disponible sobre el área de estudio y las metodologías a implementar, con el fin de reconocer la zona de manera general, sus vías de acceso y las precauciones a tomar, y así finalmente organizar la etapa de campo para

trabajar de manera más eficiente.

4.2 Etapa de Campo.

Se trata del conjunto de actividades que se realizan directamente en el área de estudio, de vital importancia para cumplir con los objetivos del proyecto, asegurando información de primera mano. se realiza reconocimiento del área de estudio, continuando con ubicación de los taludes de suelo a estudiar, seguido por la toma de datos: mediciones “*in situ*” de rasgos geométricos, geológicos y geotécnicos y toma de muestras de suelo para el estudio de las mismas en la etapa de post campo. Así como también la toma de datos para la evaluación de la vulnerabilidad, que son obtenidos mediante observaciones y entrevistas realizadas en esta etapa. Se valora la vulnerabilidad social, física en obras o vialidad y económica de exposición al elemento amenaza en cada talud.

4.3 Etapa de post campo.

Es la etapa final del proyecto, donde se procesa y analiza toda la información y los datos obtenidos de las etapas anteriores, cuyos resultados permiten cumplir con los objetivos previstos.

Durante esta etapa se realizan los ensayos de laboratorio donde se determinan las propiedades geomecánicas de las muestras de suelo entre los cuales se tienen: contenido de humedad ($w\%$), peso específico relativo (G_s) granulometría por tamizado para conocer el tipo de suelo presente ($G\%$; $S\%$; $F\%$; C_u y C_c), peso unitario (γ_m), límites e índices de consistencia ($LL\%$, $LP\%$, $IP\%$), y compresión simple (q_u ; α ; ϕ ; C y E).

Seguidamente de los resultados del laboratorio en conjunto con las medidas tomadas en campo de la geometría de los taludes, se procede a realizar la simulación de los mismos en el software Slide el cual hace uso del método de equilibrio límite y determina los FS por los métodos de Bishop simplificado, GLE, Fellenius y Janbu simplificado para la obtención de las posibles superficies de rotura y factores de seguridad en los diferentes estados: estáticos – dinámicos, seco, subsaturado y saturado. Una vez obtenidos estos valores se realiza un promedio en cada estado para la realización de gráficas y evaluación de la amenaza según los factores de seguridad.

A partir de las tablas de estimación de amenaza y vulnerabilidad propuestas por Suarez (2012) se obtienen valores que se interpolan en un SIG para la generación de los mapas temáticos de amenaza y vulnerabilidad los cuales se solapan utilizando la ecuación de riesgo (Ecuación 1) para la realización del mapa de riesgo geotécnico a movimientos en masa del área de estudio.

5 Resultados

5.1 Descripción de los taludes y sus propiedades geomecánicas

Dentro del área de estudio se reconocieron 12 taludes al borde de la Troncal 007. Dos de estos taludes están compuestos de roca por lo que no forman parte de los alcances del proyecto. Se nombraron los taludes utilizando el código TMV seguido de números del 01 al 10, según su orden de aparición en sentido Mucuchíes – El Vergel. La ubicación de cada uno se muestra en la Fig. 4.

Estos taludes resultaron ser de geometrías variadas, con alturas que van desde los 3,8 metros (para el talud TMV-05) hasta los casi 13 metros (para el talud TMV-01). Las paredes presentan una inclinación promedio de 67, 7°, variando entre los 45° (TMV-07 y TMV-10) hasta los 82° en el talud TMV-08.

En su mayoría, los taludes se encontraban en estado seco al momento del estudio. Del TMV-01 al TMV-05 presentan granulometría variada, típica de depósitos aluviales. Desde el talud TMV-06 en adelante, la composición de los taludes es de material homogéneo con granos angulares, evidenciando el rasgo residual del suelo, el cual es formado *in situ* por la meteorización de la roca preexistente.

Varios taludes se muestran intervenidos por actividades antrópicas, como sembradíos y terraceo por ganado. La vegetación presente varía de escasa presencia de herbáceos y cultivos, a boscosa y más densa en ciertos casos. Algunos de los taludes evidenciaban actividad de deslizamientos recientes y también se observaron procesos erosivos tipo cárcavas.

Dos de los taludes son atravesados por drenajes que afectan su estabilidad. Los mayores problemas se observan en los alrededores del talud TMV-09, evidenciado por una falla pasada en la carretera, donde parte de la misma sufrió desprendimiento debido a una rotura aparentemente circular del suelo subyacente. Este deslizamiento causó que fuese necesario recortar nuevamente la pared del talud para mover la carretera.

Con respecto a los elementos expuestos a un posible deslizamiento, se identificaron principalmente la carretera junto con los transeúntes y vehículos que constantemente transitan por la zona. También se identificaron sembradíos y algunas casas que podrían verse afectadas por la ocurrencia de un movimiento en masa dentro del área de estudio.

Para determinar las propiedades geomecánicas específicas de los suelos presentes se tomaron seis muestras directamente de los taludes, excluyendo aquellos que presentaban litología similar a otro en que ya se hubiese tomado la muestra. Estas muestras se codificaron como MS-01 a MS-06. A cada una de las muestras se le aplicaron los ensayos mencionados en la metodología, y los resultados obtenidos se resumen en Tabla 2.

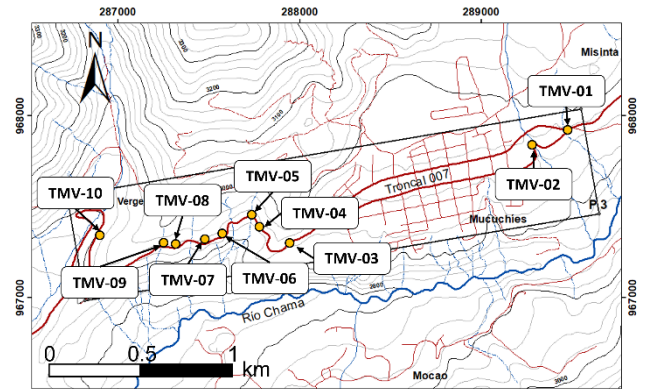


Fig. 4. Ubicación de los taludes estudiados.

Tabla 2. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Propiedad	MS-01	MS-02	MS-03	MS-04	MS-05	MS-06
w (%)	3,93	1,41	7,53	9,28	4,57	2,49
Gs	2,71	2,60	2,46	2,69	2,27	2,73
γ_m (kN/m ³)	22,68	21,15	20,00	20,17	22,66	17,68
%G	44,76	35,90	32,36	14,95	21,36	14,61
%S	48,55	55,44	57,95	75,58	68,85	76,90
%F	6,69	8,67	9,69	9,48	9,78	8,49
Cu	52,20	39,73	38,63	9,26	10,65	12,95
Cc	0,85	0,52	0,49	0,72	0,87	0,85
LL (%)	29,06	20,17	24,56	24,47	18,43	29,06
LP (%)	20,21	15,67	19,05	18,29	14,55	20,21
IP (%)	8,84	4,50	5,51	6,18	3,88	8,84
q_u (kg/cm ²)	0,87	0,87	1,15	1,25	0,49	0,77
α (°)	55	60	78	57	50	66
ϕ (°)	20	30	66	24	10	42
C (kg/cm ²)	0,31	0,25	0,12	0,41	0,20	0,17
E(kg/cm ²)	0,28	0,35	0,29	0,38	0,21	0,24

En general se destaca que las muestras representan suelos secos, en los que el contenido de humedad no supera el 10%. Contienen arenas en mayor porcentaje, son ligeramente plásticos y tienen un comportamiento cohesivo – friccional.

A partir de los porcentajes granulométricos y los límites de consistencia, se realizó la clasificación de cada suelo. Según la clasificación de S.U.C.S, la mayoría de las muestras se corresponde con suelos tipo SP-SC (arenas mal gradadas), a excepción de la muestra MS-06 que es SW-SC (Arenas bien gradadas). De igual manera, aplicando la clasificación de AASHTO, MS-01 se clasifica como A-1-a (0), mientras que el resto de muestras corresponden con A-1-b(0). AASHTO describe estos tipos de suelo como “Fragmentos de Piedra Grava y Arena” y los califica como material de fundación “excelente a bueno”.

5.2 Cálculo de los factores de seguridad

De la simulación en el software slide se obtuvieron como resultados factores de seguridad en estados estático-seco y dinámico-subsaturado los cuales se evaluaron en la tabla de estabilidad según factores de seguridad propuesta por Rivas, Blandria, Bongiorno y Moreno (2015) (citada en

Rivas, 2016) (Tabla 1), donde se determina la estabilidad de cada talud dependiendo del FS.

En el gráfico de la Fig. 5 se muestran los resultados en condiciones estáticas secas. Se observa que para los taludes TMV-02,04,05,07 y 08, dichos valores se encuentran entre el rango de 1,2 – 1,5, indicando taludes ligeramente estables. Los taludes TMV-03,06 y 10 presentan valores entre 1,5 – 2,5, mostrando taludes estables. Finalmente, los taludes TMV-01 y TMV-09, resultan en valores menores a 1, siendo taludes inestables, coincidiendo con los vestigios observados en campo de antiguos movimientos en masa de gran magnitud para el talud TMV-09.

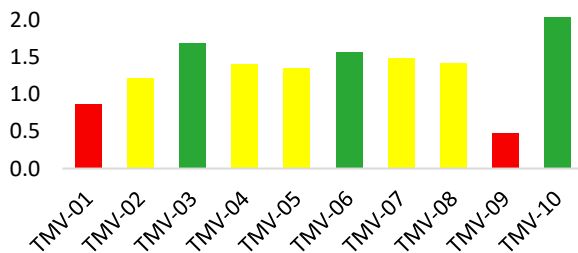


Fig. 5. Estabilidad de taludes a partir del FS en estado seco sin sismo.

En condiciones dinámicas subsaturadas, se observa en la Fig. 6 que todos los factores de seguridad arrojan valores menores a 1 indicando que estas condiciones son las más desfavorables resultando en que todos los taludes son inestables.

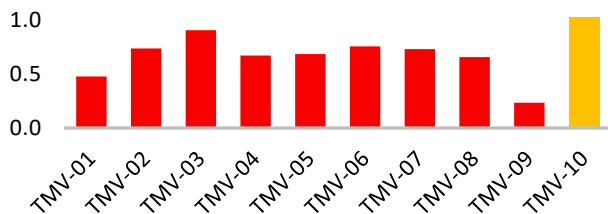


Fig. 6. Estabilidad de taludes a partir del FS en estado subsaturado con sismo.

5.3 Evaluación de la amenaza

La estimación del grado de amenaza se realizó a partir la tabla Factores topográficos, ambientales y geotécnicos de Suarez (2012). Los parámetros evaluados en dichas tablas son datos obtenidos en mediciones en campo. Es importante destacar que la investigación se basa en el estudio de taludes de suelo, por lo que observando que las tablas expuestas por Suarez (2012) toman en cuenta parámetros característicos que se evalúan en rocas, se hace necesario realizar la revaloración en el peso de cada parámetro. Esta se realiza dividiendo el porcentaje total de los parámetros característicos de rocas en partes iguales, que luego se distribuye en los demás parámetros.

Se obtuvo que los taludes TMV-01,05 y 09 presentan una amenaza muy alta con valores mayores a 10, debido a las condiciones observadas en los mismos. Tal es el caso en el talud TMV-09 donde se observó evidencia de un antiguo deslizamiento de gran magnitud. Los taludes TMV-02,04,07 y 08 presentan una amenaza alta indicada por el rango de valores (entre 8,5 – 10) que se obtuvo como resultado y los taludes TMV-03,06 y 10 presentan una amenaza moderada con valores entre 7,5 y 8 (Fig. 7).

Realizando una comparación con los resultados del grado de estabilidad de los taludes obtenido por los FS y la estimación del grado de amenaza se puede observar que aquellos que son inestables también arrojan como resultado un mayor grado de amenaza (TMV-01 y TMV-09). Indicando una concordancia en los resultados.

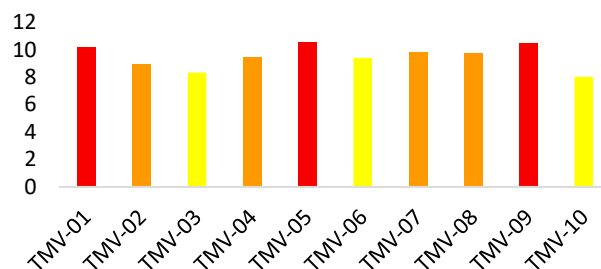


Fig. 7. Evaluación de la amenaza en cada talud.

5.4 Evaluación de la Vulnerabilidad

La evaluación de la vulnerabilidad se realiza para cada talud a partir de las tablas de vulnerabilidad social o humana, económica y física en obras y vialidad, tomadas de Suarez (2012). Estos resultados fueron clasificados con una vulnerabilidad alta para el talud TMV-09, vulnerabilidad moderada los taludes TMV-03 y 07, y vulnerabilidad baja para los taludes TMV-01,02,04,05,06,08 y 10 como se observa en la Fig. 8.

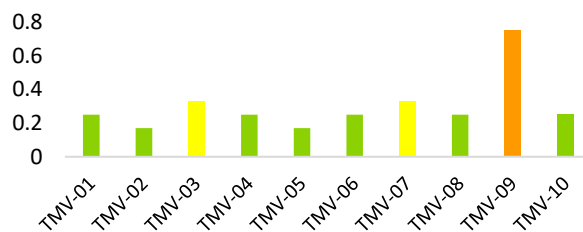


Fig. 8. Evaluación de la vulnerabilidad en cada talud

5.5 Mapa de amenaza

A partir de los valores mostrados en Fig. 7 se generó el mapa de amenaza, interpolando y extrapolando los datos en un SIG, en la Fig. 9 se observa el resultado, donde la amenaza varía de “muy baja” a “muy alta” en las adyacencias de la

Troncal 007.

Para el talud TMV-01 la amenaza es “muy alta” debido a los factores actuantes, tal como la actividad agrícola que se desarrolla sobre el tope del talud, incluyendo el riego que erosiona el suelo aumentando su inestabilidad. En el TMV-02 el grado de amenaza disminuye un poco, clasificándose como una amenaza “alta”; la más baja se tiene en el poblado de Mucuchíes, debido a que presenta pendientes leves, infiriendo que hay pocas posibilidades de que ocurra un deslizamiento que afecte negativamente la carretera Trasandina.

Seguidamente, en el talud TMV-03 el grado de amenaza aumenta, llegando a un grado “moderado”. En el talud TMV-04 se refleja una subida en el grado de amenaza, alcanzando el nivel “alto”, el cual continúa en ascenso en el talud TMV-05, en el que se presenta una amenaza “muy alta” debido a la influencia de una quebrada que afecta la estabilidad de este. Los taludes TMV-06, TMV-07 y TMV-08 cuentan con una amenaza “alta”, presentando características semejantes entre ellos, ya que se constituyen por el mismo tipo de suelo. Un caso particular es el talud TMV-09 donde aumenta el grado de amenaza, esto es debido a su FS y las evidencias de un deslizamiento que perjudicó gran parte de la carretera. Finalmente, el talud TMV-10 presenta un grado de amenaza “moderada”, disminuyendo debido a las características del mismo, el cual no es influenciado por ningún cuerpo de agua, la vegetación en la zona es arbórea generando mayor estabilidad y la inclinación es moderada.

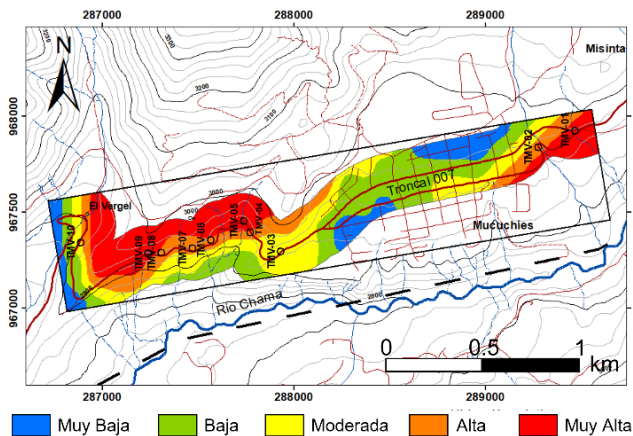


Fig. 9. Mapa de amenaza

5.6 Mapa de vulnerabilidad

De manera análoga, los valores de vulnerabilidad total (Fig. 8) se integraron en el SIG, generando así el mapa de vulnerabilidad mostrado en la Fig. 10, en donde se muestra que la misma varía de “baja” a “moderada” en las adyacencias de la Troncal 007, elevándose a “alta” en las cercanías del talud TMV-09 por sus antecedentes, como lo es un deslizamiento donde la vialidad se vio afectada severamente, debido a que gran parte de la carretera se deslizó. En ese momento, para reactivar la vialidad en esta zona, fue necesario excavar el talud, ampliando la carretera, lo cual tuvo una duración de al menos 3 meses según datos suministrados por

trabajadores de la alcaldía del municipio Rangel.

Cabe destacar que el pueblo de Mucuchíes se ve caracterizado con “vulnerabilidad baja”, a pesar de ser un centro poblado en el que más personas y obras se verían afectadas. Esto se debe a que este estudio está basado en la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa en las cercanías de la carretera Trasandina; y como dentro del pueblo no hay pendientes abruptas o taludes que puedan causar este tipo de eventos, se califica de esta forma.

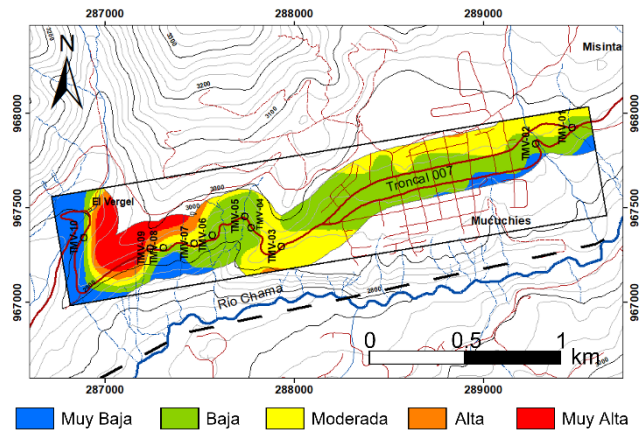


Fig. 10. Mapa de vulnerabilidad

5.7 Mapa de Riesgo

Al solapar los mapas de Amenaza y Vulnerabilidad en el SIG, usando la Ecuación 1, se genera el Mapa de Riesgo Geotécnico mostrado en la Fig. 11, donde se observa la variación del grado de riesgo a lo largo de la carretera transandina, en un rango de 150 metros a cada lado de esta entre el poblado de Mucuchíes y el sector El Vergel. Resalta que para la mayoría de los taludes el riesgo es de grado “moderado”, abarcando el 39% del área considerada, y solo para los taludes TMV-08 y TMV-09 el mismo aumenta al grado “alto”, ocupando apenas el 3% del territorio, debido a que por esta zona la vulnerabilidad es mucho mayor al resto del área, y se conjuga con la amenaza alta de estos taludes, generando mayores probabilidades de causar daños importantes a sus alrededores. Es por esto que la zona debe ser la prioridad a la hora de aplicar medidas correctivas. El grado de riesgo “muy alto” solo aparece en un área que no alcanza el 1% del total y es generado por la conjugación de las zonas de amenaza y vulnerabilidad “muy alta” en ambos casos. El grado de riesgo que más porcentaje ocupa dentro del área (44%) es de grado “bajo”, ubicándose principalmente sobre el pueblo de Mucuchíes, y se debe a que en esta zona no hay taludes que amenacen la integridad de las viviendas y la población presente.

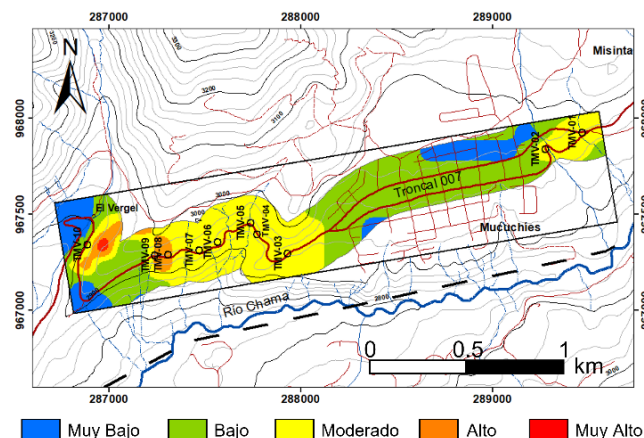


Fig. 11. Mapa de riesgo

6 Conclusiones

En la simulación de los taludes a través del software geotécnico Slide, Como resultado se obtuvo que para todos los taludes las condiciones más desfavorables se obtienen al agregar agua y sismicidad a la simulación, mientras que, al evaluarlos en estado seco y estático, los taludes en su mayoría son “ligeramente estables” tales como TMV-02 (FS promedio=1,226), TMV-04 (FS= 1,4055), TMV-05 (FS= 1,36), TMV-06 (FS= 1,4759), TMV-07 (FS= 1,4967) y TMV-08 (FS= 1,4277); los taludes “estables” son TMV-03 (FS= 1,6912) y TMV-10 (FS= 2,0447); mientras que TMV-01 (FS= 0,866) y TMV-09 (FS= 0,4745) son calificados como “muy inestables”.

Al evaluar la amenaza y plasmarla cartográficamente, se observa que esta varía de “muy baja” a “muy alta” en las adyacencias de la Troncal 007, siendo la más alta en los taludes TMV-01, TMV-05 y TMV-09, debido a sus características geomecánicas. De igual forma se evalúa la vulnerabilidad, obteniéndose que la zona más vulnerable es la cercana al talud TMV-09, por los daños observables de eventos antecedentes, que evidencian que las pérdidas ocasionadas por un deslizamiento en esta zona pueden ser importantes.

Del mapa de riesgo geotécnico se concluye que en un rango de aproximadamente 300 m alrededor de la carretera Trasandina el grado de riesgo es variado, siendo “moderado” (grado III) en el 39% del área, el cual se considera tolerable debido a que la sociedad estaría dispuesta a vivir con él; el riesgo “bajo” (grado II) abarca el 44% del territorio, el cual se considera aceptable y no preocupa a la sociedad, aumentando nuevamente al dirigirse en dirección El Vergel, llegando a riesgo “alto” (grado IV) en los taludes TMV-08 y TMV-09, que se considera un riesgo de fatalidad, por lo que debe ser mitigado con urgencia.

Referencias

- Alvarado, M., Cantos, G., Pérez, E., y Audemard, F. (2015). Cartografía neotectónica de la Falla de Bonconó entre Tabay y La Toma, Mérida - Venezuela. *Boletín de Geología*, 37 (2), 47-55.
- Corpoandes. (2007). Dossier Municipal 2007, Rangel, Mérida. Mérida.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: pearson educación.
- Grauch, R. (1975). Mapa Geológico de la Sierra Nevada, al sur de Mucuchíes.
- Rivas, D. (2016). Elaboración del mapa de riesgo geotectónico en el sector Vuelta de Lola - El Peñón, municipio Libertador del estado Mérida. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Suarez, J. (2012). Deslizamientos: Análisis Geotécnico (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: Univesidad Industrial Santander.
- Tarbuck, E.J. y Lutgens, F.K. (2005): Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física. 8ª ed. 710 pp. Pearson Prentice Hall.
- Tricart, J. (Enero - Diciembre de 1966). Geomorfología del área de Mucuchíes. *Revista Geográfica*, VII(16-17), 31-42.

Recibido: 05 de diciembre de 2023

Aceptado: 20 de marzo de 2024

González, Balmari: Ingeniero Geólogo con experiencia práctica en estudios de estabilidad de taludes. Ha trabajado recientemente en la realización de mapas de ubicación para la prospección minera en el estado Bolívar.

🌐 <https://orcid.org/0009-0001-4038-0963>

Iglesias, Marya: Ingeniero Geólogo con experiencia práctica en estudios de estabilidad de taludes. Ha trabajado recientemente en la implementación de metodologías para el mapeo de susceptibilidad a movimientos en masa a múltiples escalas. También es responsable del diseño de material didáctico en geoamenazas.

Correo electrónico: maryagrabrielaiz@gmail.com

🌐 <https://orcid.org/0009-0001-5049-0998>

Rivas, Daniel: Profesor en Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. Ingeniero Geólogo. Maestría de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos en Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

Correo electrónico: erivasdaniel@gmail.com;

danielrivas@ula.ve

🌐 <https://orcid.org/0000-0003-3899-1447>

Competencias tecnológicas en entornos virtuales de aprendizaje para docentes universitarios

Technological skills in virtual learning environments for university teachers

Becerra, Daniela^{1*}; Moros, Jose²

¹Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo “Mario Briceño Iragorry”,
Mérida, Venezuela.

²Universidad Nacional Experimental del Táchira
Táchira, Venezuela.

*sdrdani@gmail.com

Resumen

La educación virtual es considerada como una modalidad en el proceso de enseñanza – aprendizaje; por lo que se requiere de docentes con competencias tecnológicas con respecto al uso de entornos virtuales de aprendizaje (EVA). Para ello, los docentes demandan una adecuada formación tecnológica, de allí que, la presente investigación tiene como objetivo determinar las competencias tecnológicas de los docentes, tomando como población muestra, la de la Universidad Politécnica Territorial del estado Trujillo “Mario Briceño Iragorry” (UPTTMBI), en entornos virtuales de aprendizaje. El estudio se sustenta en el enfoque cuantitativo bajo el paradigma positivista, de carácter descriptivo, de campo, no experimental, transeccional, porque el cuestionario conformado por 27 preguntas en escala de frecuencia fue autoadministrado en un solo momento a un grupo de 64 docentes de dicha universidad. Concluyendo que aun cuando existen docentes que poseen competencias tecnológicas, pedagógicas, de gestión y comunicativas, es necesario fortalecer su preparación tecnológica en el manejo de los EVA, específicamente con el que dispone la universidad, como es la plataforma Moodle, con miras a lograr un personal docente altamente capacitado en el uso de estos espacios de aprendizaje y así mejorar la calidad de enseñanza que recibe la comunidad estudiantil.

Palabras clave: Competencias tecnológicas, entornos virtuales de aprendizaje, plataforma Moodle.

Abstract

Virtual education is considered as a modality in the teaching-learning process; Therefore, teachers with technological skills are required regarding the use of virtual learning environments (VLE). For this, teachers demand adequate technological training, hence the objective of this research is to determine the technological competencies of teachers, taking as a sample population, that of the Territorial Polytechnic University of the state of Trujillo “Mario Briceño Iragorry” (UPTTMBI), in virtual learning environments. The study is based on the quantitative approach under the positivist paradigm, descriptive, field, non-experimental, transectional, because the questionnaire made up of 27 questions on a frequency scale was self-administered at a single moment to a group of 64 teachers of said university. Concluding that even though there are teachers who have technological, pedagogical, management and communication skills, it is necessary to strengthen their technological preparation in the management of EVA, specifically with what the university has available, such as the Moodle platform, with a view to achieving a highly trained teaching staff in the use of these learning spaces and thus improve the quality of teaching received by the student community.

Keywords: Technological skills, virtual learning environments, Moodle platform.

1. Introducción

La evolución del hombre se ha visto influenciada por el avance de la ciencia y la tecnología, en función de la satisfacción de sus necesidades prioritarias, siendo una de ellas la educación. En este sentido, la incorporación de la tecnología al contexto educativo, consiste en dar continuación al proceso de enseñanza – aprendizaje, íntimamente ligado con el desarrollo de un país.

En efecto, así como el mundo está cambiando, también lo hace la educación, la cual sufre transformaciones a objeto de satisfacer la demanda de las nuevas generaciones. A esto no escapa la educación superior, que desde estos espacios debe promover la inclusión de la tecnología educativa en sus procesos y prácticas instructivas tanto dentro como fuera del aula, en lo presencial y en lo virtual. Esto implica que la formación docente, área estratégica de las universidades para mejorar la calidad de la educación, debe orientarse en el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) para desarrollar competencias docentes en distintas áreas, tales como: investigación, docencia, gestión académica y vinculación con la sociedad.

De lo comentado anteriormente, cabe mencionar que, los docentes universitarios deben aprovechar las bondades que las TIC han traído al campo de la educación; por tanto, necesitan poseer competencias tecnológicas con el propósito de incorporarlas dentro del proceso de enseñanza - aprendizaje, teniendo en cuenta que hoy día los estudiantes están en constante relación con diversos recursos tecnológicos. Esto es porque, muchos docentes ven a las TIC como un medio de apoyo para potenciar su labor pedagógico, otros las perciben como medio de intercambio de información e interacción bidireccional entre usuarios y dispositivos.

Sin embargo, conforme van implementando cursos en línea, donde las TIC forman parte de éstos, se dan cuenta de que son un medio de difusión del conocimiento, convirtiéndose en una herramienta valiosa para promover entornos de aprendizaje colaborativos, en el que el docente ya no es el centro del proceso sino el mediador y los estudiantes se convierten en el centro de atención, y en ello, paradójicamente, los docentes juegan un papel decisivo, en que los saberes impartidos a los estudiantes contribuyan a que éstos construyan su propio conocimiento.

Bajo esta premisa, adoptar un enfoque de enseñanza centrado en el estudiante significa prestar atención a las actitudes y prácticas que pueden aumentar o disminuir la distancia con los educandos en los entornos virtuales. En esta modalidad de educación, el docente debe actuar primero como persona y después como experto en contenido, promoviendo en el estudiante el crecimiento personal y enfatizando en el aprendizaje colaborativo y cooperativos, antes que en la transmisión de información.

Al respecto y como una contribución al uso de entornos virtuales de aprendizajes en el sector universitario, la indagación central de la investigación estuvo dirigida a

determinar las competencias tecnológicas de los docentes de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo “Mario Briceño Iragorry” (UPTTMBI) en entornos virtuales de aprendizaje; mientras que las intencionalidades específicas se orientaron a (a) diagnosticar las competencias tecnológicas que poseen los docentes e (b) Indagar los conocimientos que poseen los docentes en el uso de EVA. Esto puede generar un beneficio directo a todo el personal docente de la citada universidad, ya que, al desarrollar y potenciar las competencias tecnológicas se pueden alcanzar los objetivos institucionales y el desarrollo individual y colectivo, incidiendo de manera positiva en las actividades académicas.

2. Bases teóricas

Para afrontar los continuos cambios que se suscitan en la sociedad, los ciudadanos se ven obligados a adquirir nuevas competencias personales, sociales y profesionales (Ramírez, 2020). Esta situación no escapa a la profesión docente, quien desde su posición como formador de saberes debe incorporar nuevas metodologías de enseñanza y aprendizaje en concordancia con los nuevos retos de la sociedad actual, y esto implica, que el docente universitario actual necesita de competencias que le permitan incorporar las TIC en su quehacer pedagógico para favorecer los procesos que se realizan dentro y fuera del aula de clase, sea presencial o virtual.

Desde este punto de vista, el docente universitario debe impulsar la formación y preparación de los estudiantes al servicio de una sociedad más competitiva y desarrollada, por tal motivo, los procesos pedagógicos deberán estar ajustados a las innovaciones tecnológicas educativas, a pesar de la resistencia al cambio que manifiestan algunos docentes de pasar de lo tradicional a lo tecnológico. Para contrarrestar esta situación es importante que el personal docente esté lo suficientemente capacitado y actualizado en el uso y manejo de las TIC, lo cual conlleva a que deben contar con competencias tecnológicas para la integración de los recursos y herramientas tecnológicas al ámbito universitario.

En relación con las competencias tecnológicas, Quintana (2010) refiere que corresponden al dominio de los conocimientos, habilidades y actitudes que les permiten a los docentes usar de manera efectiva las TIC como apoyo a su formación profesional, así como al uso de recursos que facilitan el aprendizaje de los estudiantes. De acuerdo con el citado autor, el docente universitario al demostrar ser competente tecnológicamente podrá ser capaz de aplicar las TIC en la formación académica de los estudiantes, además, de seleccionar, utilizar y diseñar materiales didácticos apoyados en éstas.

De manera que, el docente universitario debe estar al día tecnológicamente hablando, para no crear una brecha digital en esta época de globalización, porque se percibe que las tecnologías están produciendo diferencias en las

oportunidades de desarrollo de las poblaciones y que se establecerá una distancia entre aquellas que tienen o no acceso a las mismas. Por tanto, frente a una sociedad globalizada centrada en las TIC, se deben esforzar por dotar a los docentes de competencias para usarlas y así reestructurar el sistema educativo para garantizar la igualdad. Al respecto, Fourez (citado por Azinian, 2009) señala que una persona formada tecnológicamente estará capacitada para aplicar la lógica de la negociación, en el marco más amplio de su capacidad de tomar decisiones para seleccionar las tecnologías apropiadas en función de las características de la situación que desea resolver.

Esta situación ha conducido a los docentes, a exigirse y a exigir el uso de las TIC como medio de soporte indispensable para su práctica docente, y posibilitar la mediación a través de un proceso de interacción virtual permanente sin importar las limitaciones espacio-tiempo, para que el estudiante logre el desarrollo de competencias cognitivas, actitudinales y procedimentales, que le permitan la interpretación, asimilación, apropiación y aplicación del conocimiento.

Ante lo expuesto, las universidades tienen la necesidad de perfilarse hacia la incorporación progresiva de una infraestructura tecnológica como plataforma efectiva que permita responder a las necesidades de formación, acceso y actualización de distintos campos del conocimiento humano, lo que conlleva a que las universidades deberían disponer de cursos en línea para satisfacer la demanda que existe hoy día de profesionales con competencias y habilidades para asumir los retos producto de la globalización.

Desde esta perspectiva, uno de los retos educativos más importantes del siglo XXI son los entornos virtuales de aprendizaje (EVA), los cuales son diseñados para el desarrollo de prácticas pedagógicas a distancia, y que progresivamente van arrebatando espacio y tiempo a las formas más convencionales de enseñar y aprender. Mediante los EVA se logra la incorporación de metodologías que priorizan el trabajo autodidacta de los estudiantes, así como las actividades colaborativas donde aprenden de otros, con otros y para otros, a través de comunidades de aprendizaje.

Esto es porque cada vez más instituciones, programas, profesores y estudiantes creen en este modelo de enseñanza - aprendizaje y, lo que es más importante, los resultados de las investigaciones sobre eficacia y eficiencia han demostrado calidad y, finalmente, se ha ido aceptando al similar con el proceso presencial, reafirmando que esta modalidad va conquistando cada día más terreno.

Galvis (2011) define el EVA como el ambiente, la organización del espacio, la disposición y la distribución de los recursos didácticos, el manejo del tiempo y las interacciones que se dan en el aula virtual, además, agrega, que es un entorno dinámico, con determinadas condiciones físicas y temporales, que posibilitan y favorecen el aprendizaje. En tal sentido, el EVA es un espacio educativo

alojado en la web, conformado por un conjunto de herramientas informáticas que posibilitan la interacción didáctica, y sirven de soporte para las actividades formativas de docentes y estudiantes.

Estos espacios de encuentros virtuales requieren que el docente universitario sea capaz de generar una relación didáctica interactiva entre él y sus estudiantes, en el cual integra una variedad de materiales y recursos diseñados para guiar, facilitar y mediar el aprendizaje. Esto conlleva a que él/ella disponga de competencias tecnológicas para propiciar una mayor fluidez de la puesta en práctica de los elementos básicos de la didáctica a través de herramientas tecnológicas, para construir de manera significativa, colaborativa y cooperativa el conocimiento en el estudiantado bajo la mediación del docente.

Esto supone que el docente no debe resistirse a los cambios que produce la incorporación de los EVA al contexto educativo porque en opinión Sanabria y Hernández (2011) mejoran la calidad de la enseñanza, o que tienen potenciales didácticos para mejorar el acceso a los contenidos y los procesos de comunicación, a través de las TIC aumentan la interacción docente-estudiante. Por tal motivo, se hace necesario que los docentes universitarios utilicen estrategias pedagógicas, soportadas en modernas aplicaciones tecnológicas para gestionar contenidos relacionados con las diferentes asignaturas, que faciliten el aprendizaje y la formación integral de los estudiantes universitarios, toda vez, que éstos son los futuros profesionales que dirigirán las diversas organizaciones.

2.1. Competencias tecnológicas

Dentro del conjunto de competencias tecnológicas a tener en cuenta, se describen 4 de las mencionadas por el Ministerio de Educación Nacional (MEN, 2013) de Colombia (Fig. 1), siendo éstas las siguientes:



Fig. 1. Competencias TIC para el desarrollo profesional docente: pedagógicas, comunicativas, tecnológicas y de gestión (MEN, 2013).

1. Competencias pedagógicas: Estas se refieren a la capacidad que debe tener el docente para utilizar las TIC a objeto de fortalecer los procesos de enseñanza y aprendizaje, reconociendo alcances y limitaciones de la incorporación de estas tecnologías en la formación integral de los estudiantes y en su propio desarrollo profesional. También Castellanos

et al., (citado en Aguiar y Rodríguez, 2018) indican que las competencias pedagógicas son las que permiten solucionar los problemas inherentes al proceso pedagógico en general y al proceso enseñanza aprendizaje en particular, con el propósito de promover el desarrollo integral de la personalidad de los estudiantes, en el contexto de la comunidad educativa escolar y en correspondencia con el modelo del profesional de la educación. Otra definición de competencias pedagógicas, es que el tutor es un facilitador que contribuye con conocimiento técnico y especializado, que dirige la clase hacia los puntos críticos, para crear preguntas y responder a las contribuciones de los participantes, dando coherencia y finalizando con un resumen de lo planteado (Silva, 2010).

Dentro de las competencias pedagógicas se encuentran algunos indicadores importantes que deben estar presentes en el docente universitario, a saber: Diseñador de contenidos educativo, mediador de aprendizajes en la virtualidad, identificador de las necesidades académicas de los estudiantes y motivador del ambiente de aprendizaje virtual.

2. Competencias comunicativas: Estas se refieren a la capacidad que debe poseer el docente para expresarse, establecer contacto y relacionarse en espacios virtuales a través de diversos medios y con el manejo de múltiples lenguajes, de manera sincrónica y asincrónica. Acertado lo que comparte Pericles (citado en Rodríguez y Quintero, 2020) “El que sabe pensar, pero no sabe expresar lo que piensa, está en el mismo nivel del que no sabe pensar”. Implica, que saber algo es saber expresarlo. Ser capaz de expresar lo que se sabe constituye la mejor prueba de que, efectivamente, se tiene el conocimiento; y quien no es capaz de expresarse con precisión demuestra que, realmente, no sabe lo que cree o imagina saber.

Dentro de las competencias comunicativas a tener en cuenta en el docente universitario, se encuentran algunos indicadores importantes, a saber: ciudadanía digital, comunicación a través de las TIC y difusión de información a través de medios digitales.

3. Competencias tecnológicas: Estas se relacionan con la capacidad que debe tener el docente para seleccionar y utilizar de forma pertinente, responsable y eficiente una variedad de herramientas tecnológicas entendiendo los principios que las rigen, la forma de combinarlas y las licencias que las amparan. Desde el punto de vista de Saldivia, Jiménez y Briceño (2018) comparte al hablar de competencias tecnológicas, referida a los conocimientos sobre el funcionamiento de las TIC, las redes, y herramientas y aplicaciones de productividad, así como elegir las herramientas apropiadas para situaciones específicas.

Dentro de las competencias tecnológicas que debe desarrollar el docente universitario, se encuentran algunos indicadores importantes, a saber: usar las TIC, manejar técnicamente la plataforma virtual y las herramientas colaborativas y elaborar

recursos educativos en múltiples formatos.

4. Competencias de gestión: Está referida a la capacidad, aptitudes y actitudes por parte tanto de docentes como de alumnos para utilizar las TIC en la planificación, organización, administración y evaluación efectiva de los procesos educativos; a nivel de prácticas pedagógicas y desarrollo institucional.

Es de hacer notar que, dentro de las competencias de gestión, se distinguen algunos indicadores que resultan de gran utilidad en el desarrollo del proceso educativo. Entre ellos se encuentran a saber: planificador de actividades de aprendizaje, organizador de actividades de aprendizaje en la virtualidad y evaluador en los entornos virtuales.

2.2. Entornos virtuales de aprendizaje

Los entornos virtuales de aprendizaje cada vez están más presentes en la educación presencial y mixta, de allí que, la intrusión tecnológica se ha convertido en un desafío para los modelos de enseñanza. Por consiguiente, urge la formación del docente para el desarrollo de competencias tecnológicas con la intención de que asuman los retos de incorporarlas al contexto educativo con miras a generar cambios significativos en la educación del estudiante universitario.

Estos espacios de aprendizaje tienen como propósito convertirse en un espacio que facilite la diversificación de las modalidades de enseñanza en los distintos niveles educativos. Una de sus principales características es que cuentan con funcionalidades que permiten a los docentes y estudiantes comunicarse de manera fluida y activa durante el proceso enseñanza – aprendizaje. Esto facilita brindar nuevos roles a los docentes universitarios que se convierten en mentores y facilitadores, generando un ambiente motivador que contribuye a lograr estudiantes más participativos en pro de la construcción de su propio conocimiento.

Cabe mencionar, que los EVA tienen una estructura específica que puede variar de acuerdo a las necesidades específicas de cada institución o nivel de estudio. En este sentido, para llevar a cabo el proceso de enseñanza en un entorno virtual, debe existir una estrategia metodológica que debe responder al diseño que proponga el docente para mejorar la calidad propuesta por la plataforma utilizada para desarrollar los módulos de enseñanza.

Moodle es un sistema para el manejo del aprendizaje en línea gratuito, que le permite a los educadores la creación de sus propios sitios web privados, llenos de cursos dinámicos que extienden el aprendizaje, en cualquier momento, en cualquier sitio (Dougiamas, 2021). En este caso, el estudio se llevará a cabo con la plataforma *Moodle* en la cual, según el propio creador, Martin Dougiamas, esta plataforma ha sido diseñada para posibilitar el aprendizaje colaborativo, así como las ideas del constructivismo pedagógico (Arribi, 2013).

En tal sentido, *Moodle* es una plataforma de aprendizaje

diseñada para proporcionar a los educadores, administradores y estudiantes un sistema integrado único, potente y seguro para crear entornos de aprendizaje personalizados. La implementación de código abierto de Moodle significa que se revisa y mejora continuamente para satisfacer las necesidades actuales y cambiantes de sus usuarios. Moodle ofrece el conjunto de herramientas más flexible para respaldar el aprendizaje combinado y los cursos 100 % en línea. Desde unos pocos estudiantes hasta millones de usuarios, Moodle puede escalar para satisfacer las necesidades de clases pequeñas y organizaciones grandes. Esta plataforma virtual se ha utilizado en entornos educativos, comerciales, sin fines de lucro y comunitarios debido a su flexibilidad y escalabilidad. Moodle está basado en la web, por lo que se puede acceder a él desde cualquier parte del mundo (Moodle, 2022).

Para cumplir con un adecuado EVA, debe cumplir varios estándares de los cuales se describen a continuación:

1. Calidad del entorno virtual: Satisfacer la demanda de calidad en un entorno virtual no es solo un desafío, sino una oportunidad. Rueda y Quintana (citados en Francisco, J., 2012). Es necesario considerar que los estudiantes que ingresan a las universidades y los que esperan ingresar al sistema educativo son nativos digitales, cada vez más independientes y exigentes, con nuevas formas de aprender, conocer, pensar y representar el mundo. Estos se convierten en los beneficiarios más importantes del proceso de calidad y, a su vez, el producto demostrará por su funcionalidad que puede satisfacer las necesidades del entorno social en el que fue formado. En todo caso, hoy la calidad constituye un desafío fundamental para la educación en Venezuela ahora y en el futuro, la cual es reconocida por el Art. 103 de la Constitución Nacional de la República Bolivariana de Venezuela como un derecho de todos.

Dentro de la calidad del entorno virtual existen indicadores importantes que el docente universitario debe tener en cuenta: eficacia y eficiencia del curso, versatilidad, autonomía en el aprendizaje, interactividad, calidad de los contenidos y estilos de aprendizaje

2. Calidad de la metodología didáctica: Se puede afirmar que el estudio de la calidad de la metodología didáctica de los cursos virtuales impartidos como complemento a la enseñanza presencial es una necesidad que se está promoviendo por parte de los docentes universitarios, con el objetivo de conocer la eficacia de los cursos virtuales como complemento a la enseñanza presencial, siendo necesario conocer por medio de entornos virtuales de aprendizaje, la influencia en el proceso de enseñanza, variables casi todas nombradas anteriormente, tales como: contenidos, estilos de aprendizaje, metodología didáctica, actividades, sistema de evaluación, proceso de comunicación e interacción, motivación e interés y el aprendizaje profundo y constructivista (Santoveña, 2012).

Dentro de la calidad de la metodología didáctica, se encuentran algunos indicadores importantes, a saber: transferencia de conocimiento, variedad de actividades, uso de herramientas y capacidad de motivar y fomentar el aprendizaje.

3. Calidad tecnológica: La calidad tecnológica está referida a los recursos ofrecidos por el entorno virtual a objeto de representar, procesar, transmitir y compartir la información requerida por el docente universitario para llevarla directamente a sus estudiantes.

Dentro de la calidad tecnológica, igualmente se encuentran indicadores importantes, a saber: elementos multimedia y diseño y uso de los elementos disponibles.

3. Población estudiada

La investigación se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo, apoyándose en el paradigma positivista, nivel descriptivo, diseño de campo, no experimental y transversal, porque la información se recolectó de una muestra de 68 docentes de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo "Mario Briceño Iragorry" (UPTTMBI), a quienes se les autoadministró un instrumento conformado por 27 ítems en escala de frecuencia, validado mediante la técnica "juicio de expertos" y hallada su confiabilidad a través del Alfa de Cronbach obteniendo un coeficiente de 0,94 que se ubica en el rango muy alta confiabilidad (Ruiz, 2002). Siendo los ítems detallados a continuación:

1. Diseña guías con contenidos educativos para impartir su unidad curricular en la virtualidad.
2. Se considera un docente mediador de aprendizajes en la virtualidad.
3. Identifica las necesidades académicas de los estudiantes durante la enseñanza virtual.
4. Se considera un docente motivador durante el aprendizaje virtual de los estudiantes.
5. Considera que el docente universitario durante el desarrollo del curso virtual debe comunicarse con sus estudiantes a través de las TIC.
6. Difunde información relacionada con la asignatura que imparte a través de medios digitales
7. Considera que el docente universitario debe saber cómo hacer uso de las TIC.
8. Maneja técnicamente la plataforma virtual de la universidad.
9. Maneja técnicamente herramientas colaborativas durante el desarrollo del curso virtual de su asignatura.
10. Elabora recursos educativos en los formatos adecuados para ser utilizados en los espacios virtuales.
11. Planifica actividades de aprendizaje en los entornos virtuales.
12. Organiza actividades de aprendizaje para ser desarrolladas en la virtualidad.
13. Incorpora actividades de evaluación en los EVA.
14. ¿Sabía Usted que Ciudadanía digital se refiere a las

normas de comportamiento que conciernen al uso de la tecnología? Si ____ No ____

15a. ¿Cuáles herramientas TIC conoce? Whatsapp, Gmail, Youtube, Powtoon, Moodle, Genially, Canva, Dropbox.

15b. ¿Cuáles herramientas TIC ha utilizado en su práctica docente? Whatsapp, Gmail, Youtube, Powtoon, Moodle, Genially, Canva, Dropbox.

Considera que los entornos virtuales de aprendizaje (EVA):
16. Contribuye al logro de los objetivos planificados en la asignatura empleando menor cantidad de recursos.

17. Son versátiles, porque permiten importar herramientas gratuitas que se encuentran en internet.

18. Facilitan que el estudiante siga su propio ritmo, que sea capaz de gestionar y planificar su propio aprendizaje.

19. Permiten el uso de herramientas digitales y medios multimedia para facilitar la comunicación, interacción y colaboración entre el docente y los estudiantes y entre estos.

20. Permiten crear contenidos de calidad para cumplir con veracidad, con exactitud, con presentación equilibrada de ideas y con un nivel adecuado de detalle

21. Permiten implementar un sistema de ayuda y refuerzo para el estudiante, atendiendo los posibles ritmos de aprendizaje.

22. Contiene actividades para la transferencia o difusión de conocimientos y habilidades a objeto de facilitar el aprendizaje.

23. Utiliza variedad de actividades para transmitir o evaluar conocimientos en los estudiantes.

24. Permite importar documentos generados por programas gratuitos: genially, canva.

25. Permite la motivación y generación de interés en los estudiantes.

26. Utiliza materiales audiovisuales, ya sea imágenes animadas con sonidos.

27. Hace uso de actividades variadas y recursos disponibles en la Internet.

4. Resultados obtenidos

A continuación, se reseñan los resultados obtenidos de las dos dimensiones analizadas en los docentes de la UPTTMBI.

4.1 Competencias tecnológicas

En relación con las competencias pedagógicas (ver Fig. 2), se obtuvo que el 42,6% de los docentes admitieron que algunas veces diseñan guías con contenidos educativos para impartir su unidad curricular en la virtualidad, otro 39,7% respondió que casi siempre se considera un docente mediador de aprendizajes en la virtualidad, el 33,8% casi siempre identifican las necesidades académicas de los estudiantes durante la enseñanza virtual y el 35,3% siempre se considera un docente motivador durante el aprendizaje virtual de los estudiantes.

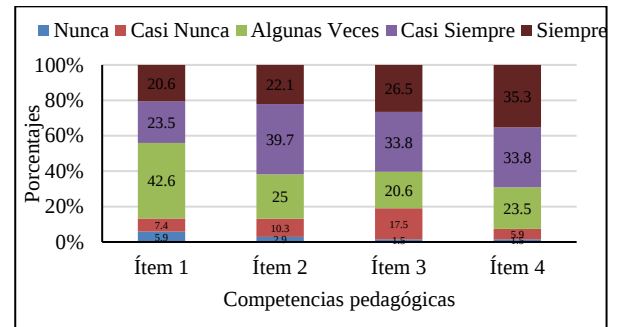


Fig. 2. Competencias pedagógicas de los docentes sujetos de estudio

Estas cifras revelan como la mayoría de los docentes consideran que poseen competencias pedagógicas para ser aplicadas en la educación virtual, sobre todo, cuando refieren que poseen habilidades para generar un ambiente motivador e identificar las necesidades de los estudiantes, elementos que pueden considerarse positivos para la enseñanza en espacios virtuales, teniendo en cuenta que este tipo de competencias facilitan la orientación integral del estudiante para obtener resultados satisfactorios en la virtualidad. Al respecto, Castellanos *et al.*, (citado en Aguiar y Rodríguez, 2018) comentan que las competencias pedagógicas deben promover el desarrollo integral de la personalidad de los estudiantes y donde los docentes deben ser facilitadores para contribuir con su conocimiento.

Respecto a las competencias comunicativas (ver Fig. 3), el 58,8% de los docentes concuerdan que siempre durante el desarrollo de un curso virtual debe haber comunicación a través de las TIC, mientras que 35,3% y 33,8% respondieron que siempre o casi siempre difunden información a través de medios digitales. Sin embargo, se pudo observar el hecho de que un 55,9% de los docentes admitieron no conocer el concepto de ciudadanía digital, concepto importante, porque se trata de las normas de comportamiento adecuado y responsable con respecto al uso de la tecnología, como lo señalan Ribble, Bailey y Ross (2004).

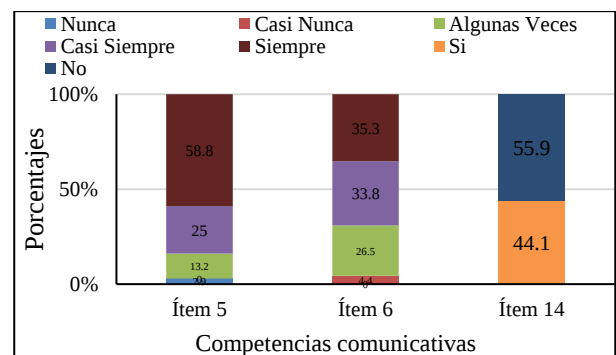


Fig. 3. Competencias comunicativas de los docentes sujetos de estudio.

Así que, hay una tendencia en los docentes en desarrollar competencias comunicativas como elemento esencial en la educación virtual, las cuales son esenciales para establecer contacto y relacionarse con los estudiantes a través de

diversos medios tecnológicos y digitales, sea de manera sincrónica o asincrónica. Por tanto, el manejo de esta competencia lleva consigo a que el docente deba poseer conocimientos y habilidades para comunicarse a través de las TIC, porque como señala Gómez (2017) la idea es que se utilicen las tecnologías no solo para informarse, sino en mayor medida, para aprender y generar conocimiento, a sabiendas que hoy día, producto de la pandemia, ha generado cambios en la manera de cómo abordar el proceso enseñanza y aprendizaje.

Acerca de las competencias tecnológicas (ver Fig. 4), el 69,1% de los sujetos encuestados consideran que el docente universitario debe saber cómo hacer uso de las TIC, pero, solo el 33,8% respondió que casi siempre manejan técnicamente la plataforma virtual, y otro 27,9% señaló algunas veces, entre tanto, un 45,6% indicó que casi siempre manejan herramientas colaborativas durante el desarrollo del curso virtual de su asignatura y el 38,2% casi siempre elaboran recursos educativos en múltiples formatos para ser utilizados en los espacios virtuales.

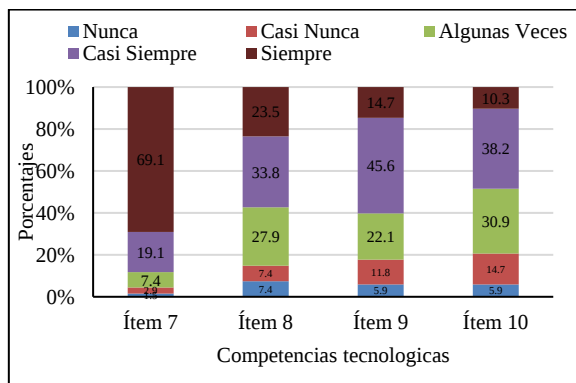


Fig. 4. Competencias tecnológicas de los docentes sujetos de estudio

De estas cifras se desprende que hay una tendencia en los docentes en considerar que poseen competencias tecnológicas para ser aplicadas en la educación virtual como es el caso de las herramientas colaborativas y algunos recursos tecnológicos empleados en los espacios virtuales, los cuales contribuyen en el desarrollo de los cursos bajo esta modalidad, por lo que esta situación favorece a la universidad en generar y gerenciar los cambios tecnológicos en sus procesos académicos. Así que, al hacer uso de las TIC con el uso de la plataforma virtual y herramientas colaborativas como lo indica UNIR (2020) se preparan los docentes para ser cada vez más competentes en el desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje, porque la dinámica actual lo requiere. Por supuesto, se hace necesario ahondar en la preparación y formación tecnológica de los docentes de la UPTTMBI con miras a lograr un personal altamente capacitado en el manejo de herramientas digitales educativas.

De las competencias de gestión (ver Fig. 5), el 38,2% de los docentes admitieron que casi siempre son planificadores de actividades de aprendizaje, aunque un 30,9% algunas veces

lo hacen, otro 39,7% respondió que casi siempre son organizadores de actividades de aprendizaje en la virtualidad, mientras un 27,9% algunas veces lo hace y el 35,3% casi siempre es evaluador en los entornos virtuales.

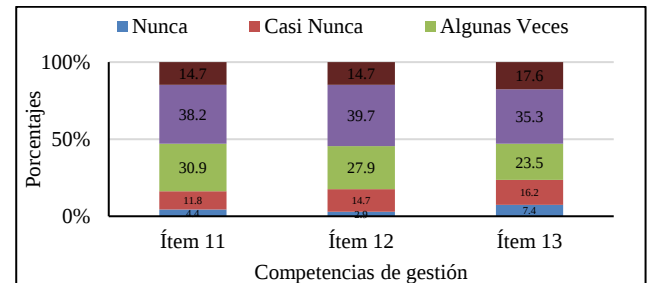


Fig. 5. Competencias de gestión de los docentes sujetos de estudio

Estos porcentajes revelan que los docentes consideran que poseen competencias tecnológicas para ser aplicadas en la educación virtual porque en la mayoría de los casos planifican, organizan y evalúan las actividades de aprendizaje en los ambientes virtuales. Así que la presencia en buena parte de los docentes de esta competencia permite en opinión de Díaz, Reyes y Bustamante (2020) mencionar que al gestionar lo que se enseñará, para qué se hará y cómo se puede lograr, se brindará una excelente educación, donde el estudiante se sienta a gusto de aprender y colocar en práctica lo aprendido.

4.2. Entornos virtuales de aprendizaje

Sobre la calidad del entorno virtual de aprendizaje (ver Fig. 6) se tiene que el 39,7% de los docentes encuestados admiten que siempre contribuyen al logro de los objetivos planificados en la asignatura empleando menor cantidad de recursos, asimismo, el 39,7% los califican de versátiles, porque permiten importar herramientas gratuitas que se encuentran en internet, para un 42,6% dichos ambientes virtuales siempre facilitan que el estudiante siga su propio ritmo, siendo capaz de gestionar y planificar su propio aprendizaje, otro 44,1% respondió que estos entornos virtuales siempre permiten el uso de herramientas digitales y medios multimedia para facilitar la comunicación, interacción y colaboración entre el docente y los estudiantes y viceversa, además, un 50% de los docentes concordaron que los EVA siempre facilitan crear contenidos de calidad para cumplir con veracidad, con exactitud, con presentación equilibrada de ideas y con un nivel adecuado de detalle y un 39,7% aseguran que casi siempre los EVA contribuyen en implementar un sistema de ayuda y refuerzo para el estudiante, atendiendo los posibles ritmos de aprendizaje.

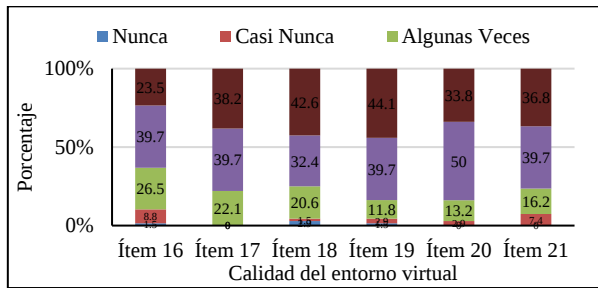


Fig. 6. Calidad del entorno virtual según los docentes sujetos de estudio

De acuerdo con estas cifras, la mayoría de los docentes valoran la calidad de los entornos virtuales de aprendizaje porque se emplea menor cantidad de recursos, son versátiles, permiten importar material, brindan autonomía en el aprendizaje, son interactivos al facilitar la comunicación entre el docente y los estudiantes y entre estos; en fin, como lo afirman Delgado y Solano (2015) los EVA proporcionan herramientas que permiten a los estudiantes desarrollar conocimientos de forma colaborativa y otras características cuando sea necesario.

En cuanto a la calidad de la metodología didáctica de los EVA (ver Fig. 7), se observó que, entre los datos más destacados, está el hecho que para un 39,7% de los docentes, estos espacios virtuales siempre permiten colocar actividades para la transferencia y/o difusión de conocimientos y habilidades a objeto de facilitar el aprendizaje, para el 44,1% casi siempre brindan variedad de actividades para transmitir o evaluar conocimientos en los estudiantes, un 39,7% manifestó que el entorno virtual casi siempre facilita importar documentos generados por programas gratuitos, tales como: genially, canva, mientras tanto, el 38,2% respondió que siempre los EVA permiten la motivación y generación de interés en los estudiantes.

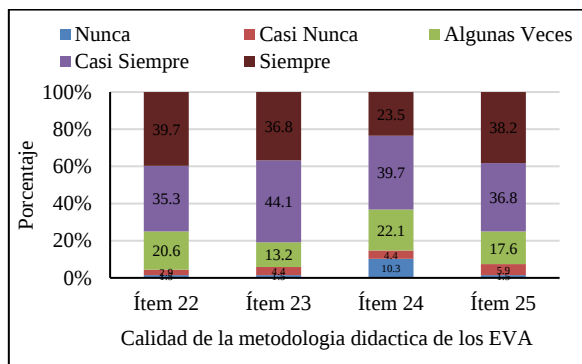


Fig. 7. Calidad de la metodología didáctica de los EVA según los docentes sujetos de estudio

Teniendo en cuenta estos porcentajes, puede decirse que los docentes mantienen un muy buen concepto de los entornos virtuales de aprendizaje compartiendo lo que comenta Santoveña (2012) con respecto a la calidad de la metodología didáctica que brindan los EVA, por consiguiente, los docentes universitarios probablemente recurren a éstos con el propósito de utilizarlos como complemento durante el

proceso de enseñanza presencial y facilitar el seguimiento del aprendizaje.

Respecto a la calidad tecnológica de los EVA (ver Fig. 8) el 41,2% los docentes respondieron que en los EVA siempre se pueden utilizar materiales audiovisuales, ya sea imágenes animadas o con sonidos y otro 38,2% reportó que se puede hacer uso de actividades variadas y recursos disponibles en la Internet.

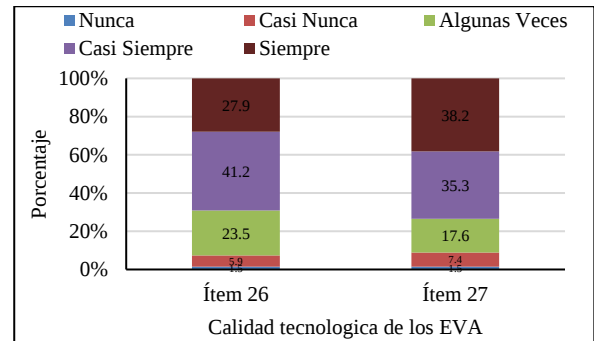


Fig. 8. Calidad tecnológica de los EVA según los docentes sujetos de estudio

Tales cifras indican que la mayoría de los docentes tienen conocimiento de los beneficios que brindan los EVA con respecto a su calidad tecnológica, referida a que se puede representar, procesar, transmitir y compartir información requerida por el docente universitario para sus estudiantes, afirmando lo que comentado por Urquidí, Calabor y Tamarit (2019) que la clave de estos entornos de aprendizaje consiste no tanto en aprender “más” sino en aprender “diferente”, adaptando las metodologías educativas y herramientas didácticas a las condiciones y habilidades de los estudiantes.

5. Conclusiones

Los docentes que constituyeron la muestra de estudio afirmaron que poseen competencias pedagógicas y tecnológicas, para aplicar en la educación virtual, sobre todo cuando se mencionó que demostraron habilidades para crear ambientes motivadores e identificar las necesidades de los estudiantes, ya que en la mayoría de los casos planifican, organizar y evalúan actividades de aprendizaje en un entorno virtual, utilizando herramientas de colaboración y algunos otros recursos tecnológicos brindados en línea. Con mayor destreza tienden a desarrollar habilidades comunicativas básicas para conectar con los estudiantes a través de diversos medios tanto sincrónicos como asincrónicos, situación que beneficia a las universidades en la generación y gestión del cambio tecnológico en sus procesos académicos.

Asimismo, los docentes demuestran poseer una actitud y tendencia optimista hacia el uso del entorno virtual, ya que comentaron favorablemente sobre la calidad del recurso, que es versátil porque se utilizan menos recursos, permite importar materiales de otros programas en línea, brinda autonomía de aprendizaje y permite a los estudiantes seguir su aprendizaje en su propio ritmo e interactúan al facilitar la

comunicación entre docentes y estudiantes y entre ellos y en cuanto a la calidad técnica, refiriéndose a los beneficios de su uso porque puede representar, procesar, transmitir y compartir lo que se necesita. La información que los profesores universitarios tienen para sus estudiantes es en definitiva una necesidad que se está planteando para complementar la enseñanza presencial y facilitar el seguimiento de los aprendizajes.

Cabe destacar que, aun cuando los docentes admiten tener competencias tecnológicas, pedagógicas, de gestión y comunicativas, se hace necesario ahondar en la preparación y formación tecnológica de los docentes de la UPTTMBI con miras a lograr un personal altamente capacitado en el manejo de herramientas digitales educativas, ya que existen docentes que aun demuestran debilidades en la gestión tecnológica desde la virtualidad.

Respecto a los ambientes virtuales de aprendizaje, se pudo observar que hay docentes que conocen de estos ambientes, pero no siempre los utilizan, por lo que se puede concluir que un programa de formación en competencias tecnológicas en ambientes virtuales de aprendizaje, es de vital importancia para indicarles y animarlos a vivir la aventura conocida como Moodle para la preparación actualizada en la enseñanza a sus estudiantes.

Referencias

- Aguiar, S., y Rodríguez, P. (2018). La formación de competencias pedagógicas en los profesores universitarios. *EduMeCentro*, 10(2), pp. 141-159 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2077-28742018000200011&lng=es&nrm=iso.
- Arribi, J. (2013). Moodle y la pedagogía constructorista social. <https://fptendencias.blogspot.com/2013/05/moodle-y-la-pedagogia-construccionista.html>
- Azinian, H. (2009). Las tecnologías de la información y la comunicación en las prácticas pedagógicas. Buenos Aires: Ediciones Novedades Educativas.
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. (2009). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.908. (Extraordinaria). Febrero 19, 1999.
- Delgado, M., y Solano, A. (2015). Estrategias didácticas creativas en entornos virtuales para el aprendizaje. *Actualidades Investigativas en Educación*, 9(2), pp. 1-21. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44713058027>
- Díaz, C., Reyes, M. y Bustamante, K. (2020). Planificación educativa como herramienta fundamental para una educación con calidad. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 25(3), pp. 87-95. <https://www.redalyc.org/journal/279/27963600007/html/>
- Dougiamas, M. (2021). Moodle. https://docs.moodle.org/all/es/Caracter%C3%ADsticas_de_Moodle_3.4
- Francisco, J. (2012). Calidad en entornos virtuales de aprendizaje. *Compendium*, 15(29), pp. 97-107. <https://www.redalyc.org/pdf/880/88028701006.pdf>
- Galvis, A. (2011). Aprender y enseñar en compañía y con apoyo de TICs. Tecnologías de Información y de Comunicaciones. *Metecursos. Soluciones E-Learnig innovadoras*. https://cdcsenamhi.files.wordpress.com/2008/07/aprender_enseniar_en_compania.pdf
- Gómez, L. (2017). Competencia comunicativa y TIC en la clase de lengua castellana. <https://www.compartirpalabramaestra.org/actualidad/blog/competencia-comunicativa-y-tic-en-la-clase-de-lengua-castellana>
- Ministerio de Educación Nacional. (MEN, 2013). Competencias TIC para el desarrollo profesional docente. Colombia: Imprenta nacional.
- Moodle. (2022). Acerca de Moodle. https://docs.moodle.org/all/es/Acerca_de_Moodle
- Quintana, J. (2010). Competencias en tecnologías de la información del profesorado universitario. *Interuniversitaria de Tecnología Educativa* (9), pp. 86-114. <http://www.ub.edu/ntae/jquintana/articles/competitiveformprof.pdf>
- Ramírez, L. (2020). Profesionalización docente: Competencias en el siglo XXI. Institute for the Future of Education. Tecnológico de Monterrey, México. <https://observatorio.tec.mx/edu-bits-blog/profesionalizacion-docente-competencias-siglo-xxi>
- Ribble, S., Bailey, D. y Ross, W (2004). Digital Citizenship: Addressing Appropriate Technology Behavior. *Learning & Leading with Technology*, 32(1), pp. 6-9. <https://eric.ed.gov/?id=EJ695788>
- Rodríguez R. y Quintero B. (2020). Competencias comunicativas del docente en un entorno virtual de aprendizaje. *Encuentro Educativo*, 25(1), pp. 121-137. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/encuentro/article/view/32946>
- Ruiz, C. (2002). Instrumentos de Investigación Educativa, Procedimientos para su Diseño y Validación. Barquisimeto: CIDEG.
- Sanabria, A. y Hernández, C. (2011). Percepción de los estudiantes y profesores sobre el uso de las TIC en los procesos de cambio e innovación en la enseñanza superior. Aloma: *Revista de Psicología, Ciencias de l'Educació i de l'Esport Blanquerna*, (29), pp. 273-290. <http://www.revistaaloma.et/index.php/aloma/article/view/106>
- Santoveña, S. (2012). Calidad de la metodología didáctica por medio de entornos virtuales de aprendizaje en la formación de agentes educativos. *Contextos educativos: Revista de educación*, (15), pp. 153-168. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/contextos/article/view/660/623>
- Silva, Q. (2010). El rol del tutor en los entornos virtuales de aprendizaje. *Innovación Educativa*, 10(52), pp. 13-23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179420763002>
- UNIR. (2020). Herramientas colaborativas para el aula: Ventajas y ejemplos de uso. <https://www.unir.net/educacion/revista/herramientas-colaborativas/>

Urquidi, M., Calabor P., y Tamarit, A. (2019). Entornos virtuales de aprendizaje: modelo ampliado de aceptación de la tecnología. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 21, pp. 1-12. <https://doi.org/10.24320/redie.2019.21.e22.1866>

Recibido: 10 de octubre de 2023

Aceptado: 20 de febrero de 2024

Becerra, Daniela: Ingeniero de Sistemas (ULA, 1996), MSc. en Docencia Virtual (UNET, 2023). Profesor Asistente del Departamento de Informática de la Universidad Politécnica Territorial del estado Trujillo “Mario Briceño Iragorry”.

 <https://orcid.org/0009-0009-7394-7389>

Moros, José: Ingeniero Agrónomo (UNET, 1990), MSc. en Gerencia Educativa (UNET, 2007), MSc. en Estadística (ULA, 2018) y MSc. en Docencia Virtual (UNET, 2021). Profesor Asociado del Departamento de Matemática y Física de la Universidad Nacional Experimental del Táchira y Profesor Invitado a los programas de postgrado de la UNET. Correo electrónico: josea.moros@unet.edu.ve

 <https://orcid.org/0000-0001-5065-1221>

Diseño y construcción de la computadora de vuelo para un cohete experimental

Design and construction of the flight computer an experimental rocket

Romero Salas, Luis Ángel^{1*}; Pérez Merlos, Juan Carlos¹, Morán Solano, María Guadalupe¹

¹Licenciatura en Ingeniería en Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.

*lromero885@alumno.uaemex.mx

Resumen

En la actualidad, la cohetaría experimental es una disciplina que presenta enormes áreas de oportunidad para el desarrollo tecnológico en materias como la ingeniería de materiales, los sistemas de propulsión, así como de sistemas electrónicos, dando el espacio perfecto para la puesta en prueba de sistemas de instrumentación, telecomunicaciones y control automático. En este trabajo se describe el diseño y la construcción de la computadora de vuelo para su uso en el cohete experimental XITZIN II basada en un sistema de control redundante, con un microcontrolador central Atmega 2560 y el de respaldo Raspberry Pi pico RP2040, se utilizó control PID con PWM en un Arduino nano para los servomotores de control de los alerones, así como un módulo XBee para la comunicación con una estación terrena a 2.4 GHz. La misión del cohete consiste en expulsar un microsatélite cubesat y dos paracaídas uno arrastre y otro principal, las variables principales a medir son altitud y temperatura, control de trayectoria y localización final del cohete. Los resultados mostraron en una prueba estática la medición de altitud del gps NEO 6M y el BMP180 de 2580 mts. en la cd. De Toluca y temperatura de 16°. El cohete busca alcanzar una altitud de 3,000 mts. en apogeo sobre el nivel de referencia.

Palabras clave: Cohete experimental, aviónica, computadora de vuelo.

Abstract

Currently, experimental rocketry is a discipline that presents enormous areas of opportunity for technological development in subjects such as materials engineering, propulsion systems, as well as electronic systems, providing the perfect space for testing systems of instrumentation, telecommunications and automatic control. This work describes the design and construction of the flight computer for use in the experimental rocket XITZIN II, the design was based on a redundant system, the Atmega 2560 as central microcontroller and Raspberry Pi pico as backup, it was used PID control with PWM and Arduino nano to control fins's servomotors, as well as an Xbee module to 2.4 GHz for communication with the earth station. The rocket's mission consists of ejecting a cubesat microsatellite and two parachutes one drag and other main, the main variables to be measured are altitude and temperature, trajectory control and final location of the rocket. The results showed in a static test the altitude measurement of the NEO 6M GPS and the BMP180 of 2580 meters. on the Toluca city and temperature of 16°. The rocket aims to reach an altitude of 3,000 meters. at apogee above the reference level.

Keywords: Experimental rocket, avionics, flight computer.

1 Introducción

A partir del lanzamiento del satélite Sputnik en 1957 por parte de la ex Unión Soviética, la humanidad inició una carrera espacial a la cual se han unido diversos países, los cuales han desarrollado ciencia y tecnología para ello, y capacidades que los coloca dentro del círculo reducido de

naciones que tienen la oportunidad de construir, lanzar y emplear satélites y vehículos espaciales (Rivera 2017).

De acuerdo con Sasaki y cols. (2009), desde 1962 jóvenes entusiastas del espacio en Francia han estado lanzado cohetes apoyados por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) con la asistencia de la Asociación de Ciencias de los Planetas (Association of

Planete Sciencies). Cada año se reúnen en el evento lanzamiento de verano en Francia donde los cohetes deben construirse de acuerdo con ciertas restricciones técnicas y de seguridad.

También en el noroeste de Tailandia se tiene una celebración llamada Cohete Tradicional Tailandés (Bangfai) o cohete local, esto se realiza cada año iniciando en abril hasta junio incluso la población local participa y construye sus propios cohetes con los recursos disponibles como se muestra en la Figura 1, la fuerza de arrastre del cohete se puede calcular con la ecuación 1 (Ujjin y cols; 2021).

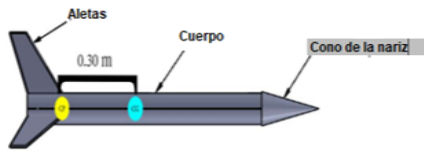


Fig. 1. Partes del cohete. Fuente: (Ujjin y cols; 2021) .

$$D_T = D_{NC} + D_B + D_F \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

- D_T =Fuerza de arrastre total en Newtons
- D_{NC} =Arrastre del cono de la nariz en Newtons
- D_B =Arrastre de cuerpo en Newtons
- D_F =Arrastre de la aleta en Newtons

Ujjin y cols. (2021), mencionan que el arrastre o resistencia aerodinámica es una fuerza inducida por la velocidad relativa del aire que es proporcional a la presión dinámica del aire del área sobre la cual actúa. La resistencia varía de acuerdo con la forma del cuerpo, la rugosidad de la superficie y otros factores. Además, se utiliza el coeficiente de arrastre para describir qué tanto de la fuerza de la presión dinámica es convertida en arrastre. La ecuación 2 también permite calcular la fuerza de arrastre.

$$D = D_d \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde

- D: Fuerza de arrastre en Newtons
- D_d : Coeficiente de arrastre
- ρ : Densidad Kg/m³
- v: Velocidad m/s
- A: Área en m²

Un cohete de sondeo o tipo sonda se puede definir como un pequeño cohete que porta instrumentos y que está diseñado para la investigación, como tomar medidas y realizar experimentos científicos durante un vuelo suborbital.

Un cohete sonda, contrario de un vehículo de lanzamiento, no entra en órbita y generalmente su vuelo realiza una trayectoria parabólica describiendo un vuelo suborbital. Estos cohetes son utilizados para transportar

instrumentos desde los 10-50 kilómetros (estratósfera) hasta los 1,500 km sobre la superficie de la tierra (exosfera); generalmente la altitud de los globos meteorológicos son regiones del espacio que son “demasiado bajas” para ser muestreadas por satélites. Un cohete sonda común consiste en un motor cohete de combustible sólido y una carga útil científica (también llamada carga paga) (Robayo-Salazar y Colombiana 2019).

Se puede decir que las aplicaciones más comunes de este tipo de cohetes se enmarcan en cuatro grandes áreas: salud, telecomunicaciones, ambiente y seguridad y defensa. Un cohete tipo sonda se puede representar como una estructura integrada por 6 componentes o sistemas, los cuales corresponden a: (Robayo-Salazar y Colombiana 2019)

- 1) Ojiva
- 2) Fuselaje (cuerpo y estructura)
- 3) Sistema de recuperación
- 4) Instrumentos y carga útil
- 5) Motor cohete (cámara de combustión, propelente y tobera)
- 6) Sistemas de control de vuelo (aletas)

Los cohetes sonda son considerados por la NASA como una oportunidad única de investigación científica debido a que la carga útil no entra en órbita y las misiones de los cohetes sonda no necesitan refuerzos costosos o telemetría extendida y cobertura de rastreo (Robayo-Salazar y Colombiana 2019).

Vergara y Agudelo (2007), desarrollaron un sistema de comunicaciones para la aviónica o computadora de vuelo con el sistema operativo de tiempo real QNX de un mini helicóptero llamado Colibrí, basado en una arquitectura distribuida tipo CAN, utilizando sensores como una unidad de medida inercial IMU (Inertial Measurement Unit, IMU), un GPS, magnetómetro o brújula digital y un sonar para altitudes bajas aplicada al despegue y al aterrizaje; cada sensor utiliza una frecuencia para enviar sus datos aproximadamente a una frecuencia cerca a los 250 KHz. Para el control y el filtrado se transmite entre 50 y 100 KHz. Además, se cuenta con un microcontrolador PIC 18F258 con el sistema operativo de tiempo real, se realizó un hilo (programa) para cada sensor.

Sasaki y cols. (2009), construyeron un cohete experimental llamado UCG-07, de altura 2.2 mts. y 15 Kg de peso, con un coeficiente de arrastre de 0.4, alcanzó una altitud máxima de 850 mts. en 13.7 seg., su máxima aceleración y velocidad fueron 102.9 m/seg² y una velocidad de 108 m/seg. respectivamente, la secuencia de vuelo fue controlada por dos microcontroladores. Mencionan que los tiempos de las secuencias de cada operación en el cohete son críticas, también al despegue y al aterrizaje hay que evitar colisiones y recomienda no desplegar los paracaídas a altas velocidades.

Salazar y Solorzano (2016), construyeron un cohete Aristarco I con una computadora de vuelo basada en Arduino Uno, cuyo objetivo fue la adquisición de datos y el sistema de recuperación a un kilómetro de altitud. Las variables que almacena en una memoria SD (security digital) son condiciones atmosféricas (presión, temperatura, altitud sobre el nivel del mar y altitud sobre el punto de referencia) con el sensor BMP 180, altitud y tiempo. El sistema de recuperación se activa cuando se detecta un giro para descender, esto cuando la inclinación esté a 75° sobre la vertical con el sensor MPU 6050, todos los circuitos usan la comunicación I²C, previenen como seguridad, si no activan los sensores se toma en cuenta el tiempo de 2.5 min.

Kobald y cols. (2018), en la Universidad de Stuttgart, lanzaron un cohete experimental con combustible híbrido llamado HEROS 3, con un alcance en el apogeo de altitud de 32,300 mts., quienes resaltaron las ventajas sobre las máquinas de combustible sólido y de líquido propelente. La telemetría utilizada se basó en dos computadoras de vuelo comercial, una fue de respaldo y la otra se utilizó en la misión que fue poner en órbita un microsatélite Mikro Rückkehrkapsel (MIRKA). Asimismo, las computadoras tuvieron el microcontrolador Genuino y las cuales se adaptaron con amplificadores para incrementar la potencia hacia la estación terrena y con una antena de varilla en la banda de 70 cm. Las variables que midieron fueron: velocidad, aceleración, posición, temperatura y presión, además de monitorear la energía; describieron que una de las tareas importantes de la computadora fue la expulsión de dos paracaídas.

Amado y Mendoza (2017), presentaron una computadora de vuelo para el cohete Sonda Libertador I, con el objetivo de la recuperación del cohete. La misión se dividió en dos partes, liberación del paracaídas y enviar una señal cuando el cohete fuera en caída libre; utilizaron dos arduinos, uno con Atmega 328 y otro con Atmega 128 en conexión maestro esclavo respectivamente con el bus I²C así como con los sensores acelerómetro, medidor de altitud (a través del barómetro) y una micro SD para almacenar los datos.

Con base a la información anterior, se puede decir, que muchos artículos describen las partes mecánicas y pocos son los que detallan el control electrónico o la instrumentación que manipula los tiempos y las acciones al interior del cohete, por ello, es interesante describir a más detalle el proceso de diseño de la instrumentación o aviónica del cohete experimental, que permita controlar las acciones en los tiempos requeridos, para lograr esto, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, se diseñó y construyó una computadora de vuelo para un cohete experimental de nombre XITZIN II cuyo objetivo es llevar consigo una carga útil que para este caso será un cubesat a una altitud de 3000m. sobre el nivel del

suelo, medir algunas variables ambientales y realizar un descenso controlado del cohete.

2 Metodología

Para el desarrollo de la computadora de vuelo del cohete XITZN-II se siguió la siguiente metodología:

- Investigación documental
- Determinación de las variables a medir
- Propuesta de diseño del sistema de instrumentación
- Selección de materiales
- Diseño y construcción de la computadora de vuelo
- Pruebas y análisis de resultados
- Conclusiones

3 Desarrollo

De acuerdo con la metodología de 14 pasos Ingeniería de Misiones Espaciales (Space Missions Engineering, SME) propuesta por Álvarez y cols. (2015), se utilizó parte de ella para el diseño de la misión del cohete XITZIN-II (Alvarez y cols; 2015).

Si bien los sistemas que componen a un cohete experimental pueden cambiar ligeramente dependiendo de la misión y/o experimento que éste debe cumplir, en general con los subsistemas básicos, en el XITZIN-II los sistemas que lo componen son los siguientes:

- *Sistema de propulsión:* motor, combustible e ignitor
- *Aero estructuras:* fuselaje, retenedores de motores, estructura interna y bahías para cargas útiles
- *Sistema de descenso y recuperación:* paracaídas y liberadores de paracaídas
- *Sistemas electrónicos:* computadora de vuelo, sistemas de ignición para paracaídas, sistemas de alarma para recuperación y fuentes de alimentación

La computadora de vuelo construida tiene como funciones básicas: medir la altura hasta 3 km como apogeo, mantener el descenso controlado, transmisión de datos en tiempo real y así como sistema de control activo de trayectoria; para el diseño de la computadora de vuelo se hizo un desglose con mayor detalle contando las siguientes características:

- Monitoreo de altitud
- Monitoreo de orientación (posición angular respecto a 3 ejes)
- Monitoreo de velocidad
- Monitoreo del nivel de voltaje de las baterías
- Corrección de trayectoria de vuelo mediante alerones móviles (con fines de experimentación mas no de implementación)
- Geolocalización

pico, basada en el microcontrolador RP2040; este tiene alta potencia de procesamiento, costo relativamente bajo y proporciona conexiones con los protocolos de comunicación más comunes (UART, SPI e I2C), con una frecuencia de reloj de 144 MHz y la característica de ser programable en microPython.

En la Figura 8, se muestra el diagrama de flujo general del sistema completo de la programación de la computadora de vuelo, las funciones principales son: encendido de la computadora de vuelo, inicialización de sensores, creación de archivos de almacenamiento, lectura de sensores, almacenamiento de información y transmisión a la estación terrena, control de trayectoria del cohete, liberación de la carga útil (cubesat) y el primer paracaídas, liberación del segundo paracaídas y la geolocalización para la recuperación del cohete, cabe destacar que el programa opera en un ciclo infinito.

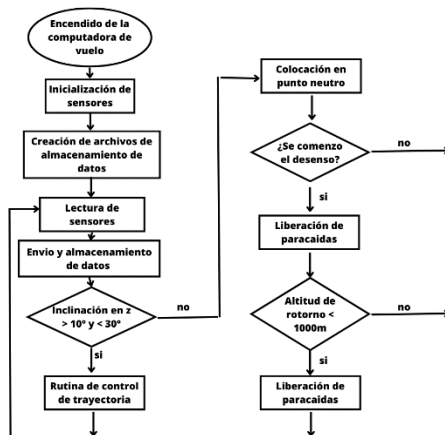


Fig. 8. Diagrama de flujo de la programación de la computadora de vuelo para el cohete XITZIN-II. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los actuadores se utilizó un servomotor controlado por un PID con PWM que controlan el ángulo de ataque del juego de alerones móviles, la selección de los servomotores fue con el objetivo de ejercer torques altos y que sean lo suficientemente resistentes para no ceder a los esfuerzos aerodinámicos ejercidos sobre estos elementos. En la Figura 9, se muestra el diagrama a bloques del control PID.

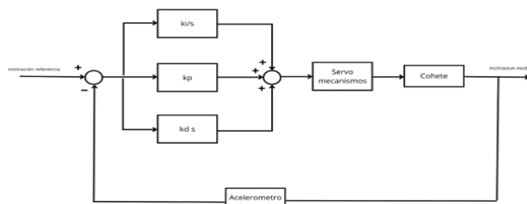


Fig. 9. Diagrama a bloques del control PID para control de trayectoria a través de los servomotores que controlan los alerones. Fuente: Elaboración propia.

Los servomotores fueron tres del modelo MG-995 como se muestra en la Figura 10, los cuales son una de las versiones más robustas que proporcionan un torque de hasta 15 kg/cm y tienen engranes metálicos los cuales brindan una gran resistencia a fuerzas puestas que sean ejercidas sobre su eje.



Fig. 10. Servomotor MG-995 controlado por PID utilizado como control de los alerones para el control del vuelo. Fuente: Elaboración propia.

Para la programación del Arduino se utilizó la plataforma del mismo nombre y para la Raspberry Pi Pico la plataforma Thonny, como se muestra en las Figuras 11 y 12 respectivamente.

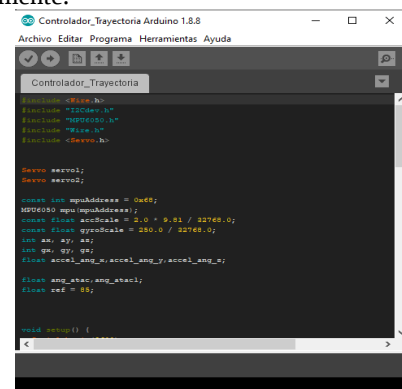


Fig. 11. Ambiente de desarrollo Arduino para la programación del Atmega 2560 y Arduino nano. Fuente: Elaboración propia.

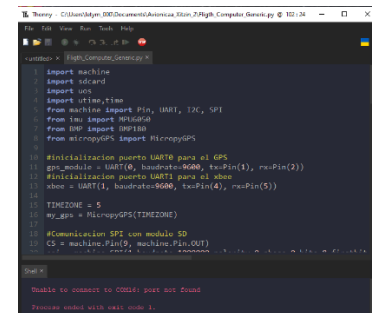


Fig. 12. Ambiente de desarrollo Thonny para la programación de la Raspberry Pi Pico. Fuente: Elaboración propia.

4 Pruebas y resultados

La Figura 13, muestra la construcción de la placa de circuito impreso de la computadora de vuelo, la tarjeta soporta a los microcontroladores utilizados como se indicó anteriormente, también los sensores de altitud y temperatura, el acelerómetro, GPS, y el módulo de transmisión por radio XBee.



Fig. 13. Construcción de la Computadora de vuelo. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de los sensores se describen a continuación. De acuerdo con Amado y Mendoza (2017), para calcular el ángulo de inclinación del sensor mpu6050 (acelerómetro y giroscopio) se realizó a través de la aceleración en sus tres ejes, por medio trigonométrico se pueden definir las ecuaciones 3, 4 y 5:

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \frac{a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}} \quad \text{Ec. (5)}$$

El mismo circuito integrado que mide las aceleraciones sirve como giróscopo y mide velocidades angulares, obteniendo el ángulo en que se encuentra el mpu6050, además se puede sumar el valor del giróscopo para saber el nuevo ángulo como se indica en la ecuación 6 (Amado y Mendoza 2017).

$$\dot{\text{Ángulo}}_y = \text{Ángulo}_{y\text{anterior}} + \text{giroscopio}_y * \Delta t \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde

Δt : es el tiempo que transcurre cada que se calcula en la ecuación 6

$\text{Ángulo}_{y\text{anterior}}$: es el ángulo calculado la última vez

giroscopio_y : es la lectura del Ángulo_y del giróscopo

En las Figuras 14 y 15 se muestran las pruebas del giroscopio con inclinación a 0° y 90° grados respectivamente.

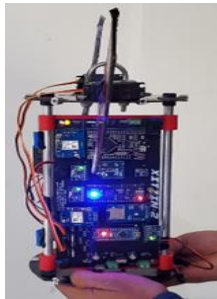


Fig. 14. Prueba del giroscopio con inclinación a 0° con respecto al eje z. Fuente: Elaboración propia.

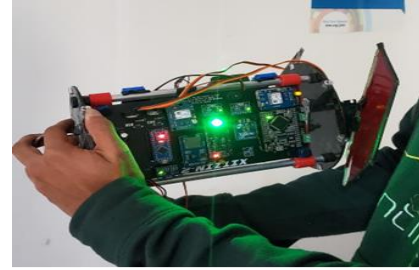


Fig. 15. Prueba del giroscopio inclinación a -90° con respecto al eje z. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la Figura 16, se muestran los valores obtenidos del acelerómetro, en esta se representa la inclinación del sistema respecto al eje z (paralelo a eje del cohete) donde los valores positivos representan una inclinación hacia la derecha y los valores negativos una inclinación hacia la izquierda.

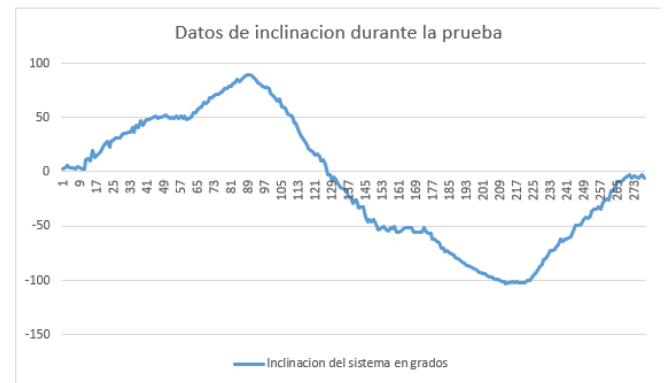


Fig. 16. Inclinación del cohete con respecto al eje z, los valores positivos indican inclinación a la derecha y los negativos a la izquierda. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la gráfica de la Figura 17 se muestra la inclinación y la acción de los alerones para corregir la trayectoria de vuelo del cohete.

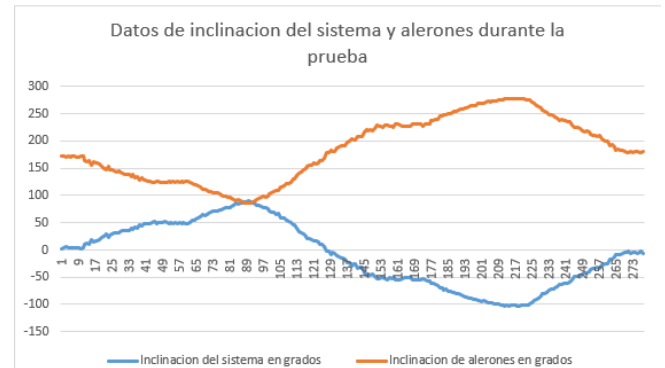


Fig. 17. La inclinación del cohete con respecto al eje z es la línea azul y la naranja representa la acción de los alerones para el control del vuelo. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de la Figura 17 se muestran las señales de inclinación y la que se envía a los servomotores para controlar la posición de los alerones y corregir la trayectoria.

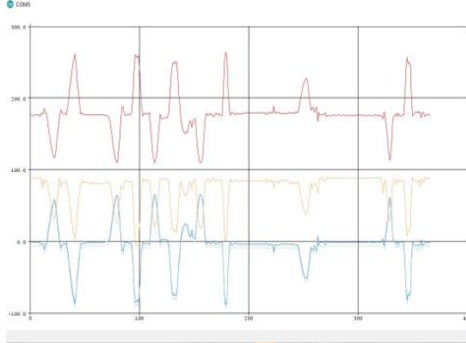


Fig. 18. Señales de inclinación del cohete con respecto al eje z la superior e inferior y la gráfica central representa la acción enviada a los servomotores para accionar a los alerones para el control del vuelo. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de telemetría consistieron en el enlace de los módulos de radiofrecuencia XBee y una computadora corriendo el software XCTU, este es un software especializado para la creación de enlaces con módulos de la familia XBee. Esta prueba permite tener seguridad de los enlaces de radiofrecuencia entre la computadora de vuelo y la estación terrena, además, de ver que el alcance del enlace cubra la distancia que se prevé el cohete alcanzará tanto en vuelo y al momento de su aterrizaje, la Figura 20 muestra los datos recibidos desde la computadora de vuelo a 1.5 km de la estación terrena en zona urbana.



Fig. 19. Pruebas de telemetría de la computadora de vuelo. Fuente: Elaboración propia.

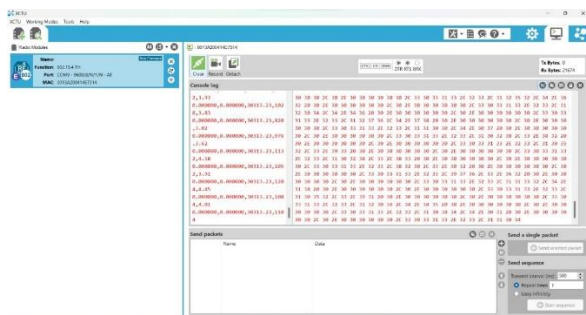


Fig. 20. Trama de datos recibida desde los módulos XBee. Fuente: Elaboración propia.

Para la expulsión de los paracaídas a través de presión de gas ejercida por la quema de pólvora se utilizó un cerillo eléctrico como se indica en la Figura 21, su modelo eléctrico mostrado en la Figura 22.



Fig. 21. Cerillo eléctrico utilizado para la ignición del combustible. Fuente: (Son y cols; 2002).

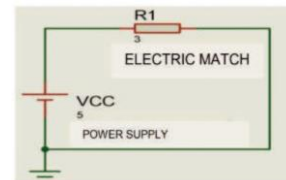


Fig. 22. Modelo eléctrico del cerillo eléctrico de disparo. Fuente: (Pérez Merlos y cols; 2023).

Con esta idea del modelo, se calculó la corriente para activar el cerillo con la ley de Ohm, la corriente calculada fue de 1 amperio, las pruebas fueron exitosas como se aprecia en la Figura 23.



Fig. 23. Prueba de encendido de cerillo eléctrico para la chispa de ignición del cohete desde la estación terrena. Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento es de un control ON-OFF cuya activación está en referencia al altímetro, como se indica en el diagrama de flujo de la Figura 24.

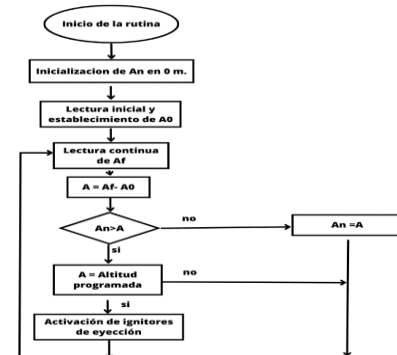


Fig. 24. Diagrama de flujo de la programación de la liberación del paracaídas para el cohete XITZIN-II. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 31. Pruebas de continuidad de la computadora de vuelo. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 32. Programación del Arduino Mega con el programa principal de la computadora de vuelo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 33, se muestra el producto final de la computadora de vuelo en el cohete XITZIN II y en la Figura 34 el cohete experimental terminado.



Fig. 33. Cohete experimental XITZIN II con la computadora de vuelo construida. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 34. Fuselaje del cohete XITZIN-II. Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

La computadora de vuelo construida cumplió de forma satisfactoria con los requisitos impuestos al inicio de este trabajo, al pasar las pruebas realizadas en ella y mostrar los siguientes resultados:

Mediciones correctas del GPS y del BMP180 en prueba estática de altitud, midiendo 2580 mts. aprox. y 16º grados Celsius sobre el nivel del mar, esto correspondiendo a la ciudad de Toluca, Edo. Mex.

Activación correcta de los cerillos electrónicos con base a las mediciones del BMP180, esto para la expulsión de los paracaídas y la carga útil.

Una respuesta optima y rápida de los alerones móviles con base al sistema de control diseñado.

Finalmente, un enlace de radio lo suficientemente estable y con la potencia necesaria para cubrir las necesidades de la misión.

Estos resultados nos garantizan un funcionamiento en vuelo seguro y el cooperar para el alcance de la misión del XITZIN-2 que es alcanzar 3km de apogeo.

Referencias

- Alvarez Rojas, N., Huérfano Romero, J. L., y Ojeda Ramírez, O. I. (2015). Diseño e implementación de misión para el lanzamiento de un cohete para tres kilómetros de altura. VIII Congreso Argentino de Tecnología Espacial, Buenos Aires Argentina.
- Amado Morales, G., y Mendoza Mendoza, L. A. (2017). *Diseño detallado e integración de un sistema de recuperación para el cohete Sonda Libertador I* Fundación Universitaria Los Libertadores]. Bogota D.C.
- Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A., y Schmierer, C. (2018). Hybrid experimental rocket stuttgart: a low-cost technology demonstrator. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(2), 484-500.
- Pérez Merlos, J. C., Salgado Gallegos, M., Rodriguez Angeles, E., y Albarran Trujillo, S. E. (2023). Prototype of a console for the electronic ignition of a pyrotechnic fire. *Journal of Engineering Research* 3(11), 1-11. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3173102330036>
- Rivera Parga, J. R. (2017). La exploración espacial: una oportunidad para incrementar el poder nacional del Estado mexicano. *Número 4*.
- Robayo-Salazar, R. A., y Colombiana, F. A. (2019). Cohetes tipo sonda con fines científicos, tecnológicos y militares: una oportunidad para su desarrollo en la EMAVI-FAC. *Comando Grupo Académico Escuela Militar de Aviación" Marco Fidel Suárez" 2019*.
- Salazar Ceballos, O. D., y Solorzano Gomez, M. A. (2016). *Diseño conceptual, preliminar y detallado del cohete sonda recuperable "aristarco i" propulsado con propelente sólido* Fundación Universitaria Los Libertadores Facultad de Ingenierías]. Bogota D.C.
- Sasaki, M., Nakano, N., Ohmayu, S., y Ogushi, N. (2009). System Development of an Experimental Rocket for a Launch Campaign Organized by The Association of Planete Sciences, France. *Transactions of the*

- Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan 7(ists26), Tu_13-Tu_18.*
- Sensortec, B. (2015). *BMP180 Digital pressure sensor* (2764-1317).
- Son, S. F., Hiskey, M. A., Naud, D., Busse, J. R., y Asay, B. W. (2002). *Lead-free electric matches*.
- Ujjin, R., Chaikiandee, S., y Ngaongam, C. (2021). Low Altitude Local Rocket Aerodynamics Analysis and Experimental Testing. Presented at the 2nd Innovation Aviation y Aerospace Industry-International Conference.
- Vergara Díaz, J. M., y Agudelo Toro, A. Y. (2007). Diseño e implementación del sistema de comunicaciones basado en CAN para la aviónica en un vehículo aéreo autónomo no tripulado. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(11), 209-221.

Recibido: 21 de noviembre de 2023

Aceptado: 20 de febrero de 2024

Romero Salas, Luis Ángel: Egresado de la licenciatura en Ingeniería en Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México en 2023. Alumno participante en el grupo de investigación de coherencia experimental de la Facultad de Ingeniería UAEMex.

 <https://orcid.org/0009-0009-5285-0844>

Pérez Merlos, Juan Carlos: Ingeniero en Electrónica en Instrumentación egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán Jalisco en 1986. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en Informática en 1998 en la Universidad Autónoma del Estado de México y es Doctor en Ingeniería Industrial en Tecnologías de Información en el 2018 por la Universidad Anáhuac Norte de México. *Correo electrónico:* jcjcjc63@yahoo.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6189-5125>

Morán Solano, María Guadalupe: Ingeniera en Electrónica en Instrumentación egresada del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán Jalisco en 1996. Obtuvo el grado de Maestra en Ingeniería en Informática en 2000 en la Universidad Autónoma del Estado de México y es Doctora en Control, automatización y robótica en 2012 por la Universidad del País Vasco, España. *Correo electrónico:* mgmorans@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0009-0003-7431-5080>

Modelo de simulación dinámica desarrollado bajo criterios conceptuales asociados al control sostenible del pastoreo en sistemas ganaderos durante el levante y ceba

Dynamic simulation model developed under conceptual criteria associated with sustainable grazing control in livestock systems during rearing and fattening

Uzcátegui-Varela, Juan Pablo^{1,2}

¹Grupo de Investigación en Ciencia Animal y Plantas Tropicales. Universidad Nacional Experimental Sur del Lago “Jesús María Sempurn” (UNESUR) Núcleo La Victoria, Mérida estado Mérida, 5142, Venezuela. ²Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
uzcateguij@unesur.edu.ve

Resumen

Los sistemas con rumiantes a pastoreo son complejos y difíciles de gestionar, ante esta realidad, mejorar los indicadores de sostenibilidad requiere un enfoque sistémico basado en las interacciones animal-entorno que regulen el consumo y la oferta forrajera; al respecto, la simulación dinámica se considera una herramienta que permite comprender el intercambio de información entre los componentes del sistema y el producto. Debido al creciente interés por establecer sistemas ganaderos biológicamente eficientes, se propone un modelo de simulación desarrollado bajo criterios teóricos asociados al control sostenible del pastoreo en ganadería vacuna durante el levante y ceba en la zona sur del Lago de Maracaibo, Venezuela; para ello, se realizó una revisión sistematizada de literatura que permitió seleccionar las variables que definen la dinámica del pastoreo, cuyas interacciones fueron graficadas a través del software Vensim® DSS Professional versión 9.1.1. Para evaluar la viabilidad teórica del modelo, se plantearon seis posibles escenarios a nivel de predio para los cuales, se definió biomasa vegetal y biomasa animal como variables de nivel, las cuales correspondieron a los kilogramos de materia verde que genera la pastura y el peso del componente animal respectivamente, estos parámetros permitieron determinar el tiempo que los animales deben permanecer en el potrero antes de agotarse el pasto. El análisis de sensibilidad reveló que el área del potrero es el punto crítico para la planificación sostenible del pastoreo; asimismo, la dinámica simulada muestra que, cuando la carga animal es baja, las ganancias diarias de peso por animal son favorables, pero con baja productividad; por su parte, un incremento de la carga animal, condiciona la ganancia de peso y con ello, el potencial biológico del rebaño; en consecuencia, es necesario garantizar un equilibrio entre la oferta forrajera y la necesidad de consumo para alcanzar la mayor eficiencia, en este caso, kilogramos de carne/animal/hectárea/año.

Palabras clave: Agroecosistema, consumo de forraje, eficiencia biológica, ganadería sostenible, pasturas tropicales.

Abstract

Ruminant grazing systems are complex and difficult to manage, in view of this reality, improving sustainability indicators requires a systemic approach based on animal-environment interactions that regulate consumption and forage supply; in this regard, dynamic simulation is considered a tool that allows understanding the exchange of information between system components and the product. Due to the growing interest in establishing biologically efficient livestock systems, we propose a simulation model developed under theoretical criteria associated with the sustainable control of cattle grazing during rearing and fattening in the southern area of Lake Maracaibo, Venezuela; for this purpose, a systematized literature review was carried out to select the variables that define the grazing dynamics, whose interactions were plotted using Vensim® DSS Professional version 9.1.1 software. To evaluate the theoretical feasibility of the model, six possible scenarios were proposed at the farm level, for which plant biomass and animal biomass were defined as level variables, which corresponded to the kilograms of green matter generated by the pasture and the weight of the animal component, respectively; these parameters

made it possible to determine the time the animals should remain in the pasture before the grass was exhausted. The sensitivity analysis revealed that the paddock area is the critical point for sustainable grazing planning; likewise, the simulated dynamics show that, when the stocking rate is low, daily weight gains per animal are favorable, but with low productivity; on the other hand, an increase in stocking rate conditions weight gain and with it, the biological potential of the herd; consequently, it is necessary to guarantee a balance between forage supply and the need for consumption to achieve the highest efficiency, in this case, kilograms of meat/animal/hectare/year.

Keywords: Agroecosystem, forage consumption, biological efficiency, sustainable livestock, tropical pastures.

1. Introducción

Los sistemas de producción animal se consideran un importante componente económico para el desarrollo agroalimentario en América Latina, una región que, aunque históricamente ha sido víctima de profundas crisis financieras y el 46% del producto interno bruto depende de la ganadería, también posee el potencial natural para maximizar los indicadores de eficiencia biológica en sus rebaños, pero, alcanzar este objetivo no es fácil, se requiere implementar una profunda transformación en el patrón de manejo zootécnico tradicional, mediante planes control que contribuyan a una transición gradual del sistema hacia el enfoque agroecosistema sostenible (Durán y col. 2023).

Baltenweck y col. (2020) comentan que, si bien la ganadería contribuye a mejorar la calidad de vida en las comunidades más vulnerables, su impacto negativo a la salud pública y al ambiente, demanda la consolidación de sistemas ganaderos resilientes al cambio climático, una realidad determinante para granjas ganaderas que buscan consolidar los objetivos inmediatos de sostenibilidad. Según reportes técnicos expuestos por Kristiansen y col. (2021) y Cheng y col. (2022) la ganadería vacuna genera unas 7,1 Gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente ($GtCO_2eq$), que representan 14,5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el ganado (carne de res y leche) responsable de dos tercios del total, esto en gran parte debido a las emisiones de metano (CH_4), un gas generado por la fermentación ruminal; sin embargo, para Twine (2021) y Reavis y col. (2022) en la actualidad se discuten aportes científicos fundamentados en cifras oficiales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), pero hallazgos en campo revelan que las mismas, no están actualizadas, pues un análisis exhaustivo reciente desde la propia FAO sobre emisiones contaminantes de los sistemas ganaderos, concluyen que el valor porcentual debe ajustarse a 16,5%, mientras la actividad energética, manufacturera y transporte concentran el 70% del total de GEI, la agricultura 7,5% y los hogares 6%, lo cual sugiere un cambio del dinamismo económico mundial en pro de conservar los servicios ecosistémicos que garantizan la vida en el planeta.

La producción bovina en Latinoamérica es mayormente doble propósito (DP), es decir, unidades pecuarias que producen importantes volúmenes de leche y carne a bajo costo simultáneamente, empleando la práctica del pastoreo como

base del manejo nutricional para alimentar a los animales e incrementar su productividad (leche o carne por unidad de superficie y/o por animal), aunque la eficiencia se considera menor al compararse con fincas especializadas. Este sistema DP se caracteriza por ser sencillo, estable, flexible y de liquidez diaria, permitiéndole a los productores reportar interesantes índices de sostenibilidad aún frente a las constantes variaciones agroecológicas y socioeconómicas propias del trópico (González-Quintero y col. 2020).

El consumo y producción global de carne viene aumentando constantemente desde 1960. El reporte de producción cárnica proveniente de países subdesarrollados se triplicó entre 1980 y 2002 de 45,6 a 134 millones de toneladas y en 2018, la producción se ubicó en 340 millones de toneladas, por tanto, la demanda de proteína bovina (carne) continúa aumentando a nivel mundial (Smith y col. 2018).

En los últimos años, ha habido un cambio sostenido y sustancial en las dietas humanas hacia el consumo de alimentos derivados del ganado; por esta razón, algunos sistemas ganaderos han optado por mejorar la calidad de sus pasturas para secuestrar carbono y, por lo tanto, reducir las emisiones de los GEI que contribuyen al calentamiento global, pues la producción ganadera ofrece un importante escenario para minimizar el impacto negativo al ambiente mediante estrategias eficaces que pueden reducir estas emisiones hasta en un 30%, mientras se aporta proteína a una población en crecimiento (Varijakshapanicker y col. 2019).

Es importante destacar que la eficiencia de transformación de energía en los rumiantes es muy baja, por tanto, la seguridad alimentaria puede promoverse de manera efectiva solo si los principales alimentos que se les dan a los rumiantes (como las gramíneas forrajeras y las leguminosas) no compiten con los alimentos humanos, lo cual sugiere que la ganadería de carne, es un interesante rubro alimentario de investigación como punto de partida práctica en el análisis de sistemas ganaderos sostenibles (Moorby y Fraser, 2021).

En Latinoamérica, la ganadería bovina se desarrolla sobre la base del pastoreo de hierbas nativas e introducidas como principal y más económica fuente de alimentación para los rebaños, siendo las especies *Cynodon nlemfuensis*, *Urochloa arrechae*, *U. humidicola*, *U. brizantha*, *U. decumbens*, *Megathyrsus maximus* y *Echinochloa polystachya* las más empleadas entre los productores. Es a partir del consumo

de materia seca contenida en estas plantas, que los bovinos convierten fibras nutricionalmente pobres en productos alimentarios (eficiencia de pienso) que hoy aportan el 13% de energía a la dieta mundial (Jack y col. 2021; Flores-Coello y col. 2023).

La producción de carne en Venezuela se lleva a cabo sobre los principios del pastoreo extensivo (baja productividad) en los llanos y, doble propósito en la cuenca y sur del Lago de Maracaibo, con un componente animal de características raciales indefinidas (*Bos taurus* x *Bos indicus*) que aportan la mayor cantidad de leche y carne al país caribeño. Entre los caracteres productivos de la ganadería bovina de carne venezolana, destacan las tasas de crecimiento, reproducción y sobrevivencia, los cuales dependen de la influencia de factores genéticos y no genéticos que deben ser monitoreados para garantizar el éxito en el sistema de producción (Verde y col. 2007; Segovia-López y Jeréz-Timaure, 2008).

Galina y Geffroy (2023), recuerdan que la ganadería DP es la actividad agropecuaria más efectiva para comercializar leche y carne en proporciones satisfactorias frente al actual interés de muchos consumidores por acceder a alimentos sanos que no provengan de predios intensivos donde las prácticas de manejo resultan condicionan el bienestar animal y su entorno. La ganadería DP que se desarrolla bajo criterios de control para planificar el pastoreo, ha sido asociada con indicadores de sostenibilidad ecológica por reportar el incremento paulatino de la fertilidad del suelo, mejorando así, el rendimiento de materia verde (MV) y la productividad animal sin causar un impacto negativo e irreversible sobre el ecosistema ya intervenido, una premisa que fue confirmada por Baldini y col. (2020); sin embargo Torres Jara de García y col. (2023) aseguran que a pesar de las bondades descritas, el sistema registra baja productividad y poco uso de herramientas tecnológicas que limita su eficiencia.

En este sentido, el enfoque de sistemas en la ganadería brinda interesantes oportunidades para predecir y modular los rasgos dinámicos del rebaño, por ello, Queenan y col. (2020) explican que los sistemas biológicos están estructurados por subsistemas altamente complejos en sus diferentes niveles de abstracción (desde moléculas a ecosistemas), cada uno dependiente de los demás, cuyo objetivo principal es potencializar la productividad funcional del sistema total, aun así, se restringe la comprensión de su realidad, una razón que dificulta identificar los fundamentos conceptuales de sostenibilidad en la granja.

Los sistemas bovinos basados en la utilización de pasturas, se caracterizan por presentar variación en la calidad del forraje cosechado según la época del año y el manejo que recibe, lo cual restringe disponibilidad y calidad del material vegetal durante el pastoreo (Greenwood, 2021). A pesar de ello Terry y col. (2021) advierten que la vinculación de estrategias aplicadas al pastoreo con una producción más efi-

ciente de carne, son necesarias ante el ascenso del interés social por incrementar la sostenibilidad en el agroecosistema.

Los agroecosistemas son comunidades de microorganismos, plantas y animales que interactúan entre sí para producir una unidad estable, su origen y estructura son el resultado de la intervención (arado, deforestación) del entorno natural por parte del hombre para obtener principalmente alimentos (Liu y col. 2023). Se estima que los humedales ocupan solo entre el 6% y 9% del paisaje en todo el mundo, pero hacen un importante aporte de servicios a la sociedad humana, especialmente al integrarse con agroecosistemas, tal y como ocurre con las pasturas, proporcionando refugios vitales para muchas especies que dinamizan cada ecorregión. Por otra parte, los humedales participan en el secuestro de nutrientes como medio de regulación ecológica, ejercen protección contra inundaciones y purifican el agua y aire, de esta manera se favorece también, la capacidad para producir forraje de calidad para el ganado, en otras palabras, las pasturas, un agroecosistema muy común en el trópico americano, dominando por gramíneas y otras herbáceas destinadas a la producción de forraje para el consumo animal, puede acoger prácticas de gestión para la conservación como un sistema diversificado fundamental para alcanzar una intensificación ecológica de la producción animal (Sonnier y col. 2020; Macedo y col. 2021).

El trabajo documental llevado por Kleppel y Frank (2022), sugieren que la cría de vacunos a pastoreo, es la forma más económica para alimentar a estos grandes rumiantes y genera interacciones entre variables propias del agroecosistema, las cuales debidamente controladas podrían reducir el costo de los insumos y minimizar el tiempo para que retorne la inversión. En función de ello, Garzón y col. (2023) comentan que la gestión eficaz de las pasturas contribuye a mitigar el cambio climático, ya que la intensificación del sistema conduce a un equilibrio favorable entre las emisiones contaminantes y el secuestro de carbono.

El establecimiento de pasturas para la ganadería DP desde 1940 en las zonas rurales de Venezuela, ocasionó la intervención desmedida del ecosistema mediante disturbios antrópicos como deforestación y mecanización agrícola sin precaución, lo cual trajo como consecuencia la reducción de fertilidad en los suelos y el descenso en la calidad del pasto ofrecido en los potreros; por otro lado, el inadecuado manejo de la carga animal y la selección de especies forrajeras que se adapten a la zona, han limitado significativamente la productividad ganadera a través del tiempo (Faría-Mármol y González, 2008); tal y como ocurrió al sur del Lago de Maracaibo, una de las regiones que aportan más productos de origen animal al país, constituida originalmente por una imponente selva húmeda tropical (SHT) y humedales con distintas condiciones de fertilidad edáfica (Ureña y col. 1997).

La ruta productiva que lleva la ganadería de carne, inicia con una fase de crianza que va desde el nacimiento del becerro, hasta que éste alcanza un peso vivo (PV) entre 120 y 190 kg. en un periodo aproximado de siete meses cuando el ocurre el destete, reclasificándose el grupo etario de becerro lactante a maute; seguidamente, arranca la etapa conocida como “levante” con una duración de 12 meses aproximadamente, cuando el animal alcanza un peso entre 300 y 350 kg.; finalmente, la ceba o engorde abarca otro periodo de 12 meses, tiempo que requiere el animal para acumular 450 kg. de PV o más, considerándose apto para su comercialización (Es-lava-Zapata y Morillo-Moreno, 2005).

La interacción pastura-animal, forma un sistema de producción que por razón ecosistémica mantienen un equilibrio más o menos inestable debido a la intervención del factor humano a través del manejo, las especies forrajeras destinadas al pastoreo y en especial, el tipo de ganado que sobre ellas pastan. La administración del agroecosistema pasturas debe regularizar los indicadores de las dimensiones del desarrollo sostenible (económico, social, ecológico) para satisfacer las necesidades del mercado moderno, el cual demanda mayor productividad en medio del criterio práctico de sostenibilidad (Carreira y col. 2023).

Cardoso y col. (2020) explican que para alcanzar los estándares de sostenibilidad en ganadería bovina, se debe optimizar el uso de las pasturas y reducir la dependencia de alimento concentrado; sin embargo, Jayasinghe y col. (2022) afirman que las gramíneas del trópico utilizadas para pastoreo son fotosintéticamente más eficientes, es decir, poseen mayor tasa de crecimiento y producción de materia seca con respecto a las gramíneas de clima templado, por esta razón las zonas agroecológicas con mayor precipitación como la selva húmeda tropical, reportan alta biomasa forrajera para pastoreo, la cual, bien manejada, permite garantizar un adecuado rendimiento animal durante el año.

Para Londoño-Franco y Álvarez-Molina (2011) el pastoreo se refiere al consumo de biomasa vegetal realizado por el animal directamente sobre la superficie delimitada (potrero) para tal fin. A nivel práctico, el sistema de pastoreo es una importante herramienta de manejo para los sistemas DP, puesto que permite ejercer control sobre la utilización del recurso pastura; para ello se dispone de dos sistemas: *pastoreo continuo*, el cual consiste en mantener el rebaño de animales en el mismo potrero por largos periodos de tiempo, generándose algunos inconvenientes ecológicos como la constante defoliación, el crecimiento de arvenses, dificultad de la planta para renovarse y el excesivo pisoteo que acelera la degradación de las pasturas. Por su parte el *pastoreo rotacional*, consiste en utilizar varios potreros de área similar por tiempos iguales de ocupación, dejando un periodo de descanso para la recuperación de la zona pastoreada, permitiendo así, aprovechar la oferta de fitomasa por reducir el pisoteo y contaminación del pasto por las deyecciones de los animales.

La importancia de determinar la ingesta aproximada de forraje en un grupo de animales resulta clave para determinar su eficiencia biológica debido a que los herbívoros varían de tamaño y estado fisiológico con requerimientos nutricionales e ingesta diaria de forraje muy específicos, dejando claro que, la relación entre el tamaño del animal, así como su capacidad para consumir forraje, fijan el grado de sustentabilidad en las pasturas (Da Silva y col. 2013). Santos y col. (2017) compar-tieron un cálculo para determinar el número de animales que van a pastorear un área, le llamaron *presión de pastoreo* (PP), la cual se refiere a los kilogramos de PV por kilogramo de materia seca (MS) disponible por día.

Para Chacón-Rivas (2013), otro de los conceptos importantes para comprender la dinámica entre la oferta forrajera y el consumo de MV y MS es la *carga animal* (CA), un valor que establece la relación entre las unidades animales (UA) y la superficie de pastoreo (ha), es decir, $CA = UA/ha$; donde el valor de la UA se ubica (ganadería mestiza) en 400-450 kg de PV o una vaca; al respecto, Scarnecchia (1985) recomienda hacer los ajustes porcentuales a partir del valor asumido de la UA para los grupos etarios restantes, en otras palabras, si una UA equivale a 400 kg., un animal con PV igual a 200 kg. equivaldría al 50% del valor de la UA.

La relación entre CA y ganancia de peso/animal es lineal: $Y_a = a - bx$, donde: Y_a = ganancia de peso/animal, a = intercepto (constante), b = pendiente (constante), y x = CA. Como consecuencia, la relación entre ganancia/ha. y CA es cuadrática: $Y_h = ax - bx^2$; en tal sentido la CA que sugiere mayores ganancias de peso/ha puede definirse a partir de la ecuación: $x = a/2b$, mientras que cuando la ganancia/animal se hace cero, la carga animal alcanza el doble de aquella (CA no óptima), correspondiente a la máxima ganancia/ha (Chacón-Rivas, 2013), en concreto, mientras hayan menos animales o el valor de la CA esté ajustado al área de pastoreo y la especie vegetal utilizada, habrá mejor utilización del forraje sin afectar el estado metabólico, energético y proteico de los bovinos con el menor impacto ecológico sobre el agroecosistema (Ruiz-Albarrán y col. 2016).

En los últimos años, la mayoría de investigadores del área agronómica coinciden en resaltar las debilidades en el sub-sistema pasturas, específicamente todo lo referido al manejo de potreros y la utilización del recurso vegetal, lo cual afecta negativamente los indicadores productivos en las fincas, además, el manejo adecuado del pasto requiere la comprensión de eventos biológicos en la actividad ganadera entre los sub-sistemas, pues el pastoreo de ganado es el factor más importante que configura y estabiliza la biodiversidad del agroecosistema (Wróbel y col. 2023). Las comparaciones prácticas de posibles escenarios y su respuesta durante el pastoreo son difíciles de realizar debido a la variabilidad natural de las unidades experimentales; para ello, la simulación dinámica surge como una estrategia técnica que permite evaluar y controlar los efectos que ejercen los planes de pastoreo sobre la conservación de pasturas a futuro.

Bajo este enfoque sistémico, es posible describir la variación a través del tiempo de las entidades del sistema y sus interacciones, permitiendo una mejor comprensión del intercambio de información entre los componentes del sistema y una representación gráfica-funcional mediante paquetes informáticos que generan modelos dinámicos de simulación (Bahamonde y col. 2014).

Tomando en cuenta que una estrategia es definida por Cros y col. (2004) como un plan de ruta en la ejecución de tareas técnicas previstas durante un período de evaluación; el modelado permite evaluar el posible impacto de las decisiones sin ejecutarlo en el mundo real, siempre orientado hacia un objetivo que permita estructurar los entes que conforman el sistema. Para ello Rice y col. (1983) comentan que los principios para crear los componentes que estructuran un modelo de simulación capaz de recrear el pastoreo de ganado vacuno, se fundamentan principalmente sobre tres propósitos: a) predecir la productividad del sistema; b) evaluar los efectos del manejo experimentado; y c) transferir los resultados de la investigación a otros agroecosistemas de la zona.

Aunque no se acostumbra con regularidad el uso de modelos dinámicos en la ganadería, trabajos presentados por Cros y col. (2004); Castellaro y col. (2007); Cunha y col. (2010); Rotz y col. (2013); Negassa y col. (2015); Smith (2022) y Aherin y col. (2023) permiten concluir que todas las soluciones para la problemática de improductividad en la ganadería de carne vacuna, deben basarse en sólidos conocimientos científicos como el modelado y la simulación, una práctica moderna que permite representar las complejas interrelaciones entre el animal y el consumo de pasto, haciendo posible identificar los puntos de optimización para el mínimo costo y máximo beneficio en medio de un mundo globalizado que dirige sus intereses en el negocio pecuario para controlar las emisiones de gas metano, aumentar la productividad, sostenibilidad y bienestar animal en la cadena productiva.

El objetivo del trabajo fue proponer un modelo de simulación que explique la dinámica básica del pastoreo en condiciones del trópico venezolano y las características biológicas del componente animal, utilizando valores para el rendimiento de la fitomasa e ingesta sugeridos por la literatura, tomando como referencia la eco-región del sur del Lago de Maracaibo-Venezuela y el patrón ganadero (grupos etarios y peso vivo) de levante y ceba que tradicionalmente se emplea en la zona. De esta manera, el productor podrá predecir los días máximos que su rebaño puede permanecer en un área determinada sin agotar el recurso forrajero y garantizando la ganancia de peso en los animales.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del modelo

Isea (2008) afirma que las unidades de producción bovina en Venezuela, específicamente las dedicadas a surtir el mercado cárnico, poseen diferentes modalidades de operatividad; sin embargo, la mayoría de productores centran sus

prácticas zootécnicas bajo el patrón de manejo vaca-becerro, es decir, las vacas son ordeñadas en su mayoría y los becerros al culminar el periodo de lactancia son adquiridos por otros ganaderos, los cuales se concentran en la cría (levante) de estos animales a partir del destete (120 kg PV) hasta alcanzar 350 kg de PV con el propósito que otro productor culmine el ciclo productivo (>480 kg PV), aunque la mayoría de ganaderos cumplen con el levante y ceba de sus animales mediante la fijación de metas realistas para asegurar la productividad sostenible a través del tiempo en su unidad económica.

Estos sistemas de producción desarrollan sus actividades bajo escenarios complejos que requieren analizar los diferentes componentes que lo integran, sus relaciones y racionalidad con la que se manejan los recursos disponibles, a fin de lograr un conocimiento integral de la dinámica (Calvano y col. 2022). En la Fig. 1 se ilustra la estructura básica de un sistema aplicado a la producción de ganado vacuno durante el levante y ceba.

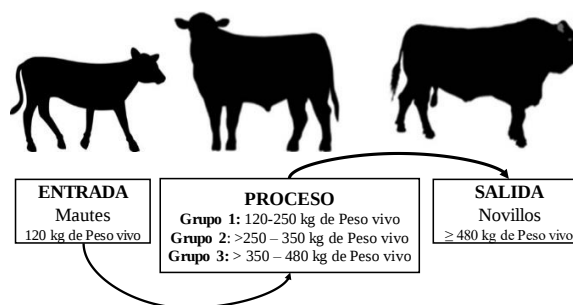


Fig. 1. Esquema del sistema de producción levante y ceba de ganado vacuno.

El modelo conceptual describe la representación lógico-matemática de la realidad que se quiere modelizar, por tanto, reconocer el marco teórico del sistema productivo resulta fundamental para dar inicio a la planificación de actividades inherentes al manejo del predio; al respecto, Peña y Materán (2005), afirman que la planificación es un proceso organizador capaz de pronosticar los posibles eventos asociados a los recursos productivos que ofrecen o demandan las pasturas, el rebaño e incluso la infraestructura.

En este sentido, Insua y col. (2019) explican que el monitoreo sistemático de la cantidad y calidad de los pastos es importante para garantizar una oferta de forraje nutricionalmente adecuada; de manera que, controlar la dinámica del pastoreo es una forma práctica de programar rotaciones y asignar el potrero más adecuado para pastorear, según la necesidad de consumo que se necesita para maximizar la rentabilidad que hoy promueve la ganadería sostenible con el fin de mejorar los parámetros de bienestar animal, liquidez económica, biodiversidad y calidad del producto.

En la Fig. 2 se presenta un diagrama que expone la dinámica conceptual de animales en pastoreo. Este modelo compila los componentes hallados en la mayoría de modelos de simulación dinámica referidos al pastoreo publicados en la literatura especializada, aunque simplificado, evidencia la manera en que los herbívoros interactúan con el ambiente para obtener nutrientes y cómo estos son metabolizados.

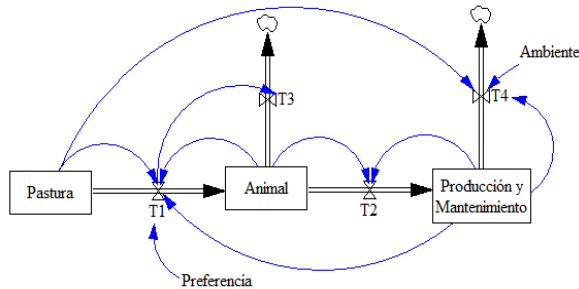


Fig. 2. Modelo de Forrester para simular el pastoreo según Walker, (1993).

En función de lo expuesto, se propone desarrollar un modelo de simulación dinámica cuyo propósito es facilitar la toma de decisiones con respecto al manejo básico de las pasturas en unidades de producción dedicadas al levante y ceba de vacunos mestizos (*Bos taurus* x *Bos indicus*) a pastoreo en el sur del Lago de Maracaibo, Venezuela para lo cual se identificaron las variables clave que definen la dinámica de este evento productivo. De igual forma se graficaron las principales interacciones entre los compartimientos que definen la actividad del pastoreo rotacional, donde la complejidad del sistema se resume en una función que involucra la interacción de los factores que controlan las tasas de transferencia entre compartimientos y fuentes o sumideros. Para llevar a cabo la simulación, se utilizó el software Vensim® DSS Professional versión 9.1.1, utilizando datos obtenidos por investigadores del área en experiencias previas.

2.2. Supuestos del modelo

El modelado matemático de las propiedades dinámicas de los sistemas biológicos se considera una forma muy eficaz de ilustrar la comprensión de los procesos biológicos y resaltar los aspectos más importantes de ellos, es decir, el uso cuidadoso de las suposiciones simplificadas resulta crucial para que los modelos biológicos sean comprensibles, ajustables y al mismo tiempo, representativos de la dinámica central del sistema. La presente propuesta no desarrolla la simulación de los componentes humano, ecofisiológico vegetal, fisiológico animal y edáfico, se limita al modelo físico-biológico del pastoreo.

El modelo dinámico desarrollado se centró en la utilización de pasturas como base alimentaria del ganado; se trata de un modelo que opera de manera determinista con un paso de tiempo diario (ajustable para mayor precisión) capaz de hacer frente a una variación cotidiana sobre la disponibilidad del pasto, superficie a pastorear, peso promedio de los ani-

males, oferta máxima de materia verde y época (lluvia o sequía); en cuanto a esto, Resat y col. (2011) señalan que el carácter multiescala de las dinámicas naturales y la estocasticidad de los procesos biológicos aún presentan desafíos operativos y conceptuales, es por ello que los investigadores del área, recomiendan su aplicabilidad *in situ*, solo así, en este caso, es posible conocer con mayor precisión el tiempo ideal de permanencia en el potrero que se seleccione. La construcción del modelo se basó en simular los resultados productivos de una explotación semi-intensiva bajo pastoreo rotativo, consumo teórico diario en potrero, porcentaje de pérdida por excretas y pisoteo, la tasa de crecimiento de la pastura y otras variables biológicas de interés para la dinámica pastoril. Se consideró un predio con ganado vacuno mestizo sano, sin amenaza de predadores ni mortalidad durante el ciclo productivo por ser una propuesta en evaluación.

Los productores adquieren mautes de 120 kg PV promedio, con una ganancia de peso diaria teórica estimada en 0,6 kg/animal/día y 480 kg de PV para el sacrificio tal y como consta en la revisión expuesta por Costa y col. (2021); por otra parte, la altura del pasto en que los animales mantienen peso varía según la oferta de MV, se tomó como patrón referencial una altura promedio de 20 centímetros (cm) para el ingreso de los animales a los potreros, siguiendo las recomendaciones prácticas de Gomes-Rodrigues y col. (2021) y Marín y col. (2022). Por su parte Jones y col. (2017) comentan que simular sistemas pecuarios resulta complejo al momento de representar las funciones biológicas y sus interacciones en el modelo (Fig. 3).

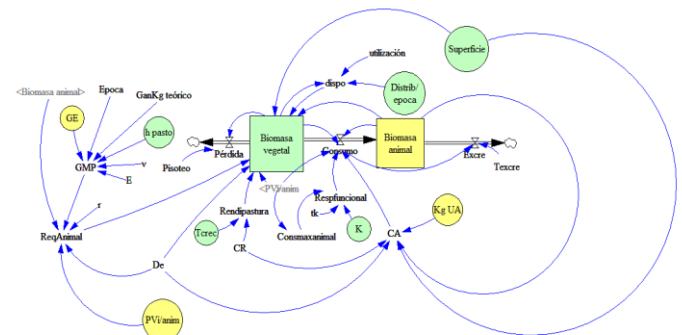


Fig. 3. Diagrama de Forrester propuesto para simular el pastoreo de ganado vacuno. Modelo desarrollado en Vensim® DSS Professional. Variables en cuadrado son modificadas con regularidad según sea el caso. En color verde se asignó a parámetros asociados al recurso forrajero y, de color amarillo se refieren al componente animal.

Koopmans y Youk, (2021) explican que el modelado de sistemas biológicos requiere la elección de una jerarquía de categorías predefinidas y relaciones entre ellas con el propósito de seguir una metodología clara que ayude a resaltar deficiencias no deseadas.

La complejidad de un sistema surge de tres factores: la cantidad, la variedad y la interconectividad de sus elementos constitutivos. Los sistemas vivos suelen ser de alta dimensión, no lineales y gobernados por componentes variables;

ésta complejidad funcional amerita el uso de ecuaciones diferenciales que se adapten a cada sistema, sin embargo, el uso de parámetros absolutos solo se limita a modelar unos pocos procesos intracelulares, resultando imposible incluir cada detalle, muchas veces desconocido, que dinamizan los procesos fisiológicos en cualquier sistema biológico, pero, con el ajuste de estas ecuaciones, es posible obtener resultados próximos a la realidad, en este caso, para simular el proceso de crecimiento animal durante el pastoreo, se emplearon factores de corrección y constantes biológicas derivadas de ajustes estadísticos sugeridos en la literatura especializada que se describen en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Parámetros asociados al manejo de pasturas tropicales*

Variable	Símbolo	Valores referenciales	Referencia
Altura del pasto pre-consumo	h pasto	Baja ≤ 10 cm Media= 20 cm Alta ≥ 20 cm	Dieguez y col. (2012) Montossi y col. (2013)
Grupo etario	GE	Mautes= 0,5 Novillos= 0,75 Novillos ≥ 400	Chacón-Rivas, (2013)
Época	Época	Lluvias=1,1 Sequía=1	Dieguez y col. (2012)
Unidad Animal Bovina	UAB	Mautes= 0,5 Novillos= 0,75	Díaz-Díaz, (2010)

*Para el momento de la simulación, el productor debe seleccionar el valor que asume cada variable según el caso.

Tabla 2. Constantes sugeridas para el agroecosistema pasturas tropicales

Variable	Símbolo	Valor	Referencia
Ciclo de rotación (días)	CR	28	Villalobos y Arce, (2013)
Constante de ajuste biológico	E	132	Dieguez y col. (2012)
	v	0,24	
	r	0,025	Andales y col. (2005)
Día estándar*	De	1	-
Distribución por época**	Distrib/época	0,45	-
Factor de corrección asociado a la respuesta funcional animal	tk	0,55	Martínez, (2006)
Kilogramos (kg)/Unidad Animal (UA)	kg UA	400	Scanecchia, (1985)
Tasa de pisoteo	Pisoteo	0,30	Díaz-Díaz, (2010)
Tasa de crecimiento de la pastura	Tcrec	0,018	Fernández y col. (2001)
Tasa de excreción	Texcre	0,46	Sossa y col. (2015)
Tasa de utilización de la pastura	Utilización	0,60	FHJC, (2004)
Máxima ganancia diaria de peso/animal (kg)	Gankg/d teórico	0,6	Montiel, (1994)

*Valor arbitrario que se utiliza para evaluar la demanda diaria de MV por parte de los animales.

**Valor empírico tomado a partir de experiencias en campo.

Tabla 3. Variables definidas por el productor al momento de la simulación

Variable	Símbolo	Observación
Biomasa animal (kg)	Biomasa animal	Se multiplica el número de animales por el PV promedio
Biomasa vegetal (kg)*	Biomasa vegetal	Valor calculado en campo que representa la MV ofertada
Peso vivo inicial (kg)	PVi	Promedio de PV en el grupo de animales
Producción máxima de MV por la pastura (kg) **	K	Valor máximo de oferta forrajera que posee la pastura

*Se asumió un valor de 14.635,2 kg de MV a partir de los resultados documentados por Jarma-Orozco y col. (2012).

**Se utilizó un porcentaje arbitrario de incremento máximo de MV del 5% de acuerdo a estimaciones de productores del sur del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Cada variable de nivel (Biomasa vegetal y biomasa animal) utiliza una función de transición que permite proyectar la dinámica del pastoreo a partir de las siguientes fórmulas:

Carga animal (Carles, 1981):

$$CA = \frac{\text{Biomasa animal (kg)} * De}{\text{kg UA} * \text{Superficie} * CR} \quad (1)$$

Consumo estimado por animal (Barrera y col. 2004):

$$\text{Consmaxanimal} = PVi * 0.1 \quad (2)$$

Ganancia meda de peso diaria (Dieguez y col. 2012):

$$GMP = \left(\frac{\text{GanKg teórico} (E * e^{-v * h \text{ pasto}})}{92 * \left(\frac{\text{Época}}{GE} \right)} \right) * (-1) / 100 \quad (3)$$

Rendimiento de materia verde (Carles, 1981):

$$\text{Rendipastura} = CR * Tcrec \quad (4)$$

Respuesta funcional animal (Martínez, 2006):

$$\text{Respfuncional} = (\text{Consmaxanimal}) * \left(1 - \exp \left(- \frac{K}{tk} \right) \right) \quad (6)$$

Para la variable consumo, se utilizó la función de Ven-sim® DSS IF THEN ELSE con el propósito de agrupar, segmentar y/o condicionar los resultados. La abreviatura “NA” indica el número de animales, este valor se calculó dividiendo la Biomasa Animal entre el PVi (kg.).

Consumo:

$$\text{Consumo} = \text{IF THEN ELSE} (\text{Biomasa vegetal} > (\text{Respfuncional} * NA * \frac{CA}{1000}), \text{Respfuncional} * (NA * \frac{CA}{1000}), \text{Biomasa vegetal}) \quad (7)$$

Pérdida de MV por pisoteo:

$$\text{Pérdida} = \text{Biomasa vegetal} * \text{Pisoteo} \quad (8)$$

Excreción animal:

$$\text{Excre} = \text{Consumo} * (1 - \text{Texcre}) \quad (9)$$

2.3. Prueba del modelo

Para la evaluación conceptual del modelo, se siguió la metodología de Castellaro y col. (2007) y el método de integración Runge-Kutta (respuesta precisa rápidamente), tomando en cuenta el componente animal y su efecto sobre la oferta de MV, teniendo en cuenta el incremento de peso desde el ingreso al potrero hasta su salida. Durante las pruebas de simulación, se consideró la apreciación de productores dedicados a la actividad ganadera para discutir en tiempo real, la compatibilidad de los datos obtenidos en experiencias previas; igualmente, los resultados fueron comparados con otros reportes disponibles en la literatura.

2.4. Análisis de sensibilidad

Para verificar la viabilidad práctica de la simulación, se realizó el análisis de sensibilidad (AS) con el objeto de procurar robustez y credibilidad al modelo propuesto (Plata-Rocha y col. 2013). Se evaluó la sensibilidad a los cambios producidos ante modificaciones de $\pm 10\%$ siguiendo la sugerencia de Bahamonde y col. (2014) en los parámetros superficie, peso vivo individual promedio (animal), porcentaje de utilización de la pastura y el valor de la unidad animal bovina en kg., descritos en el escenario 1 por ser las variables determinantes para la biomasa vegetal y animal (niveles), ambos elementos considerados como clave del pastoreo

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan datos utilizados como valores de prueba necesarios para la evaluación conceptual del modelo sugerido, los cuales corresponden a la dinámica pastoril en una unidad de producción (pequeño y mediano productor) dedicada al levante y ceba de vacunos en el sur del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Escenario teórico 1: Pastoreo intensivo

Se cree que la intensidad del pastoreo tiene un impacto sobre el almacenamiento de carbono edáfico, pues un sistema intensivo tiene el potencial de modificar la estructura, función y capacidad del suelo para almacenar carbono orgánico, pero al no regularizar el consumo a nivel de potrero, la pastura, más que un sumidero, se convertiría en fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (Abdala y col. 2018).

Tabla 4. Datos correspondientes al escenario 1

Nº de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
200	140	Mautes (50%)	400	28.000	14.635,2	2.800,00	0,5

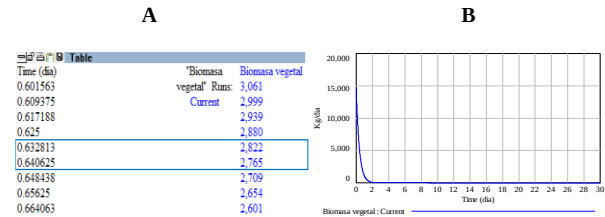


Fig. 4. Respuesta de la variable (nivel) Biomasa vegetal en un área de 0,5 ha pastoreada por 200 mautes de 140 kg de PV promedio cada uno. A. Imagen de la tabla generada con un time step (tiempo del paso) igual a 0,007812. B. Gráfica que indica el agotamiento del recurso forrajero a través del tiempo.

En la Fig. 4 se observa que el rebaño de mautes cuyas características generales expuestas en la Tabla 8, puede permanecer en el potrero hasta aproximadamente 0,633 días, equivalente a 15,19 horas de pastoreo efectivo o 1 día (se adicionan las horas invertidas en rumia, caminata y consumo de agua), de lo contrario, la cantidad de materia verde (MV) necesaria para cubrir la exigencia por parte del rebaño (2.800 kg MV) se agotaría, generando un sobre o excesivo pastoreo, que crearía un escenario de disminución en la capacidad de rebrote por parte de las plantas forrajeras e incremento de arvenses (malezas), coincidiendo con Enríquez-Quiroz y col. (2021) en su revisión sobre experiencias de pastoreo en Latinoamérica.

Rahmanian y col. (2020) recuerdan que predecir y comprender la respuesta de la vegetación a los cambios ambientales y uso de la tierra, se ha convertido en una preocupación importante en investigaciones ecológicas recientes. En la mayoría de sistemas ganaderos con pasturas, las precipitaciones y el pastoreo son los factores más importantes que precisa la diversidad de especies y el funcionamiento del ecosistema, pues la reducida cobertura vegetal con poca diversidad de plantas forrajeras aumenta la susceptibilidad del agroecosistema a los efectos del cambio climático.

De igual forma Centeri, (2022) se refiere al sobrepastoreo como una actividad severa de defoliación que dificulta considerablemente la recuperación de la pastura y facilita el establecimiento de componentes arbustivos indeseables que condicionan la sostenibilidad del agroecosistema. Wasim y col. (2023) afirman que el periodo de ocupación o días de pastoreo deben ajustarse a tiempos cortos, de manera que la ingesta de pasto ofertado pueda cubrir la necesidad del ganado sin comprometer por sobrepastoreo las reservas energéticas de la pastura.

Uno de los problemas que figuran como punto crítico de sostenibilidad en la ganadería vacuna DP, es el manejo del pastoreo debido a la participación de factores atribuibles a la pastura y al animal, debido a que en ambos elementos biológicos es difícil estimar o predecir su efecto sobre la productividad para enmarcarlos en un patrón constante; no obstante, Baldini y col. (2020) subrayan que es importante considerar

qué estrategias se pueden utilizar para reducir la huella ambiental que generan los rumiantes a pastoreo.

Para Pererira y col. (2022) plantear estrategias más sostenibles permite a los sistemas de producción ganadera evolucionar continuamente dentro de las pasturas, mejorando su salud y permitiendo la prestación continua de múltiples servicios ecosistémicos, también, se incluye otros factores determinantes de la sostenibilidad productiva y ambiental como la adecuada estimación del consumo de nutrientes durante el pastoreo. Por su parte Smith y col. (2021) aseguran que la ingesta, es un fenómeno multifactorial del cual hay pocos estudios sobre su estimación y es un elemento esencial para mejorar la gestión técnica de los rebaños, aunque algunos autores comentan que la cantidad máxima de alimento que puede ser comida por un animal es cuando a éste se le suministra *ad libitum* el pienso, tal y como sucede durante el pastoreo.

El conocimiento científico de los factores que afectan el consumo de los rumiantes es amplio y las herramientas de apoyo a la toma de decisiones para modelar variables específicas como el gasto de energía, pueden abundar en la literatura, pero aún falta la previsibilidad adecuada del consumo de pasto, que sigue siendo un desafío importante. Tedeschi y col. (2019) explican que los animales a pastoreo pueden alterar la composición de su dieta al seleccionar el material vegetal consumido, por lo tanto, es importante determinar el consumo de diferentes fracciones de pastos, actividad está que resulta difícil en la práctica debido a las complejas variables que regulan el apetito y la oferta de forraje. En la Fig. 5 se observa la respuesta simulada del consumo durante el pastoreo del rebaño descrito en la Tabla 8, el cual se mantiene constante mientras es ejercido con mínimas variaciones, hasta su reducción debido al agotamiento de la oferta forrajera.

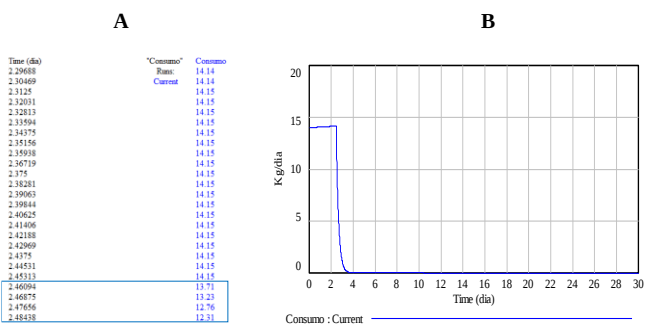


Fig. 5. Comportamiento de la variable consumo durante el pastoreo de 200 mautes de 140 kg de PV promedio cada animal en 0,5 ha. A. Tabla que indica la cantidad de forraje que consume cada animal a medida que avanza su permanencia en el potrero. B. Gráfica que expone el consumo fluctuante de materia verde (MV) hasta su descenso por falta de disponibilidad de MV.

La respuesta del consumo está sujeta al comportamiento del animal, calidad y disponibilidad del pasto, ambiente y sus interacciones, coincidiendo con lo expuesto por Stampa y col. (2020) cuando investigaron sobre metodologías para la estimación del consumo en bovinos a pastoreo. De igual

forma Wasim y col. (2023) concuerdan con la respuesta del consumo en la gráfica de la Fig. 5 (B) al afirmar que la actividad de pastoreo se concentra de forma constante mientras es efectuado, principalmente en horas de la mañana y al final de la tarde cuando la temperatura ambiente es la más baja durante el día (favorable), invirtiendo las horas de mayor radiación solar en rumia y ocio.

Otro reporte más antiguo que justifica el mismo comportamiento, es parte de las conclusiones reveladas por Cordova y col. (1978) luego de efectuar una exhaustiva revisión sobre el consumo de forraje durante el pastoreo de rumiantes, asegurando que, para mejorar la utilización del forraje, es necesario al menos estimar el pasto consumido durante el pastoreo, el cual se mantiene constante durante un período considerable hasta que las condiciones ambientales, la oferta de MV y el apetito lo permita. La respuesta productiva de los animales, traducida en ganancia de peso, está relacionada con el contenido de nutrientes hallados en los piensos disponibles y el hecho de cubrir o no los requerimientos del rebaño. En la Fig. 6 se observa el comportamiento de la biomasa animal durante el pastoreo.

La imagen muestra el incremento de peso por parte del rebaño a medida que consume la pastura disponible; cabe resaltar que en la Fig. 6(A) se muestran valores de biomasa animal crecientes hasta el día 3,54 de pastoreo, a pesar que el tiempo máximo estimado para pastorear la superficie del potrero y evitar sobrepastoreo es 0,633 días, el proceso de crecimiento no tendría ningún factor inhibitor determinante, puesto que la oferta de forraje continúa existiendo en menor proporción y el organismo animal mantiene su mecanismo de multiplicación celular constante; sin embargo, es posible que aparezcan factores inhibidores como el agotamiento total de la fitomasa consumible ocasionando la anulación del crecimiento, una teoría que fue documentada por Doyle y col. (2021).

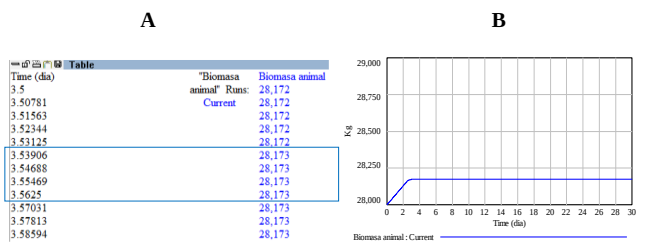


Fig. 6. Respuesta de la variable de nivel biomasa animal ante una oferta de 14.635,2 kg de MV en 0,5 ha pastoreada por 200 mautes de 140 kg de PV promedio por animal. A. Tabla que refleja el momento en el cual se hace constante el valor correspondiente al total de kilogramos que conforman el lote. B. Gráfica que explica el aumento progresivo de peso (kg) del rebaño hasta un punto (3,54 días) donde se hace constante el valor de peso final.

El caso presentado corresponde a un rebaño cuyo peso inicial total es 28.000 kg y culmina su periodo de pastoreo (1 día) con 28.064 kg, lo cual representa una ganancia diaria de peso aproximada de 0,32 g; un valor inferior al reportado por

Montiel, (1994) quien en su evaluación con mautes *Bos indicus* sometidos a pastoreo con suplementación estratégica, cada animal ganó diariamente 0,603 kg y el grupo tratado con agentes anabólicos 0,738 kg en una zona de bosque seco tropical; no obstante Ojeda, (2005) comenta que hembras bovinas púberes mestizas alimentadas exclusivamente con pasturas en el trópico, pueden ganar hasta 0,332 kg al día, valor muy semejante a lo reportado por Velásquez-Mosquera y col. (2015) al evaluar la ganancia diaria de peso en novillos cebú del piedemonte llanero que se ubicó en 0,357 kg por día. Si bien ambos trabajos confirman los valores proyectados por el modelo de simulación propuesto, es evidente que el productor debe incluir una práctica de suplementación, debido a que la oferta de forraje aunque es suficiente de acuerdo al manejo del potrero, la pastura no cubriría las necesidades nutricionales que le permita al animal maximizar su ganancia de peso, en este sentido, Monteiro y col. (2022) recomiendan la incorporación de suplementos tanto alimenticios como parenterales asegurando un correcto balance entre los niveles energéticos y proteicos; sin embargo, gráfica muestra un punto de inflexión donde el aumento de peso se detiene y merma el valor para biomasa animal con un comportamiento constante, difiriendo del informe presentado por Cao y col. (2019) quienes comprobaron mediante ajustes matemáticos que el crecimiento animal sigue una curva sigmoidea a través de la cual, la tasa de crecimiento cambia según la edad y llega a un punto en el que declina a cero; en este punto, se alcanza la asíntota y el animal obtiene el peso maduro; lo cual sugiere puntualizar con mayor especificidad las ecuaciones que nutren el modelo de simulación acá expuesto.

A pesar de la dificultad gráfica Alary y col. (2022) justifican el comportamiento aquí reseñado cuando concluyen que la ausencia de materia verde disponible para el consumo o bajos porcentajes de digestibilidad en piensos consumidos durante el pastoreo, provoca como respuesta fisiológica del rebaño una nula ganancia de peso y, por tanto, resulta insostenible para el sistema de producción animal, arriesgando la rentabilidad del negocio.

Escenario teórico 2: Cambio del área a pastorear

Los datos presentados en la Tabla 5 exponen el escenario descrito en la modelización anterior, pero en este caso se cambió la variable área del potrero, la cual pasó de 0,5 a 2 ha, valor este ajustado al trabajo de Borges y col. (2013) quienes determinaron que el 30% de los sistemas de producción con vacunos en el estado Yaracuy, Venezuela poseen superficies entre 2-5 ha por potrero, lo cual representa una característica estructural que ejerce un importante impacto sobre la productividad forrajera y el control alimenticio del ganado.

Tabla 5. Datos correspondientes al escenario 2

Nº de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
200	140	Mautes (50%)	400	28.000	14.635,2	2.800,00	2,0

En la Fig. 7 se observa el efecto de la superficie del potrero sobre el tiempo requerido para agotar la fitomasa demandada por los 200 mautes experimentales, dicho periodo se extiende de 0,633 días que se señaló en el escenario teórico 1, a 2,55 días, lo cual goza de validez práctica, pues a mayor superficie para pastorear el tiempo de permanencia en los potreros debe aumentar y, por tanto las variables que le acompañan en la simulación igualmente se ven afectadas, reportando un comportamiento semejante al señalado en el caso de potreros cuya superficie era 0,5 ha pero con valores superiores; sin embargo, la variable consumo a pesar de observarse gráficamente similar al escenario 1, el valor que genera el programa para la ingesta de pasto cambia abruptamente y es explicado detalladamente en el escenario 3, que consiste en contrastar la respuesta del consumo frente a tres superficies de pastoreo.

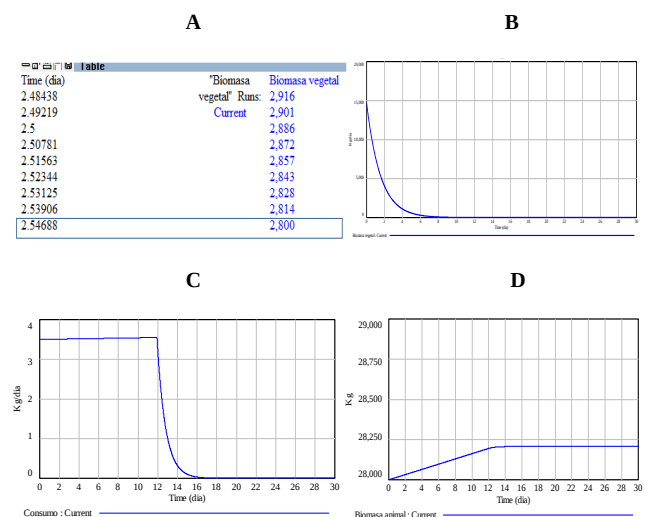


Fig. 7. Respuesta de las variables determinantes del pastoreo de 200 mautes con peso promedio de 140 kg. cada uno en 2 ha bajo un time step (tiempo del paso) igual a 0,007812. A. Tabla que señala como tiempo máximo de permanencia en el potrero de 2,5 días. B. Gráfica correspondiente a la oferta de biomasa vegetal. C. Gráfica que evidencia el consumo de MV por parte del rebaño. D. Comportamiento de la biomasa animal.

Escenario teórico 3: Diferentes dimensiones a pastorear

Rodríguez y col. (2011) comentan que, a pesar de existir varias estrategias para el manejo de las pasturas, el método de pastoreo rotacional que incluye la reducción de permanencia del ganado en el potrero y superficies más pequeñas de los mismos, influyen positivamente sobre la productividad integral de la granja. Para corroborar ésta premisa, en la Fig. 8 se exhiben tres escenarios donde se evalúa mediante modelización dinámica, la variable consumo en un rebaño de mautes pastoreando potreros de 0,5; 1 y 2 ha.

Los datos evidencian que el aumento de la superficie pastoreada condiciona la oferta de pasto disponible para el consumo, es decir, si un animal, en teoría, debe consumir el 10% de su peso vivo (PV), logrará este valor en potreros más pequeños con menor tiempo de permanencia. En la Fig. 8 (A) se demuestra que un maute de 140 kg de PV logra consumir

la cantidad de pasto que requiere diariamente (14 kg de MV) permaneciendo 2,43 días pastoreando en 0,5 ha, a partir de allí, el consumo se reduce y no satisface la necesidad nutricional, lo cual condiciona la ganancia de peso y otros parámetros de productividad.

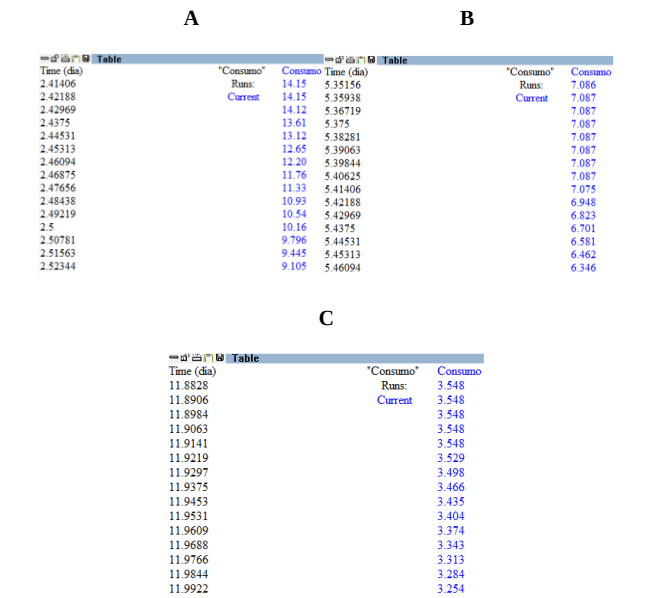


Fig. 8. Comportamiento del consumo durante el pastoreo de 200 mautes con peso promedio de 140 kg. cada uno bajo tres superficies de potrero utilizando un time step= 0,007812. A. 0,5 ha. B. 1 ha. C. 2 ha.

Para los eventos planteados en la Fig. 8 (B y C), al incrementarse la superficie destinada para pastorear y, a pesar que permite mayor tiempo de permanencia del rebaño en el potrero, los animales no ingieren la cantidad de pasto diaria que demanda su peso, esto ocurre porque ante áreas tan grandes, los animales pastan el forraje de manera más selectiva, lo cual obligaría al productor a incluir mayor volumen y efectividad del suplemento nutricional del tradicionalmente utilizado, generando un incremento considerable e insostenible en los costos de mantenimiento del ganado. Al respecto Khatri-Chhetri y col. (2022) confirmaron en su trabajo, que los potreros de gran tamaño requieren de prolongados tiempos de descanso para no afectar la comunidad microbiana del suelo, las funciones del ecosistema y las exigencias ecofisiológicas del pasto, ya que ocurriría la maduración en algunas áreas del potrero y en otras no, esto se traduce a través del tiempo en baja calidad nutricional, menor consumo y reducción significativa en la eficiencia de utilización del recurso forrajero.

Escenario teórico 4: Ausencia de animales pastoreando

Una práctica económica común en la zona sur del Lago de Maracaibo es la presencia de fundos dedicados a la compra-venta de animales, que consiste en la llegada de rebaños a la unidad de producción y su comercialización en corto tiempo (Anido y Mora, 2008). Aunque no ocurre con frecuencia, es posible que la finca en algún momento no cuente con la presencia de ganado porque todos los animales han

sido comercializados. En la Fig. 9 se exponen las variables estudiadas en la dinámica pastoril en ausencia de animales.

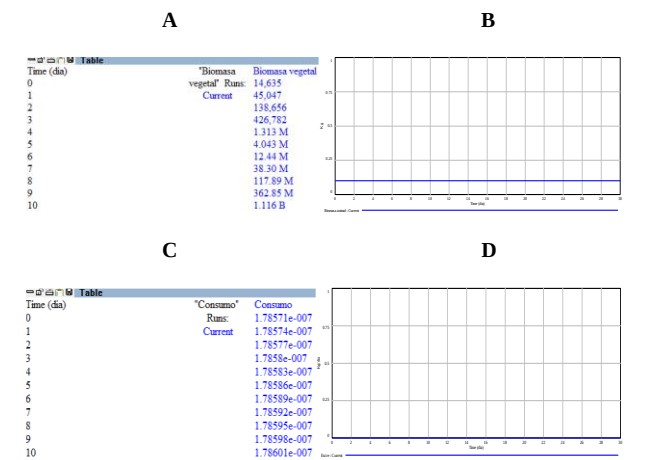


Fig. 9. Variables asociadas a la dinámica pastoril en ausencia de animales pastoreando. Time step=1. A. Aumento de la fitomasa (pastura y arvenses). B. Biomasa animal constante sin incremento. C. Consumo negativo. D. Excreción no reportada en la gráfica debido a la no permanencia de vacunos pastoreando.

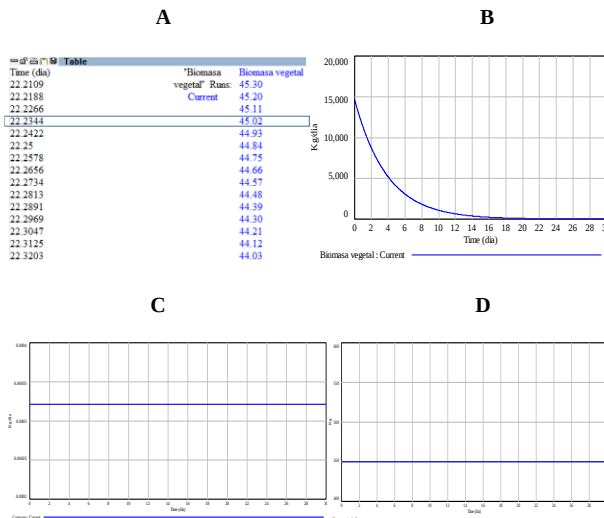
El pastoreo puede influir directamente en el crecimiento de los tejidos vegetales más jóvenes. En el caso presentado, el valor de la biomasa vegetal se incrementa exponencialmente al no existir consumidores superiores, una respuesta ecosistémica validada por Ritchie y Penner, (2020) quienes consideraron que ante la herbivoría episódica ocurre una importante acumulación de biomasa forrajera, lo cual provoca cambios en la composición florística, abundancia de las diferentes formas de vida, así como la estratificación vertical de la fitomasa y su biovolumen. Por otra parte, se puede observar el descenso acelerado (valor negativo) del consumo, debido a que aumenta la oferta de biomasa vegetal pero no hay consumidores; mientras que la biomasa animal sencillamente está constante asumiendo un valor de cero por la ausencia de animales pastoreando y, evidentemente los productos de excreción (heces y orina) no son percibidos por el modelo de simulación.

Escenario teórico 5: Sub-pastoreo

Para Cruz y col. (2023) las unidades de producción bovina DP en países poco desarrollados con Venezuela, gradualmente han pasado de ser extensivos a dominar otros sistemas semi-intensivos, los cuales se caracterizan por su deficiente aprovechamiento del recurso forrajero natural, particularmente el cálculo de la carga animal ideal, sobre y sub-pastoreo que conllevan al dominio de malas hierbas que condiciona la persistencia del recurso forrajero con pérdida en la productividad general del sistema. En la Tabla 9 se presentan los datos correspondientes a un escenario de sub-pastoreo, en este caso, utilizando un novillo de 450 kg de PV al que se le han dispuesto 5 ha para pastorear, y en la Fig. 10 se ilustra a partir de dichos datos la respuesta de las variables mediante simulación.

Tabla 9. Datos correspondientes al escenario teórico 5

N° de animales	PVi (kg)	Grupo etario (Valor %)	Kg UA	Biomasa animal (kg)	Biomasa Vegetal (kg)	Biomasa vegetal requerida (kg)	Área (ha)
1	450	Novillo (75%)	450	450	14635,2	45	5

**Fig. 10.** Dinámica pastoril de un animal con 450 kg PV. en 5 ha. Time step=0,007812. A. Tiempo requerido por el animal para agotar la biomasa vegetal. B. Gráfica que corrobora el tiempo para consumir la fitomasa forrajera. C. Consumo constante. D. Comportamiento constante y, por tanto, insostenible de la biomasa animal.

Se observa mediante modelización que el animal requerirá de 22,24 días para defoliar la MV ofertada en función de su requerimiento diario, un consumo constante y nula ganancia de peso; este último dato no posee sustento biológico, puesto que independientemente del número de animales se debe incrementar el peso; sin embargo, en la gráfica se evidencia un comportamiento constante de la biomasa animal, un caso en el cual Sessim y col. (2020) sugieren que se trata de un estado con limitada eficiencia biológica y, por tanto, económicamente inviable e insostenible.

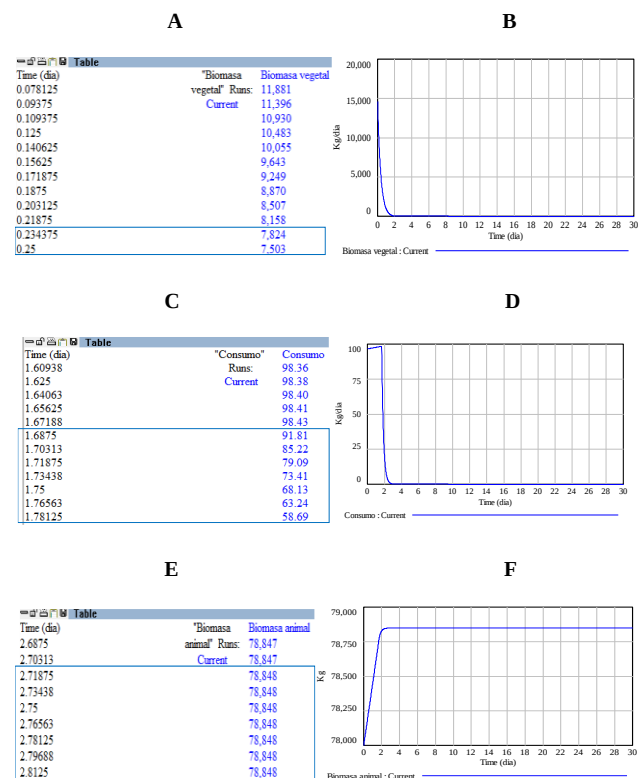
El sub-pastoreo conlleva al crecimiento excesivo de la biomasa vegetal, tanto las plantas no consumidas por el animal como especies forrajeras, las cuales se vuelven menos palatables y nutritivas debido a la lignificación prolongada, en otras palabras, es un agente causante de degradación debido a que genera cambios en el complejo ecosistémico suelo-planta-animal por la disminución de la calidad del forraje (Wang y col. 2019).

Escenario teórico 6: Sobrepastoreo

En la Fig. 11 se ilustra otra de las situaciones de insostenibilidad comúnmente halladas en fincas ganaderas: el sobrepastoreo. En este caso se utiliza igual cantidad de animales a lo expuesto en el escenario teórico 1 y 2, pero animales con mayor peso promedio (390 kg) y 75% del valor de la unidad animal bovina (novillos), observándose la intensa presión de pastoreo que conlleva al consumo de la fitomasa forrajera en muy corto tiempo (0,234 días), también, un breve consumo

constante de las estructuras vegetales palatables y en el caso de la biomasa animal, el valor deja de incrementarse a los 2,7 días, donde es inmodificable la dinámica del incremento de peso.

Las gráficas generadas durante la simulación, evidencian una baja acumulación de biomasa vegetal y, por tanto severa infiltración del agua complicada con la compactación en el suelo que favorecen los procesos erosivos, una respuesta confirmada por Khatri-Chhetri y col. (2022) quienes enfatizan que los procesos relacionados a la explotación ganadera, generan impactos ambientales adicionales a aquellos disturbios naturales que transforman el paisaje, donde la intensidad del pastoreo sin control con alta carga animal (sobrepastoreo) produce una profunda modificación en la estructura de la comunidad vegetal.

**Fig. 11.** Dinámica del pastoreo de 200 novillos de 390 kg PV promedio cada uno tomando en consideración un valor porcentual de la UAB=75% (0,75) y 450 kg. en 0,5 ha. Time step=0,015625. A. Tabla que expone el tiempo necesario para agotarse la oferta de biomasa vegetal requerida por el rebaño. B. Agotamiento de la oferta forrajera durante el pastoreo. C. Reducción del consumo de MV debido al sobrepastoreo. D. Gráfica que evidencia el consumo creciente de MV en el tiempo hasta el agotamiento de la fitomasa forrajera. E. Tabla que indica el momento en el cual se hace constante. F. Gráfica que explica el incremento de peso hasta que se limita el consumo por la inexistencia de fitomasa forrajera.

Análisis de sensibilidad (AS)

Cuando fueron modificadas las variables peso vivo inicial y porcentaje teórico de utilización del pasto, se observó que la respuesta del modelo permaneció sin alteración alguna, pero, al ejercer cambios en el valor UAB (kg), ésta sólo impactó sobre el nivel biomasa animal; sin afectar la biomasa vegetal;

aunque, al variar el valor de la superficie, ambos niveles del modelo respondieron al AS, lo cual permite afirmar que el área de pastoreo es el punto de partida para la planificación sustentable de la rotación del ganado en los potreros, es decir, la toma de decisión sobre el tipo, cantidad y peso vivo inicial de los animales que se pretendan adquirir para cualquier unidad de producción, debe ajustarse a la superficie destinada al pastoreo, tal y como lo recalcan Díaz-Díaz, (2010) y Borges y col. (2013); igualmente Monte y col. (2023) recuerdan que el pastoreo rotacional parte de uniformizar el tamaño de los potreros, ya que se considera una forma tecnificada para hacer más eficiente el uso de las pasturas; igualmente, es posible organizar la dinámica de consumo según los requerimientos nutricionales del rebaño. En función de lo expuesto, queda explícito que, para garantizar sostenibilidad y resiliencia, los ecosistemas pastoreados deben gestionarse mediante una planificación que evite la sobrepoblación y el pastoreo excesivo.

En las Fig. 12 y 13 se muestran las gráficas de sensibilidad que involucran las cuatro variables auxiliares consideradas, puesto que los cambios significativos en el comportamiento general del sistema no ocurren para todos parámetros, al respecto, se evidenció que, ante los ajustes realizados sobre dichas variables, el modelo lució estable, pues la trayectoria de la línea que explica el comportamiento del nivel (color azul) a través del renglón color amarillo, corresponde al 50% de incertidumbre. Los modelos de dinámica sistémica son en general insensibles a muchos parámetros, es la estructura del sistema y no el valor de sus parámetros, los que tienen mayor influencia sobre la respuesta integral del mismo; por tanto, el modelo propuesto en su evaluación preliminar (conceptual) refleja viabilidad progresiva frente al escenario real.

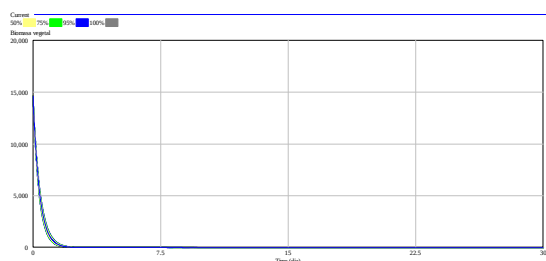


Fig. 12. Gráfico de sensibilidad correspondiente a la variable de nivel biomasa vegetal.

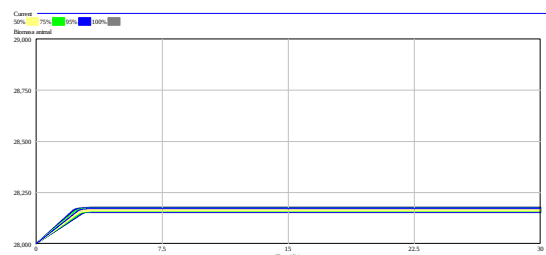


Fig. 13. Gráfico de sensibilidad aplicado a la variable de nivel biomasa animal.

4. Conclusiones

La cría, levante y ceba de ganado vacuno para la producción de carne ante una población en crecimiento que demanda proteína animal, es un sistema económico que depende del pastoreo para mantener los rebaños bovinos en el trópico americano, por tanto, se requieren investigaciones orientadas al mejoramiento del recurso forrajero, su conservación y manejo sustentable. Para ello, los modelos de simulación predictiva permiten evaluar escenarios productivos de manejo y alimentación, para estimar entre otras cosas los puntos críticos que condicionan las máximas ganancias a mínimo costo.

El éxito de la ganadería basada en pasturas depende de ejecutar los principios ecológicos mediante nuevos enfoques y técnicas que engloben la salud, nutrición animal, rotación de potreros y bienestar. La simulación permite el control necesario para el estudio de la interrelación suelo-planta-animal en los sistemas de producción basados en el aprovechamiento de pasturas como base alimentaria, lo cual sugiere mayor interpretación sobre el alcance y relevancia de las diferentes variables que estructuran los compartimientos ecosistémicos para garantizar productividad sostenible en las pasturas.

Debido al grado de complejidad que representa la selectividad y/o utilización del recurso forrajero por parte de los animales durante el pastoreo, aun utilizando del modelado, es difícil estimar con precisión el valor de la ingesta, incluso cuando se dispone de datos teóricos para oferta de materia verde debido al alto grado de heterogeneidad (composición florística) que reportan las pasturas tropicales, lo cual acentúa las dificultades para predecir el efecto real del pastoreo sobre el agroecosistema.

El análisis de sensibilidad constituye una herramienta importante para el manejo y estudio del pastoreo rotacional, en este caso, se determinó que el modelo responde con robustez a pesar de las limitantes de especificidad que posee debido a que está basado en datos reportados por la literatura en diferentes pisos altitudinales. De esta manera se evidenció que la problemática del manejo insostenible de las pasturas radica principalmente en no definir con certeza el área destinada al pastoreo (superficie) y su cobertura, por lo que la mayoría de productores sobreestiman la capacidad forrajera de los fundos y no seleccionan sus rebaños a las condiciones reales de pastoreo que ofrece, esto se traduce en sobre o subpastoreo, ambos escenarios degradadores del agroecosistema y exigiendo incorporación de costosos suplementos alimentarios, incluyendo fármacos, para mejorar la respuesta fisiológica.

La dinámica pastoril simulada, a pesar de las debilidades que puede exhibir la presente prueba preliminar, permite deducir que, si la carga animal es baja, las ganancias diarias de peso por animal son buenas pero la productividad es baja; mientras que, si la carga es elevada, la ganancia de peso es inferior a la esperada, por tanto, la productividad

inferior a la esperada, por tanto, la productividad animal estará por debajo de su potencial. En tal sentido es necesario garantizar un equilibrio entre la oferta forrajera y la necesidad de consumo del rebaño con el propósito de alcanzar el máximo producto, en este caso kg de carne/animal/ha/año.

Referencias

- Abdalla, M., Hastings, A., Chadwick, D., Jones, D., Evans, C., Jones, M., Rees, R. & Smith, P. (2018). Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253, 62-81. doi: 10.1016/j.agee.2017.10.023
- Aherin, D., Weaber, R., Pendell, D., Heier, J. & Larson, R. (2023). Stochastic, individual animal systems simulation model of beef cow-calf production: development and validation. *Translational Animal Science*, 7, 1-20. doi:10.1093/tas/txac155.
- Alary, V., Lasseur, J., Frijia, A. & Gautier, D. (2022). Assessing the sustainability of livestock socio-ecosystems in the drylands through a set of indicators. *Agricultural Systems*, 198, 103389. doi: 10.1016/j.agry.2022.103389.
- Andales, A., Derner, J., Bartling, P., Ahuja, L. & Dunn, G., Hart, R. y Hanson, J. (2005). Evaluation of GPFARM for simulation of forage production and cow-calf weights. *Rangeland Ecology & Management*, 58, 247-255. doi: 10.2111/1551-5028(2005)58[247:EOG-FSO]2.0.CO;2.
- Anido, J. & Mora, J. (2008). Cadena de valor y circuito cárnico bovino en el municipio Colón del estado Zulia (Venezuela). *Actualidad Contable FACES*, 11(17), 11-30.
- Bahamonde, H., Peri, P. & Mayo, JP. (2014). Modelo de simulación de producción de materia seca y concentración de proteína bruta de gramíneas creciendo en bosques de *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst. bajo uso silvopastoril. *Ecología Austral*, 24, 111-117.
- Baldini, M., Da Borso, F., Rossi, A., Taverna, M., Bovolenta, S., Piasentier, E. & Corazzin, M. (2020). Environmental sustainability assessment of dairy farms rearing the Italian Simmental dual-purpose breed. *Animals*, 10(2), 296. doi: 10.3390/ani10020296.
- Baltenweck, I., Enahoro, D., Frijia, A. & Tarawali, S. (2020). Why is production of animal source foods important for economic development in Africa and Asia? *Animal Frontiers*, 10(4), 22-29. doi: 10.1093/af/vfaa036.
- Barrera, V., León-Velarde, C., Grijalva, J. & Chamorro, F. (2004). El componente forrajero: pasto. En: *Manejo del sistema de producción "Papa-Leche" en la Sierra ecuatoriana*. INIAP-CIP-PROMSA. Editorial ABYA-YALA. Quito-Ecuador. p. 73.
- Borges, J., Bastardo, Y., Carrillo, H., Barrios, M., Sandoval, E., Sánchez, D. & Márquez, O. (2013). Caracterización del subsistema pastizal en fincas doble propósito del Valle de Aroa, estado Yaracuy, Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 31(2), 129-139.
- Calvano, K., Simões, M., Ferraz, R., Arvor, D., De Almeida Machado, P., Rosa, M., Gaetano, R. & Bégué, A. (2022). Monitoring complex integrated crop-livestock systems at regional scale in Brazil: a big earth observation data approach. *Remote Sensing*, 14, 1648. doi: 10.3390/rs14071648.
- Cao, L., Shi, P., Li, L. & Chen, G. (2019). A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry*, 11, 204. doi: 10.3390/sym11020204
- Cardoso, A., Pavezzi, R., Prates, E., Weich, R., Ongaratto, F., Machado, M., Ruggieri, A. & Andrade, R. (2020). Intensification: a key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in *Brachiaria* grasslands. *Sustainability*, 12(16), 6656. doi: 10.3390/su12166656
- Carles, A. (1981). Sheep production in the tropics. Oxford Tropical Handbooks. Oxford University Press. New York, United States. pp 1-23, 112-125.
- Carreira, E., Serrano, J., Lopes de Castro, J., Shahidian, S. & Pereira, A. (2023). Montado mediterranean ecosystem (soil-pasture-tree and animals): a review of monitoring technologies and grazing systems. *Applied Sciences* 13, 6242. doi: 10.3390/app13106242
- Castellaro, G., Klee, G. & Chavarria R. (2007). Un modelo de simulación de sistemas de engorda de bovinos a pastoreo. *Agricultura Técnica*, 67(2), 163-172. doi: 10.4067/S0365-28072007000200006
- Centeri, C. (2022). Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. *Hydrology*, 9(2), 34. doi: 10.3390/hydrology9020034
- Chacón-Rivas, E. (2013). Principios de manejo y utilización de pasturas tropicales para la producción de leche y carne a pastoreo. En: *Manejo de pastos y forrajes tropicales*. Perozo-Bravo, A. (Ed.) Cuadernos Científicos GIRARZ N° 13. LXIII Reunión del GIRARZ. p. 21-31.
- Cheng, M., McCarl, B. & Fei, C. (2022). Climate change and livestock production: a literature review. *Atmosphere*, 13(1), 140. doi: 10.3390/atmos13010140
- Cordova, F., Wallace, J. & Pieper, R. (1978). Forage intake by grazing livestock: A review. *Journal of Range Management*, 31(6), 430-438.
- Costa, C., Difante, G., Costa, A., Gurgel, A., Ferreira, M. & Santos, G. (2021). Grazing intensity as a management strategy in tropical grasses for beef cattle production: a meta-analysis. *Animal*, 15, 100192. doi: 10.1016/j.animal.2021.100192
- Cros, M., Duru, M., García, F. & Martín-Clouaire, R. (2004). Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems*, 80, 23-42. doi: 10.1016/j.agry.2003.06.001

- Cruz, F., Horcada, A., Castel, J. & Mena, Y. (2023). Characterization of the cattle production systems in the Department of Cundinamarca (Colombia), proposals for sustainability. *Sustainability*, 15, 1603. doi: 10.3390/su152216093
- Cunha, D., Pereira, J., Fajardo, O., Braga, J., Fonseca, F. & Azevedo, J. (2010). Evaluation of a dynamic simulation model for milk production systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(4), 903-912. doi: 10.1590/S1516-35982010000400027
- Da Silva, S., Gimenes, F., Sarmiento, D., Sbrissia, A., Oliveira, D., Hernandez-Garay, A. & Pires, A. (2013). Grazing behaviour, herbage intake and animal performance of beef cattle heifers on marandu palisade grass subjected to intensities of continuous stocking management. *Journal of Agricultural Science*, 151, 727-739. doi: 10.1017/S0021859612000858
- Díaz-Díaz, F. (2010). Ganadería de doble propósito: formulación y evaluación de proyectos de inversión. Fondo Editorial UNET. San Cristóbal-Venezuela. 126 pp.
- Dieguez, F., Bommel, P., Corral, J., Bartaburu, D., Pereira, M., Montes, E., Duarte, E. & Morales, H. (2012). Modelización de una explotación ganadera extensiva criadora en basalto. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 120-130.
- Doyle, P., McGee, M., Moloney, A., Kelly, A. & O'Riordan, E. (2021). Effect of post-grazing sward height, sire genotype and indoor finishing diet on steer intake, growth and production in grass-based suckler weanling-to-beef systems. *Animals*, 11, 2623. doi: 10.3390/ani11092623
- Durán, Y., Gómez-Valenzuela, V. & Ramírez, K. (2023). Socio-technical transitions and sustainable agriculture in Latin America and the Caribbean: a systematic review of the literature 2010-2021. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1145263. doi: 10.3389/fsufs.2023.1145263
- Enríquez-Quiroz, J., Esqueda, V. & Martínez, D. (2021). Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(Supl. 3), 243-260. doi: 10.22319/rmcp.v12s3.5876
- Eslava-Zapata, R. & Morillo-Moreno, M. (2005). Diseño de un sistema de acumulación de costos para el sector ganadero bovino del municipio Alberto Adriani del estado Mérida. *Visión Gerencial*, 4(1), 23-41.
- Faría-Mármol, J. & González, B. (2008). Nuevas especies de gramíneas forrajeras para el desarrollo sostenible de los sistemas ganaderos de doble propósito. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. XXX: 365-371.
- Fernández, J., Benítez, D., Gómez, I., Cordoví, E. & Leonard, I. (2001). Dinámica de crecimiento del pasto *Brachiaria radicans* vc Tanner en las condiciones edafoclimáticas del valle del Cauto en la provincia Granma. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 35(4), 399-405.
- FHJC. Fundación Hogares Juveniles Campesinos. (2004). Manual de la granja integral autosuficiente. Editorial San Pablo. Bogotá-Colombia. p. 87.
- Flores-Coello, G., Hernández, J., Ku, J., Diaz, D., Solorio, F., Sarabia, L. & Galindo, F. (2023). Intensive silvopastoral systems mitigate enteric methane emissions from cattle. *Atmosphere*, 14, 863. doi: 10.3390/atmos14050863
- Galina, C. & Geffroy, M. (2023). Dual-purpose cattle raised in tropical conditions: what are their shortcomings in sound productive and reproductive function? *Animals*, 13, 2224. doi: 10.3390/ani13132224
- Garzón, P., Pinto, C., Lopes, C., Tomazelli, D., Werner, S., Garagorry, F., Baldissera, T., Schirmann, J. & Sbrissia, A. (2023). Intensification of pasture-based animal production system has little short-term effect on soil carbon stock in the Southern Brazilian highland. *Agroonomy*, 13, 850. doi: 10.3390/agronomy13030850
- Gomes-Rodrigues, J., Difante, G., Chaves, A., De Lima-Veras, E., Graciano, A., De Gusmão, M., Emerenciano, J. & Marques, C. (2021). Establishment of *Brachiaria* cultivars in the soil-climatic conditions of the Brazilian semi-arid region. *Acta Scientiarum*, 43, e51802. doi: 10.4025/actascianimsci.v43i1.51802
- González-Quintero, R., Barahona-Rosales, R., Bolívar-Vergara, D., Chirinda, N., Arango, J., Pantévez, H., Correa-Londoño, G. & Sánchez-Pinzón, M. (2020). Technical and environmental characterization of dual-purpose cattle farms and ways of improving production: a case study in Colombia. *Pastoralism: Research, Policy and Practice*, 10, 19. doi: 10.1186/s13570-020-00170-5.
- Greenwood, P. (2021). Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. *Animal*, 15, Supplement 1, 100295. doi: 10.1016/j.animal.2021.100295
- Insua, J., Utsumi, S. & Basso, B. (2019). Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLoS ONE*, 14(3), e0212773. doi: 10.1371/journal.pone.0212773
- Isea, W. (2008). Aspectos productivos y genéticos en ganadería doble propósito orientadas a la producción de carne. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. XI: 127-140.
- Jack, H., Burke, J., Cranston, L., Morel, P. & Knights, M. (2021). The mineral content of some tropical forages commonly used in small ruminant production systems in the Caribbean – Part 2. *Tropical Agriculture*, 97(1), 46-56.

- Jarma-Orozco, A., Maza, L., Pineda, A. & Hernández, J. (2012). Physiological and bromatological aspects of *Brachiaria humidicola*. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 7(1), 87-98. doi: 10.21615/cesmvz
- Jayasinghe, P., Donaghy, D., Barber, D., Pembleton, K. & Ramilan, T. (2022). Suitability evaluation of three tropical pasture species (Mulato II, Gatton Panic, and Rhodes Grass) for cultivation under a subtropical climate of Australia. *Agronomy*, 12, 2032. doi: 10.3390/agronomy12092032
- Jones, J., Antle, J., Basso, B., Boote, K., Conant, R., Foster, I., Charles, H., Godfray, J., Herrero, M., Howitt, R., Janssen, S., Keating, B., Munoz-Carpena, R., Porter, C., Rosenzweig, C. & Wheeler, T. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269-288. doi: 10.1016/j.agsy.2016.09.021
- Khatri-Chhetri, U., Thompson, K., Quideau, S., Boyce, M., Chang, S., Kaliaskar, D., Bork, E. & Carlyle, C. (2022). Adaptive multi-paddock grazing increases soil nutrient availability and bacteria to fungi ratio in grassland soils. *Applied Soil Ecology*, 179, 104590. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104590
- Kleppel, G. & Frank, D. (2022). Structure and functioning of wild and agricultural grazing ecosystems: a comparative review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 945514. doi: 10.3389/fsufs.2022.945514
- Koopmans, L. & Youk, H. (2021). Predictive landscapes hidden beneath biological cellular automata. *Journal of Biological Physics*, 47, 355-369. doi: 10.1007/s10867-021-09592-7
- Kristiansen, S., Painter, J. & Shea, M. (2021). Animal agriculture and climate change in the US and UK elite media: volume, responsibilities, causes and solutions. *Environmental Communication*, 15(2), 153-172. doi: 10.1080/17524032.2020
- Liu, X., Floate, K., Gorzelak, M., Holman, D., Hrycauk, S., Kubota, H., Lupwayi, N., Neilson, J., Ortega, R., Petri, R., Tran, L., Wang, H., Wilches, D., Yang, X., Zorz, J. & Guarna, M. (2023). Prairie agroecosystems: interconnected microbiomes of livestock, soil and insects. *Agriculture*, 13, 326. doi: 10.3390/agriculture13020326
- Londoño-Franco, L. & Álvarez-Molina, J. (2011). Evaluación de dos sistemas de pastoreo (rotacional y continuo) sobre variables técnicas, productivas y económicas en novillos cebú comercial en el trópico bajo. *Revista Politécnica*, 7(12), 120-135.
- Macedo, I., Terra, J., Siri-Prieto, G., Velazco, J. & Carrasco-Letelier, L. (2021). Rice-pastures agroecosystem intensification affects Energy use efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123771. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123771
- Marin, A., Laca, E., Baldissera, T., Pinto, C., Garagorry, F., Zubietta, A., Bremm, C., Bindelle, J. & Carvalho, P. (2022). Determining the pre-grazing sward height of Kikuyu grass (*Cenchrus clandestinus* - Hochst. ex Chiov.) for optimizing nutrient intake rate of dairy heifers. *PLoS ONE*, 17(7), e0269716. doi: 10.1371/journal.pone.0269716
- Martínez, J. (2006). Estudio de la desertificación por sobrepastoreo mediante un modelo de simulación dinámica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. Tesis de Grado. 166 pp.
- Monte, F., Sollenberger, L. & Vendramini, J. (2023). Grazing management and stocking strategy decisions for pasture-based beef systems: experimental confirmation vs. testimonials and perceptions. *Translational Animal Science*, 7, txad069. doi: 10.1093/tas/txad069
- Monteiro, A., Avelino, C., Avelino, C., Vieira, L., França, D., Rosa, A., Ribeiro, G. & Souza, M. (2022). Energy supplementation as strategy of pasture management. *Acta Scientiarum*, 44, e55761. doi: 10.4025/actascianimsci.v44i1.55761
- Montiel, N. (1994). Comparación de dos agentes anabólicos sobre la ganancia de peso en bovinos *Bos indicus* a pastoreo y dos niveles de suplementación. *Revista Científica FCV-LUZ*, IV(2), 113-118.
- Montossi, F., Pravia, M., Dighiero, A., Porcile, V., Gutiérrez, D. & De Barbieri, I. (2013). Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. *Revista INIA*, 34, 25-29.
- Moorby, J. & Fraser, M. (2021). Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*, 15, 100297. doi: 10.1016/j.animal.2021.100297
- Negassa, A., Gebremedhin, B., Gebru, G., Desta, S., Nigussie, K., Shapiro, B., Dutilly-Diane, C. & Tegegne, A. (2015). Integrated bio-economic simulation model for traditional cattle production systems in Ethiopia: ex-ante evaluation of policies and investments. LIVES Working Paper 6. Nairobi, Kenya: International Livestock Research Institute (ILRI). 36 pp.
- Ojeda, A. (2005). Aprovechemos el crecimiento compensatorio en novillos a pastoreo. En: *Manual de ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C.; Soto-Belloso, E. (Eds.). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Sección IV-Cap. 10: 267-270.
- Peña, M. & Materán, M. (2005). El hombre factor clave de los sistemas de producción ganadera. En: *Manual de ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., y Soto-Belloso, E. (Eds.). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Sección I-Cap. 10: 55-60.
- Pereira, F., Smith, C., Charters, S. & Gregorini, P. (2022). Creating a design framework to diagnose and enhance grassland health under pastoral livestock production systems. *Animals*, 12(23), 3306. doi: 10.3390/ani12233306

- Plata-Rocha, P., Gómez, M., Bosque, J. & Aguilar, J. (2013). Análisis de sensibilidad para un modelo de simulación de crecimiento urbano: propuesta metodológica explícitamente espacial. *GeoFocus*, 13(2), 158-178.
- Queenan, K., Sobratee, N., Davids, R., Mabhaudhi, T., Chimonyo, M., Slotow, R., Shankar, B. & Häslér, B. (2020). A systems analysis and conceptual system dynamics model of the livestock-derived food system in South Africa: A tool for policy guidance. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community*, 9,4. doi: 10.5304/jafscd.2020.094.021
- Rahmanian, S., Hejda, M., Ejtehadi, H., Farzam, M., Pyšek, P. & Memariani, F. (2020). Effects of livestock grazing on plant species diversity vary along a climatic gradient in northeastern Iran. *Applied Vegetation Science*, 23, 551–561. doi: 10.1111/avsc.12512
- Reavis, M., Ahlen, J., Rudek J. & Naithani, K. (2022). Evaluating greenhouse gas emissions and climate mitigation goals of the global food and beverage sector. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 789499. doi: 10.3389/fsufs.2021.789499
- Resat, H., Costa, M. & Shankaran, H. (2011). Spatial aspects in biological system simulations. *Methods in Enzymology*, 487, 485–511. doi:10.1016/B978-0-12-381270-4.00017-2
- Rice, R., MacNeil, M., Jenkins, T. & Koong, L. (1983). Simulation of the herbage/animal interface of grazing lands. En: *Analysis of ecological systems: state of the art in ecological modelling*. Lauenroth, W., Skogerboe, G., y Flug, M. (Ed.) Elsevier Sci. Publishing Company INC. USA. p. 475-488.
- Ritchie, M. & Penner, J. (2020). Episodic herbivory, plant density dependence, and stimulation of aboveground plant production. *Ecology and Evolution*, 10, 5302-5314. doi: 10.1002/ece3.6274
- Rodríguez, G., Patiño, R., Altahona, L. & Gil, J. (2011). Dinámica de crecimiento de pasturas con manejo rotacional en diferente topografía en un sistema de producción de carne vacuna en Córdoba, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 3(1), 47-61. doi: 10.24188/recia.v3.n1.2011.249
- Rotz, C., Isenberg, B., Stackhouse-Lawson, K. & Pollak, E. (2013). A simulation-based approach for evaluating and comparing the environmental footprints of beef production systems. *Journal Animal Science*, 91,5427-5437. doi: 10.2527/jas.2013-6506
- Ruiz-Albarrán, M., Balocchi, O., Wittwer, F. & Pulido, R. (2016). Milk production, grazing behavior and nutritional status of dairy cows grazing two herbage allowances during winter. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(1), 34-39. doi: 10.4067/S0718-58392016000100005
- Santos, V., McManus, C., Peripolli, V., Tanure, C., Lima, P., Corrêa, P., Brito, D., Torres, S. & Louvandini, H. (2017). Dry matter intake, performance and carcass characteristics of hair sheep reared under different grazing systems. *Scientia Agricola*, 74(6), 436-442. doi: 10.1590/1678-992X-2016-0290
- Scarnecchia, D. (1985). The animal-unit and animal-unit-equivalent concepts in range science. *Journal of Range Management*, 38(4), 346-349.
- Scarnecchia, D. (1985). The animal-unit and animal-unit-equivalent concepts in range science. *Journal of Range Management*, 38(4), 346-349. doi: 10.2307/3899419
- Segovia-López, E. & Jeréz-Timaure, N. (2008). Nudos críticos en la cadena cárnica bovina. En: *Desarrollo sostenible en la ganadería doble propósito*. González-Stagnaro, C., Madrid-Bury, N., y Soto-Belloso, E. (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. LXVIII: 805-817.
- Sessim, A., Esteves, T., López-González, F., Santos de Freitas, D. & Jardim, J. (2020). Efficiency in cow-calf systems with different ages of cow culling. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 476. doi: 10.3389/fvets.2020.00476.
- Smith, A. (2022). Biophysical simulation of sheep grazing systems using the SGS pasture model. *Agriculture*, 12, 2032. doi: 10.3390/agriculture12122032.
- Smith, S., Gotoh, T. & Greenwood, P. (2018). Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. *Asian-Australas Journal Animal Science*, 31(7), 927-932. doi: 10.5713/ajas.18.0405
- Smith, W., Galyean, M., Kallenbach, R., Greenwood, P. & Scholljegerdes, E. (2021). Understanding intake on pastures: how, why, and a way forward. *Journal Animal Science*, 99(6), 1-17. doi: 10.1093/jas/skab062
- Sonnier, G., Quintana-Ascencio, P., Bohlen, P., Fauth, J., Jenkins, D. & Boughton, E. (2020). Pasture management, grazing, and fire interact to determine wetland provisioning in a subtropical agroecosystem. *Ecosphere*, 11(8), e03209. doi: 10.1002/ecs2.3209
- Sossa, C., Correa, G., & Barahona, R. (2015). Consumo y excreción de nutrientes en novillos de carne pastoreando en trópico de altura con y sin suplementación energética. *Zootecnia Tropical*, 33(2), 117-128.
- Stampa, E., Schipmann, C. & Hamm, U. (2020). Consumer perceptions, preferences, and behavior regarding pasture-raised livestock products: A review. *Food Quality and Preference*, 82, 103872. doi: 10.1016/j.foodqual.2020.103872
- Tedeschi, L., Molle, G., Menendez, H., Cannas, A. & Fonseca, M. (2019). The assessment of supplementation requirements of grazing ruminants using nutrition models. *Translational Animal Science*, 3(2), 811-828. doi: 10.1093/tas/txy140
- Terry, S., Basarab, J., Guan, L. & McAllister, A. (2021). Strategies to improve the efficiency of beef cattle production. *Canadian Journal Animal Science*, 101(1), 1-19. doi: 10.1139/cjas-2020-0022

- Torres Jara de García, G., Durand-Chávez, L., Quispe-Ccasa, H., Linares-Rivera, J., Segura, G., Calderón, R., Vásquez, H., Maicedo, J., Ampuero-Trigoso, G., Robles, R. & Saucedo-Urriarte, J. (2023). Sustainability of livestock farms: the case of the district of Moyobamba, Perú. *Heiyon*, 9(2), e13153. doi: 10.1016/j.heiyon.2023.e13153
- Twine, R. (2021). Emissions from animal agriculture-16.5% is the new minimum figure. *Sustainability*, 13, 6276. doi: 10.3390/su13116276
- Ureña, J., Capriles, M. & Flores, B. (1997). Análisis del sistema de producción de leche y carne con vacunos en El Vigía, estado Mérida. Zona Sur del Lago de Maracaibo. II. Análisis funcional. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 5(Supl. 1), 631-633.
- Varijakshapanicker, P., Mckune, S., Miller, L., Hendrickx, S., Balehegn, M., Dahl, G. & Adesogan, T. (2019). Sustainable livestock systems to improve human health, nutrition, and economic status. *Animal Frontiers*, 9(4), 39-49. doi: 10.1093/af/vfz041
- Velásquez-Mosquera, J., Chacón, L. & Ardila, A. (2015). Evaluación de estrategias de manejo y pastoreo sobre el crecimiento en novillos comerciales cebú en un hato del piedemonte llanero. *Revista Ciencia Animal*, 9(1), 57-68.
- Verde, O., Medina, J. y Borges, M. (2007). Sistema de producción con bovinos de carne en la Estación Experimental "La Cumaca" I.- Peso al nacer. *Revista de la Facultad de Ciencias Veterinarias-Universidad Central de Venezuela*, 48(2), 97-104.
- Villalobos, L. & Arce, J. (2013). Evaluación agronómica y nutricional del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. Disponibilidad de biomasa y fenología. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 91-101.
- Walker, J. (1993). Nutritional models for grazing animals. *Icelandic Agricultural Sciences*, 7, 45-57.
- Wang, S., Fan, J., Li, Y. & Huang, L. (2019). Effects of grazing exclusion on biomass growth and species diversity among various grassland types of the Tibetan Plateau. *Sustainability*, 11(6), 1705. doi: 10.3390/su11061705
- Wasim, M., Draganova, I., Charles, P., Morel, H. & Todd, S. (2023). Variations in the 24 h temporal patterns and time budgets of grazing, rumination, and idling behaviors in grazing dairy cows in a New Zealand system. *Journal of Animal Science*, 101, 1-11. doi: 10.1093/jas/skad038
- Wróbel, B., Zielewicz, W. & Staniak, M. (2023). Challenges of pasture feeding systems-opportunities and constraints. *Agriculture*, 13, 974. doi: 10.3390/agriculture13050974

Recibido: 10 de octubre de 2023

Aceptado: 05 de febrero de 2024

Uzcátegui-Varela, Juan Pablo. Ingeniero de Producción Agropecuaria. Magíster Scientiarum en Producción Animal. Investigador Asociado al Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes (ULA). Candidato a Doctor en Ciencias Humanas, ULA, Mérida, Venezuela .  <https://orcid.org/0000-0001-7602-1332>

Machine Learning y Diadema Epoc+ para eventos simultáneos en estudios de expresiones faciales

Machine Learning and Epoc+ Headband for simultaneous events in facial expression studies

Castro-López, Ángel ¹; Castañeda-Álvarez, Luis ²; Razón-González, Juan ³; Martínez-Jiménez, Leonardo ⁴; Torres-del Carmen, Felipe ⁵; Cano-Lara, Miroslava ^{1*}

¹Depto. de Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato, Irapuato, Guanajuato, 36821, México.

²Depto. de Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México/IT de Tepic, Tepic, Nayarit, 63175, México.

³Depto. de Electromecánica, Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato, Irapuato, Guanajuato, 36821, México.

⁴Depto. de Estudios Multidisciplinarios, Universidad de Guanajuato, Yuriria, Guanajuato, 38944, México.

⁵Depto. de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, 36800, México.

*miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

Resumen

En el área de reconocimiento facial las aplicaciones van en aumento, al emplear AI (Artificial Intelligence) o técnicas BCI (Brain-Computer Interface) se logra identificar la emoción facial que expresa una persona. En este trabajo se presenta la comparación de emociones del rostro mediante los algoritmos de ML (Machine Learning) en entorno de Python y la diadema Emotiv Epoc+ en su software Xavier Control Panel. Los modelos ML permiten extraer y mapear el movimiento facial en una malla de 468 nodos para EFGF (Extraction of Facial Geometric Features) y permite realizar una detección facial en cascada para extraer las características faciales en múltiples zonas simultáneamente para el algoritmo MTCNN (MultiTask Cascaded Convolutional Neural Network). La técnica BCI con la diadema Emotiv Epoc+ permite la extracción de las señales EEG (Electroencephalogram) para determinar la expresión facial. Finalmente, los modelos AI presentan la ventaja de una nula intervención física con la cabeza, en contraste de requerir tratamiento en la imagen para reducir el ruido, aumento en el tiempo de procesamiento y control de escenario de iluminación. En cambio, la técnica BCI realiza directamente la interpretación de la emoción con el software Xavier al detectar las contracciones musculares en el rostro del usuario y predecir la emoción. Las expresiones faciales logran ser aplicadas en el ámbito de la psicología, medicina, investigaciones policíacas, etc., brindan una herramienta práctica para agilizar entrevistas relacionando el reconocimiento de las emociones en el momento exacto que se requiera.

Palabras clave: Expresión facial, Aprendizaje automático, MTCNN, EFGF, Diadema Emotiv.

Abstract

The applications in facial recognition are increasing, using AI (Artificial Intelligence) or BCI (Brain-Computer Interface) techniques, we can identify the facial emotion expressed by a person. This paper presents the comparison of facial emotions using ML (Machine Learning) algorithms in a Python environment and the Emotiv Epoc+ headset in its Xavier Control Panel software. ML models allow facial motion to be extracted and mapped on a 468-node mesh for EFGF (Extraction of Facial Geometric Features) and allows cascaded face detection to extract facial features in multiple zones simultaneously for the MTCNN (MultiTask Cascaded Convolutional Neural Network) algorithm. The BCI technique with the Emotiv Epoc+ headset allows the extraction of EEG (Electroencephalogram) signals to determine facial expression. Finally, the AI models have the advantage of no physical intervention with the head, in contrast to requiring image processing to reduce noise, increased processing time and control of the illumination scenario. In contrast, the BCI technique directly performs emotion interpretation with Xavier software by detecting muscle contractions in the user's face and predicting the emotion. Facial expressions can be applied in the field of psychology, medicine, police investigations, etc., providing a practical tool to speed up interviews relating the recognition of emotions at the exact moment required.

Keywords: Facial expression, Machine Learning, MTCNN, EFGF, Emotiv Headband.

1 Introducción

El reconocimiento facial en tiempo real usando modelos AI (Artificial Intelligence) o la técnica BCI (Brain-Computer Interface) son áreas que van incrementando sus aplicaciones, en este caso particular donde se explora el reconocimiento del rostro y sus emociones. Por ejemplo, las expresiones faciales están conformadas por un patrón de contracciones musculares en el rostro de las personas que experimentan emociones y es la comunicación no verbal en una persona. Darwin relaciona las emociones, expresiones y el carácter comunicativo que poseen (Darwin, 1897). Denzin, sin embargo, cita que las emociones son un medio que ayuda a experimentar y procesar la realidad con la toma de decisiones y manejo de situaciones (Denzin, 2009). Plutchik (Pico, 2016) propuso un modelo gráfico compuesto por las ocho emociones básicas: éxtasis, admiración, terror, asombro, pena, odio, furia y vigilancia, mismas que albergan experiencias empíricas vividas previamente. Se reconoce las emociones como dimensiones en conjunto con múltiples niveles de intensidad vivida, permitiendo una comunicación no verbal visualizada en el rostro mediante las contracciones musculares y adoptando posiciones específicas para cada emoción.

La sociología ha desarrollado avances en la investigación de las expresiones como el estudio de la salud mental y de áreas pertenecientes a la psicología. Un creciente aumento ha llevado a la psicología a aplicar las expresiones en la seguridad pública en la búsqueda de métodos más eficientes de detección de mentiras (Barathi, 2016). En neurociencias, existen los avances de la interfaz cerebro-computadora BCI con la diadema Emotiv Epoc y Matlab para la extracción de la señal electroencefalográfica (Tang, 2020). En el mismo año se desarrolló un sistema de reconocimiento en tiempo real que realiza la extracción de los facelandmarks mediante el algoritmo Lukas-Kanade optical Flow (lowe, 2020), la señal EEG en conjunto con el modelo MTCNN (MultiTask Cascaded Convolutional) (Bustamante, 2014) y el algoritmo EFGF (Extraction of Facial Geometric Features) con el propósito de extraer y clasificar las expresiones faciales en función a las distancias entre los puntos de referencia extraídos (Aparicio, 2022).

En el mismo momento, se propuso un método de reconocimiento de una base de datos de emociones basado en gráficos que adoptan puntos de referencia landmarks extraídos de la malla Facemesh (Akhmedov, 2022). Por otra parte, se trabajó con un algoritmo de reconocimiento de emociones con imágenes de entrada mediante una red MTCNN para la detección de rostros y la segmentación de imágenes para construir una base de datos estándar para entrenamientos (Xi'anJiaotong, 2022).

Este trabajo esta estructurado en la Sección 2 con las bases teóricas relacionadas con las emociones faciales, la técnica

BCI para la diadema Emotiv Epoc+ e igualmente los modelos de IA EFGF y MTCNN. En la Sección 3, se desarrollan los estudios del rostro y sus emociones para ejemplificar cada método en conjunto a los recursos empleados de forma simultánea. Consecuentemente la Sección 4 expone los resultados del reconocimiento de emociones para neutral, alegre y sorpresa en un usuario en 3 periodos de tiempo. La ultima sección concluye el estudio comparativo entre los modelos IA y BCI, los cuales ofrecen agilizar tareas y practicidad en las ejecuciones para optimizar clínicos, psicológicos y policíacos al momento de una entrevista.

2 Marco teórico

Las emociones faciales son factores importantes en la comunicación humana, permitiendo a los miembros de una especie comprender las intenciones externas del resto. Los humanos tienen la capacidad de emplear múltiples expresiones para la articulación de una emoción. El rostro modifica los músculos faciales para la articulación de miles de posiciones y de esta manera transmitir las emociones que hace unas décadas se establecieron para tristeza, alegría, ira, temor, deseo, asco, interés y sorpresa (Ekman, 1984).

Entre los medios de comunicación el lenguaje de las expresiones faciales son uno de los principales métodos de comunicación interpersonal. Atrayendo la atención de la comunidad científica de la computación afectiva y las artes visuales computacionales (Abigail, 2021). Los métodos computacionales en la práctica clínica y la descripción del comportamiento en relación con las emociones faciales (Barrionuevo, 2020). Derivado de las características individuales en los rasgos faciales se requieren algoritmos con una mayor robustez que permita eliminar el error generado por la variación de la posición del rostro e iluminación. En contraparte existen los métodos de desarrollo profundo como ML, MTCNN, etc (Zhang, 2020) que han demostrado una mayor eficiencia computacional en el análisis dinámico de los rostros y su extracción automática de las características faciales sin requerir un enorme poder computacional.

2.1 Emotiv Epoc+

En la neurociencia la extracción y entendimiento del comportamiento interno del cerebro, se ve beneficiada con los sistemas BCI. Vincula la señal EEG con la actividad cerebral que se realiza al ejecutar alguna actividad de manera consciente (Pham, 2012). La diadema Emotiv Epoc+ brinda una comunicación directa y unidireccional entre el cerebro del usuario y la computadora, con una capacidad de detección en tiempo real y sin depender de actividad física como el habla o la expresión facial (EMOTIV, 2023).

En los sistemas BCI las expresiones faciales son extraídas del nervio craneal VII (EMOTIV, 2023) mediante un procesamiento previo en el software oficial Xavier Control Panel v.3.3.3.

Los patrones de activación de los músculos faciales en tiempo real aumentan la efectividad de detección comparando continuamente la posición de los músculos con respecto a la expresión neutral. De esta manera, las expresiones faciales al ser el principal medio por el cual un individuo expresa una emoción interna a un medio externo (Caballo, 2009), es posible interpretar las emociones que el usuario siente mediante los patrones faciales emitidos por el rostro.

En la Fig. 1. se muestra el posicionamiento de los electrodos y el rostro referencia neutral. En los entrenamientos, el algoritmo graba el voltaje de entrada que captan los electrodos en relación con las expresiones faciales. Un correcto entrenamiento le permite al sistema BCI identificar las expresión facial que emite el usuario, al aumentar el número de entrenamientos se reduce el error de reconocimiento en las expresiones faciales y la IA teniendo como resultado el gesto facial de la persona.



Fig. 1. Representación de los electrodos en el cerebro, estado de referencia y expresiones faciales predecibles por Xavier Control Panel,

Usando redes convolucionales como EFGF o MTCNN se puede construir detectores de rostros y emociones robustos, con un entrenamiento de imágenes del rostro del usuario para que la red aprenda a realizar tareas simultáneas.

2.2 EFGF

La Extraction of Facial Geometric Features (EFGF) es un modelo computacional determina la relación entre distancias conformadas por zonas representativas del rostro. De las diversas mallas o face mesh de hasta 468 puntos de referencia faciales, la malla densa de Mediapipe (Hassouneh, 2020) del entorno de Pipelines consta de una estructura que ofrece funciones para soluciones para la realización de estos procesamientos, siendo capaz de detectar la forma del rostro y sus puntos clave para identificar la percepción de sus expresiones en landmark facial (Lugaresi, 2019). La extracción de las distancias emplea una malla facial Facemesh de MediaPipe que asigna puntos a regiones de la cara. De esta manera se determinan las distancias para extraer rasgos de los componentes del rostro como ojos, nariz o boca. Los puntos están posicionados en proporciones del equilibrio facial que cambian según el movimiento de las regiones y por lo tanto las distancias entre ellos. Por ejemplo, de la expresión neutral hacia la expresión sorpresa se observa

un cambio en la proporción de la ceja, en cambio la expresión alegre sucede en la proporción de la boca, etc. (Sánchez, 2022).

2.3 MTCNN

La red convolucional MTCNN es un aprendizaje profundo que puede utilizarse en el área de reconocimiento facial sin restricciones. La red neuronal convolutiva multitarea detecta rostros y puntos de referencia facial de manera fina. De esta manera, MTCNN se compone de tres etapas de redes convolucionales profundas: Proposal Network (P-Net), Refine Network (R-Net) y Output Network (O-Net), que predicen la ubicación de caras y puntos de referencia (Hou, 2021). Cada una representa una etapa en la detección del rostro y sus respectivos puntos de referencia entre ojos y boca (Zhan, 2020). El modelo MTCNN en el entorno de Python 3 pre entrenado usa su configuración para crear un modelo independiente que extraiga sus configuraciones particulares del rostro (Revelo, 2021).

3 Metodología

Se trabaja con el sistema BCI que extrae las expresiones faciales de forma dinámica mediante el uso de la Diadema Emotiv Epoc+; los modelo EFGF utilizando el entorno de Python y el modelo MTCNN junto con las librerías TensorFlow y Keras. Estas últimas redes con los recursos de la Tabla 1. El desarrollo de la detección del rostro se concentro en las expresiones neutral, sorpresa y alegre con escenario controlado y las 3 etapas de análisis fueron seccionadas con 60 segundos cada bloque.

3.1 Materiales y escenario

En la Fig. 2 se observa el diseño final del escenario con un control de iluminación con dos lámparas led newer modelo nl660s ubicadas en frente del usuario. Los métodos de la diadema Emotiv Epoc+, EFGF y MTCNN trabajan con los parámetros de la Tabla 2. En la Fig. 3 se observa de manera global, la interfaz de cada método en relación con la expresión generada en ese instante. La diadema y el algoritmo EFGF (Ghofrani, 2019) presentan el resultado directo del proceso de la expresión facial predominante, en cambio el algoritmo MTCNN presenta un gráfico con el valor numérico de la detección de emoción (Revelo, 2021).

3.2 Métodos de reconocimiento de emociones

Se inicia con la diadema entrenando con las propiedades de la Tabla 1 y la Cam1 para la detección de las expresiones faciales. Se generaron 10 entrenamientos: 4 neutral, 3 sorpresa y 3 alegría de manera secuencial en dos sesiones separadas con el propósito de que el sujeto de prueba se relaje y no creó error en los entrenamientos originados por el

cansancio.

Tabla. 1. Recursos empleados en cada método.

Método	Diadema Epoc +	EFGF	MTCNN
Software	Xavier Control Panel v3.3.3 (Emotiv, 2023)	Python v3.10	Python v3.7
Entorno de programación	Xavier Control Panel v3.3.3 (Emotiv, 2023)	Visual Studio Code v2022	Conda v23.5.2
Librería	No aplica	Mediapipe OpenCv Pandas Numpy Os	Tensor Flow, Numpy, Imutils, OpenCV, Time Matplotlib
Aplicación	Detección de expresiones faciales (Chávez, 2016)	Extracción de rasgos geométricos faciales	Detección de emociones
Entrada	Señal EEG extraída del musculo facial VII en tiempo real (Roldan, 2021)	Fotogramas extraídos de un video	Fotogramas de la cámara del rostro del usuario
Salida	Visualización grafica de la emoción dominante detectada por la diadema (Emotiv, 2023)	Valor de las proporciones geométricas exportados en un archivo .csv	Gráfico en tiempo real con porcentajes de predicción de emociones



Fig. 2. Escenario para el reconocimiento facial.

Tabla. 2. Cámaras empleadas para la detección.

Cámara	Modelo	Método
Cam1	HP Wide Vision HD Camera (Laptop)	Método Diadema Emotiv
Cam3	Huawei Matebook D15	EFGF
Cam2	Stelar CW 750 (Webcam)	MTCNN

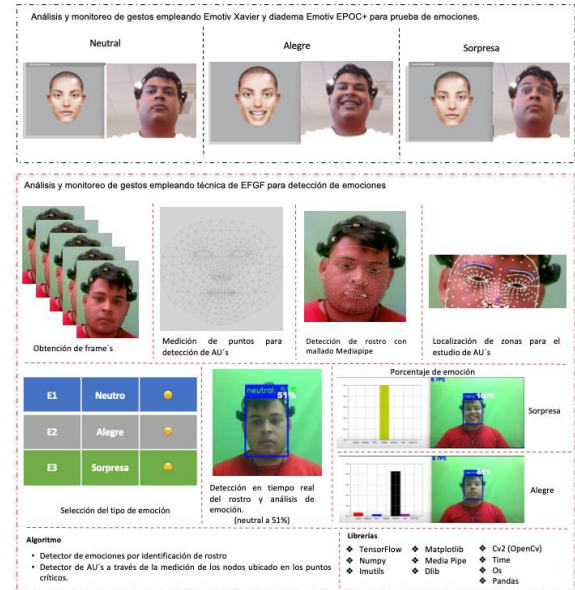


Fig. 3. Detección de emoción neutral, alegre y sorpresa por los métodos (arriba hacia abajo): Diadema Emotiv Epoc+, EFGF y MTCNN (Revelo, 2021).

En la parte superior de la Fig.3, se muestra el monitoreo de las expresiones faciales emitidas por el sistema BCI en la cabeza del usuario, el software Xavier ejemplifica la expresión con un simulador de rostro. Continuando con la parte central en la Fig. 3, el método EFGF extrae los rasgos geométricos faciales con la Cam3 en Python para las regiones nariz, puente, ceja y boca. El análisis facial depende de la posición cartesiana de puntos en el rostro donde las emociones tienen puntos asignados en la malla facial MediaPipe que caracterizan la emoción en sí. Se trabaja con el video en el algoritmo para crear archivos *.csv donde se almacenan las proporciones de cejas y boca (300 frames por cada uno) con un total de 3,600 proporciones para la base de datos; un tercio correspondiente a cada expresión facial. Por ejemplo, los puntos ubicados en la ceja tienden a estar más arriba en la expresión sorpresa que en la neutra, la emoción alegre muestra un cambio en la posición de los puntos alrededor de las comisuras en contraste con neutral y sorpresa. En la Fig. 4 se determina la relación entre 3 distancias formadas por 4 puntos en la malla del rostro: puente nasal P168, punta de la nariz P4, centro de la ceja P105, comisura externa de la boca P185 (MediaPipe, 2023). Las proporciones son extraídas a una base de datos externa y se analiza su comportamiento con respecto a su expresión facial y las distancias (Math, 2023):

$$X_n, Y_n = \text{Lista} [\text{Punto } 1] [1:] \quad (1)$$

$$X_{n+1}, Y_{n+1} = \text{Lista} [\text{Punto } 2] [1:] \quad (2)$$

$$\text{Distancia}_{12} = \text{math.hypoth}(X_{n+1} - X_n, Y_{n+1} - Y_n) \quad (3)$$

Donde (1) y (2) extraen las coordenadas (X,Y) de sus respectivos puntos de forma individual del arreglo *lista* almacenados en la variable X_n y Y_n . En (3) se determina la distancia euclidiana entre los mismos basándose en el resultado de las ecuaciones (1) y (2). De esta manera en la Fig. 4 se observan las distancias $P_4 - P_{168}$ que representa la distancia referencia, $P_4 - P_{105}$ y $P_4 - P_{185}$ son los movimientos de la Proporción Ceja (P.C) y la Proporción de la Boca (P.B) respectivamente.

$$P.C = P_4 - P_{168} / P_4 - P_{105} \quad (4)$$

$$P.B = P_4 - P_{168} / P_4 - P_{185} \quad (5)$$

Para el 3er. método, en la Fig 3. Parte inferior el modelo MTCNN de acuerdo con la Tabla 1 es pre-entrenado en relación con las emociones del usuario. Se importa valores previos de pesos de las redes neuronales en un entrenamiento de 14000 épocas (Revelo, 2021). En tiempo real se generan imágenes de entrada en la red con la Cam2 y la librería OpenCv captura y almacena temporalmente los frames extraídos del video. Se convierte a un arreglo Numpy y se ajusta la matriz en el formato de entrada (NONE, 224, 224, 1). La predicción de las emociones es clasificada y almacenada en variables independientes, a su vez se visualiza la predicción de las emociones mediante un gráfico de barras de 0 a 1, logrando identificar el nivel de emoción que presenta el usuario.

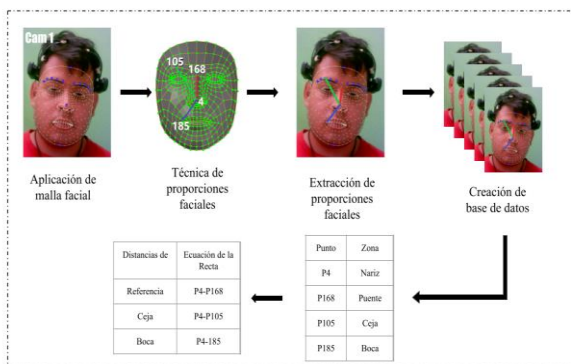


Fig. 4. Extracción de proporciones faciales por distancias geométricas en puntos nariz, puente, ceja y boca.

4 Resultados

En los estudios de las emociones neutral, alegre y sorpresa, las imágenes son extraídas de los frames del video como se observa en la Fig. 5 cada 60 s., de arriba hacia abajo se observan los 3 métodos iniciando con BCI para diadema Emotiv Epoc+, ML para EFGF y MTCNN. El estudio esta representado por 3 etapas que se desarrollan respecto al tiempo, teniendo un periodo de 60 seg. por cada emoción. Se inicia con la emoción neutra, seguida de alegre y terminando con sorpresa. Si bien, (en la parte superior de la Fig. 5) para la técnica BCI se detectan todas las expresiones faciales, se

requiere un entrenamiento completo para obtener una exactitud adecuada al momento del estudio. Es posible se presente un aumento de falsos positivos debido a la cantidad limitada de entrenamientos entre expresiones. Sin embargo, se logra identificar la emoción en Xavier en la secuencia de las etapas, teniendo presencia de error en la emoción sorpresa. Esto es debido a una base de datos limitada que debe ser ampliada con mas pruebas para mejorar el entrenamiento.

En los mismos lapsos de tiempo, para el método EFGF se extrae la base de datos. Se exportan y trabajan en para extraer los rasgos geométricos faciales y determinar que emoción expresa en relación a las distancias en los puntos representativos del rostro. La Tabla 3 muestra la comparación entre las distancias PC y PB para las emociones neutral, alegre y sorpresa. Para el caso de la proporción de ceja para la emoción alegre al aplicar la Ec. 4 se presenta una ligera diferencia. De esta manera, es requerido realizar un ajuste de amplitud en las proporciones para aumentar el umbral de detección entre la proporción neutral y la ejercida. Por otro lado, en la Fig. 5. se observa el proceso de extracción para las emociones de estudio. Dichos valores son empleados como entrada del algoritmo de clasificación que realiza una comparación entre los umbrales de detección asociados a una emoción y el valor obtenido en código previos.

En cambio, el modelo de red MTCNN presentó una variación en el porcentaje de error en la expresión neutral y sorpresa, ya que la red neuronal muestra confusión en los nodos particulares de la malla. En la primera etapa de la Fig. 5 parte inferior detecta la emoción neutral con un 41%, no obstante, a diferencia del método BCI, el algoritmo MTCNN no requiere de un dispositivo electrónico de intervención directa, captando la emoción sin perturbaciones causadas por la incomodidad generada por el uso de la diadema. Para una mayor efectividad se requiere continuar con entrenamientos del modelo con una mayor base de datos para aumentar la precisión de la emoción.

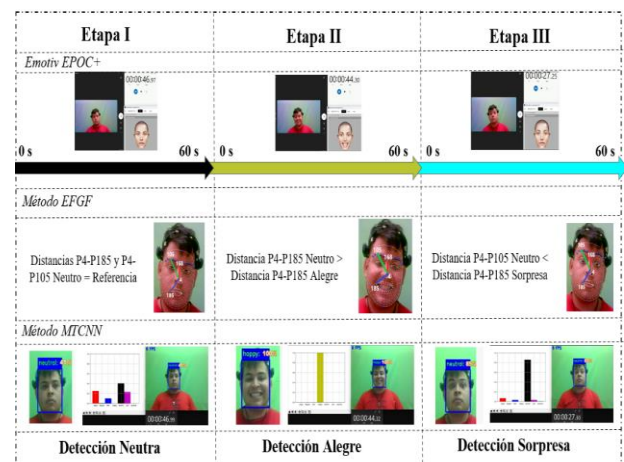


Fig. 5. Comparación de las 3 etapas respecto al tiempo para el método Emotiv, EFGF y el modelo MTCNN.

Tabla. 3. Proporciones de grupos de frames con respecto a una expresión facial.

Detección	Proporción de cejas (PC) u. a	Proporción de boca (PB) u. a.
neutral (173)	0.522595	0.74372
alegre 1 (131)	0.523548	0.81838
alegre 2 (132)	0.523548	0.81837
alegre 3 (133)	0.523546	0.81838
sorpresa 1 (182)	0.489928	0.740311
sorpresa 2 (183)	0.502109	0.715891
sorpresa 3 (184)	0.474564	0.676618

En la Fig. 6 se observan los 3 tipos de emociones, donde la Fig. 6a es neutra, Fig. 6b alegre y la Fig. 6c sorpresa. En las 3 etapas en su mayoría para los métodos son efectivos en la emoción alegre con un 100% de efectividad. Para la técnica BCI se presentan la predicción del gesto en relación con la tensión de los músculos del rostro, la diadema y el software Xavier ofrece el cambio simultáneo al momento de intercambia la posición muscular del rostro, efectuando ligeros errores en relación con generar un entrenamiento más profundo.

Para el método EFGF, las distancia que se extraen de las coordenadas (X,Y) determinan que las proporciones PC y PB de la expresión facial disminuye en alegre y aumenta en sorpresa; es decir, el cambio observado está directamente relacionado con los movimientos locales en el rostro para la ceja y boca en relación con la referencia neutra.

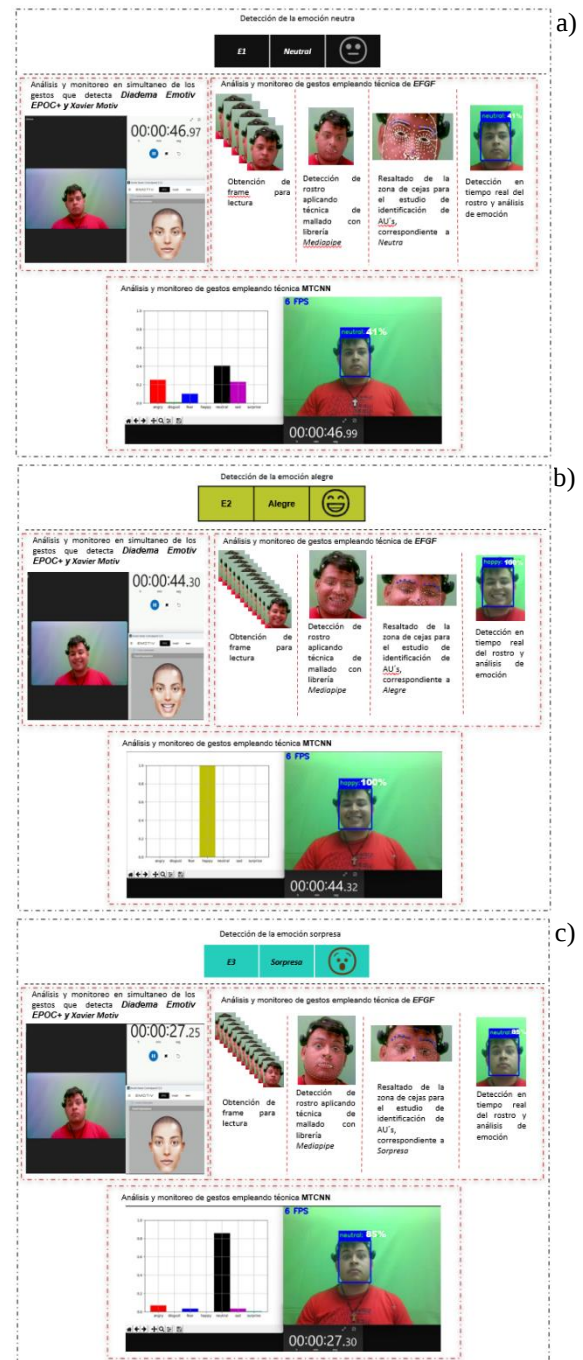
En cambio, para el método MTCNN se observa que la emoción sorpresa es confundida con el neutral teniendo un porcentaje mayoritario del 85%.

En cuanto al modo neutral se detecta un error de detección con las emociones miedo, ira y tristeza, teniéndose a la expresión neutral con tan solo un 41%, un valor de certeza menor en comparación al 85% emitido cuando se ejercía la emoción sorpresa (Revelo, 2021).

Conclusiones

Una aplicación específica como detectar la emoción de una persona con métodos BCI o Machine Learning pueden apoyar con tareas en psicología, medicina, empresas, educación o seguridad. En este sentido los métodos EFGF y MTCNN presentan una arquitectura de aprendizaje automático con un enfoque en el reconocimiento de la expresión y emoción del usuario. En conjunto se trabaja con la capacidad de corregir a sí mismo el modelo con el aumento de los entrenamientos de las redes neuronales y pruebas. El método EFGF requiere robustecer la clasificación del sistema aumentando los puntos de referencia de la malla, así como las distancias de proporciones. En cuanto al método MTCNN se requiere ajustar la emoción neutra para que el algoritmo reconozca adecuadamente el rostro. Así pues, la diadema Epoc+ presentó irregularidades en la detección de la emoción neutra, confundiendo con la emoción sorpresa. Esto es debido a que requiere una intervención directa con el usuario, entrenar el modelo para la persona y mejorar la exactitud con una serie de entrenamientos.

Para concluir se determinó que los modelos IA son más efectivos para reconocer la emoción debido al cómputo interno y el análisis computacional. La base de datos, clasificación y reconocimiento en tiempo real dependen en su totalidad de las mallas, los face landmarks y las distancias entre los puntos de referencia del rostro. Dicho de otra manera, los métodos de detección de expresiones faciales recolectan información necesaria como su emoción, edad aparente o su estado emocional en el momento de una entrevista, etc. de una manera extraordinaria.

**Fig. 6.** Detección simultánea en los tres métodos.

Agradecimientos

Se agradece a Johan F. Llamas Becerra por su participación en el desarrollo del proyecto.

Referencias

- Akhmedov, F., Abdusalomov, A. B., Mukhiddinov, M., & Cho, Y. I., 2022. Development of Real-Time Landmark-Based Emotion Recognition CNN for masked faces. *Sensors*, 22(22), 8704. <https://doi.org/10.3390/s22228704>
- Arroyo, A. & Anai, A., 2022. Método de extracción de rasgos faciales para la autenticación de personas. Tesis Doctorado. BUAP. México. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/16797>
- Barrionuevo, C., Ierache, J. S., & Sattolo, I. I., 2020. Reconocimiento de emociones a través de expresiones faciales con el empleo de aprendizaje supervisado aplicando regresión logística. CACIC <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/113243>
- Bustamante, S., 2014. Algoritmos de procesamiento de imagen aplicados a la detección de figuras geométricas y sus propiedades espaciales. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Caballo, V., 2009. Manual de evaluación de entrenamiento de las habilidades sociales. Siglo XXI.
- Chávez-Sáenz, V., Torres-Ramírez, D., Herrera-Ogaz, J., & Hernández-Rodríguez, A., 2016. Adquisición y análisis de señales electroencefalográficas utilizando el dispositivo Emotiv EPOC. *Revista de Tecnología e Innovación*, 107.
- Chávez-Sáenz, 2016, Velia, Jimenez-González, Fernando, Torres-Ramírez, Dulce y Perezklapez, Christian. Estudio de las señales EEG generadas a partir de expresiones faciales. *Revista de Investigación y Desarrollo* 2016, 2-6: 115-124
- Denzin NK, 2009, On Understanding Emotion. New Brunswick, NJ: Transaction Publishers
- Ekman, P., 1984. Expression and the nature of emotion. In K. R. Scherer y P. Ekman (Eds.), *Approaches to Emotions*. Hillsdale: Erlbaum
- Emotiv, 2023 Guía BCI <https://www.emotiv.com/bci-guide/>
- Emotiv, 2023 Guía EEG <https://www.emotiv.com/eeg-guide/>
- Ghofrani A., Toroghi, R. M., & Ghanbari, S., 2019. Realtime face-detection and emotion recognition using mtcnn and minishufflenet v2. In 2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI) (pp. 817-821). IEEE.
- Roldan González, E., et al, 2021. Diseño de un sistema de captura de movimiento facial para la cuantificación de gestos faciales. *Revista Virtual Universitaria*, 16(2), 84-88. Recuperado a partir de <https://revistas.fumc.edu.co/index.php/rvu/article/view/102>
- Google., 2023. GitHub - Google/MediaPipe: cross-platform, customizable ML solutions for live and streaming media. GitHub. <https://github.com/google/mediapipe>
- Python, 2023, math — Funciones matemáticas — documentación Python <https://docs.python.org/es/3.10/library/math.html>
- Hassouneh, A., Mutawa, A. M., & Murugappan, M., 2020. Development of a Real-Time Emotion Recognition system using facial expressions and EEG based on machine learning and deep neural network methods. *Informatics in Medicine Unlocked*, 20, 100372. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100372>
- Hou, X., Wang, Y., Wang, X., Zhao, J., Zhu, X., & Su, J., 2021. A markerless 2d video, facial feature recognition-based, artificial intelligence model to assist with screening for parkinson disease: development and usability study. *Journal of Medical Internet Research*, 23(11), e29554. <https://doi.org/10.2196/29554>
- Lowe, J., 2020. Ocular Motion Classification for Mobile Device Presentation Attack Detection. University of Missouri-Kansas City.
- Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., ... & Grundmann, M., 2019. Mediapipe: A framework for perceiving and processing reality. In *Third workshop on computer vision for AR/VR at IEEE computer vision and pattern recognition (CVPR) (Vol. 2019)*.
- Pham, T. D., & Tran, D., 2012. Emotion Recognition Using the Emotiv EPOC Device. *Lecture Notes in Computer Science*, 394-399. doi:10.1007/978-3-642-34500-5_47
- Abigail, P. M. Q. 2021. Detección automatizada de emociones a través del rostro, una revisión del estado del arte. Retrieved from <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/112586>
- Revelo. L., 2021. GitHub – DavidReveloLuna /Face_Emotion. GitHub. https://github.com/DavidReveloLuna/Face_Emotion
- Sánchez-Ruiz, M., Flores-Monroy, J., Escamilla-Hernández, E., Nakano-Miyatake, M., & Perez-Meana, H., 2022. Detección de estados de ánimo en ambientes no restringidos. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10 (Especial4), 110-115.
- Tang, J., Xu, M., Han, J., Liu, M., Dai, T., Chen, S., & Ming, D., 2020. Optimizing SSVEP-based BCI system towards practical high-speed spelling. *Sensors*, 20(15), 4186.
- Zhang, N., Luo, J., & Gao, W., 2020. Research on Face Detection Technology Based on MTCNN. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/iccnea50255.2020.00040>

Recibido: 10 de noviembre de 2023

Aceptado: 20 de marzo de 2024

Castro-López, Ángel: Estudiante de Ingeniería en Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México Campus Irapuato.

Correo electrónico: LIS20110070@irapuato.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0009-0004-8726-9850>

Razón-González, Juan: Mechanical Engineering at the Instituto Tecnológico de Celaya, Mexico. Master of Science in Mechanical Engineering at Universidad Autónoma de Nayarit, Mexico. Research professor of Department of electromechanics of TecNM/Irapuato.

Correo electrónico: juan.rg@irapuato.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-9457-5029>

Martínez-Jiménez, Leonardo: Eng. in Communications and Electronics, M.E in Electrical Engineering and Ph.D. in Electrical Engineering of University of Guanajuato, México.

Correo electrónico: leonardomj@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-7062-7154>

Torres-del Carmen, Felipe: Dr. of Science in Electronic Engineering. National Center for Research and Technological Development, Morelos, Mexico. Research professor of Department of Mechanical, DICIS, UG. Correo electrónico: fdj.torres@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-5792-2098>

Cano-Lara, Miroslava: Eng. in Communications and Electronics and the M.E in Electrical Engineering degree, both University of Guanajuato, Mexico. Ph.D. in Optics Science at CICESE, B.C, México and Postdoctoral at DICIS, University of Guanajuato. Research professor of Department of Mechatronic of TecNM/Irapuato.

 <https://orcid.org/0000-0002-3335-2710>