

Volume 5, Issue 1

May 2018

ISSN: 1390-9266

# LAJC

## LATIN-AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING

FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

QUITO - ECUADOR

Editor in Chief:

PhD. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

<http://lajc.epn.edu.ec/>



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS



# LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING

## LAJC

Vol V, Issue 1, May 2018  
ISSN: 1390-9266  
e-ISSN: 1390-9134

Published by:  
Escuela Politécnica Nacional  
Facultad de Ingeniería de Sistemas

Quito – Ecuador

## **LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING – LAJC**

### **Published by:**

Escuela Politécnica Nacional  
Facultad de Ingeniería de Sistemas  
Ecuador

### **Editorial Committee:**

Dra. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Dr. Edison Loza, Université Grenoble Alpes, France  
Dr. Alex Buitrago, Universidad Externado de Colombia, Colombia  
Dr. Henry Roa, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

### **Editor in Chief:**

Dra. Jenny Torres, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

### **Section Editors:**

Ing. Alberto Castillo, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Ing. Hernán Ordoñez, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

### **Mailing Address:**

Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería de Sistemas  
Ladrón de Guevara E11-253, La Floresta  
Quito-Ecuador, Apartado Postal: 17-01-2759

### **Web Address:**

<http://lajc.epn.edu.ec>

### **E-mail:**

[lajc@epn.edu.ec](mailto:lajc@epn.edu.ec)

### **Frecuency:**

2 issues per year

### **Circulation:**

350

## EDITORIAL

### Ciencia Tecnología y Sociedad

Los estudios Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) responden a una línea de trabajo académico y de investigación, que tiene por objeto el estudio de la naturaleza social del conocimiento científico-tecnológico y sus incidencias en los diferentes ámbitos económicos, sociales, ambientales y culturales. Al definir su objeto de estudio, autores como González García, López, Lujan, Martín, Osorio et al. (1996) señalan que la expresión "Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS)" suele definir un ámbito de trabajo académico cuyo objeto de estudio está constituido por los aspectos sociales de la ciencia y la tecnología, tanto en lo que concierne a los factores sociales que influyen sobre el cambio científico-tecnológico, como en lo que atañe a las consecuencias sociales y ambientales.

En este número, la revista Latin American Journal of Computing (LAJC) ha incorporado el área de Ciencia Tecnología y Sociedad (CTS) en el alcance de sus líneas de investigación cuyo principal objetivo es promover los análisis y debates relativos a la problemática de la ciencia y la tecnología en los ámbitos culturales, sociales y políticos.

El autor Juan Fernández Sastre de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-Ecuador) nos presenta en su artículo "*Está Ecuador preparado para cambiar su matriz productiva?: un análisis del sistema ecuatoriano de innovación*" una descripción sobre el sector empresarial ecuatoriano, sus agentes científico-tecnológicos y las interacciones que se producen entre ambos con el objetivo de reflexionar sobre la capacidad del sistema ecuatoriano de innovación para transitar hacia una matriz productiva basada en el conocimiento. Este estudio se lleva a cabo a través de una revisión de las encuestas ecuatorianas de ciencia, tecnología e innovación y de varios estudios empíricos sobre Ecuador. El análisis indica que el Ecuador todavía no cuenta con un sistema de innovación con capacidad de aprendizaje, que posibilite dicha transición, cuando las condiciones tecnológicas sean propicias.

El resto de artículos publicados corresponden a las áreas de sistemas inteligentes y sistemas de información.

Vizuete-Salazar y Segura-Morales compila en su artículo "*Métodos y fuentes de datos para medir factores socioeconómicos: una revisión de la literatura*" una serie de fuentes de datos y métodos alternativos que se pueden aplicar para reducir los costos y el tiempo requerido para actualizar dicha información. La revisión se centra en cómo se han utilizado estas fuentes y métodos en los países en desarrollo durante el tiempo, destacando las soluciones para satisfacer la necesidad de factores socioeconómicos actualizados de la población.

Diana Paola Baño et al. nos presenta una "*Percepción Remota en el Diseño de Estrategias de planificación Urbana, Caso de Estudio Isla De Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito*". Este estudio analizó la isla de calor urbana UCI del Distrito Metropolitano de Quito, sobre la base del cálculo de la temperatura superficial de Landsat 7 ETM multiespectral y Landsat 8 OLI / TIRS. Se calculan índices de vegetación NDVI y construcciones NDBI, y se establece la relación de estas variables con la superficie de la temperatura mediante la aplicación de la correlación lineal de Pearson.

Alex Armendáriz et al. presentan en su trabajo titulado "*Módulo De Aurilización en Tiempo Real para Dispositivos de Navegación Asistida para Personas con Discapacidad Visual*" un módulo de software de aurilización en tiempo real que será utilizado para recrear la sensación acústica producida por un obstáculo sonoro tanto en ambientes virtuales como reales.

Finalmente, deseamos reiterar nuestro agradecimiento al equipo de revisores de nuestra revista de diferentes países; Argentina, Australia, Brasil, Colombia, Ecuador, España, Francia, Japón y Venezuela; quienes han realizado un trabajo excepcional para enriquecer la calidad de los artículos garantizando el desarrollo y crecimiento de LAJC.

Esperamos que los artículos de este número sean de gran utilidad para nuestros lectores.

\*\*\*\*\*

### **Science Technology and Society**

The studies on Science, Technology and Society (STS) respond to a line of academic and research work, which aims to study the social nature of scientific-technological knowledge and its impact on different economic, social, environmental and cultural fields. When defining their object of study, authors such as González García, López, Lujan, Martín, Osorio et al. (1996) point out that the expression "Science, Technology and Society (STS)" usually defines an area of academic work whose object of study is constituted by the social aspects of science and technology, both as regards social factors that influence the scientific-technological change, as in what concerns the social and environmental consequences.

In this issue, the Latin American Journal of Computing (LAJC) has incorporated the area of Science Technology and Society (STS) in the scope of its research lines whose main objective is to promote analyzes and debates related to the problem of science and technology in cultural, social and political spheres.

The author, Juan Fernández Sastre from Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-Ecuador) presents an article entitle "*Is Ecuador ready to change its productive matrix?: an analysis of the Ecuadorian innovation system*" which describes the Ecuadorian business sector, its science and technology organizations and their interactions; with the objective of examining the capacity of the Ecuadorian innovation system to move towards a productive structure based on the use of knowledge. The analysis indicates that Ecuador does not yet have an innovation system with learning capacity, which allows such a transition, when the technological conditions are propitious.

The rest of the articles published correspond to the areas of intelligent systems and information systems.

Vizuete-Salazar and Segura-Morales compiles in their article "*Methods and Data Sources for Measuring Socio-Economic Factors: A Literature Review*" a series of alternative data sources and methods that can be applied to reduce the costs and the time required to update such information. The review focus on how these sources and methods have been used in developing countries during time, highlighting the solutions for satisfying the need of updated socioeconomic factors of the population.

Diana Paola Baño et al. present a "*Remote Sensing in the Design of Urban Planning Strategies, Case Study Urban Heat Island of the Metropolitan District of Quito, Ecuador*". This study analyzed the urban heat island (UHI) of the Metropolitan District of Quito with the calculation of surface temperature of multispectral Landsat 7 ETM and Landsat 8 OLI/TIRS. With these images were calculated indices of vegetation NDVI and constructions NDBI, and are established the relationship of these variables with temperature surface through application of the correlation linear of Pearson.

Alex Armendáriz et al. present in their work titled "*Real Time Auralization Module for Electronic Travel Aid Devices for People with Visual Disability*" a software module for real-time auralization that was used to recreate the acoustic perception produced by a sound obstacle in virtual and real environments.

Finally, we want to reiterate our thanks to the review team of our journal from different countries; Argentina, Australia, Brazil, Colombia, Ecuador, Spain, France, Japan and Venezuela; who have done an exceptional job to enrich the quality of the articles guaranteeing the development and growth of LAJC.

We hope that articles in this issue are very useful for our readers.

**Jenny TORRES OLMEDO**  
**Escuela Politécnica Nacional**  
**Editor in Chief LAJC**



## **Latin American Journal of Computing – LAJC**

### **Reviewers**

We are most grateful to the following individuals for their time and commitment to review manuscripts for Latin American Journal of Computing – LAJC.

Aguiar Pontes Josafá, PhD. Tokyo Institute of Technology, Japan  
Aguilar José, PhD. Universidad de los Andes, Venezuela  
Anchundia Carlos, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Andrade Roberto, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Barriga Jhonattan, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Benalcázar Marco, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Brandão Diego, PhD. Universidade Federal Fluminense, Brasil  
Buitrago Alex, PhD. Universidad Externado de Colombia, Colombia  
Calle Tania, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Carrera Iván, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Carrión Gordón Lucía, MSc. University of Technology Sidney, Australia  
Duarte Ferreira Vera Lúcia, PhD. Universidade Federal do Pampa, Brasil  
Flores Pamela, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Flores Denys, MSc. University of Warwick, England  
Fuentes Díaz Walter, PhD. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador  
García Olaya Angel, PhD. Universidad Carlos III de Madrid, España  
Hallo María, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Hernández Myriam, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Herrera Juan, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Intriago Monserrate, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Loza Aguirre Edison, PhD. Université de Grenoble, France  
Lucio José Francisco, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Luján Mora Sergio, PhD. Universidad de Alicante, España  
Magreñán Ángel Alberto, PhD. Universidad Internacional La Rioja, España  
Meliá Beigbeder Santiago, PhD. Universidad de Alicante, España  
Navarrete Rosa, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Paz Arias Henry, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Pousa Federico, PhD. Universidad de Buenos Aires, Argentina  
Qazi Farrukh, University of Warwick, England  
Ramió Jorge, PhD. Universidad Politécnica de Madrid, España  
Riofrío Diego, MSc. Universidad Politécnica de Madrid, España  
Roa Marin Henry, MSc. The University of Queensland, Australia  
Sánchez Gordón Sandra, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Suntaxi Gabriela, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Torres Olmedo Jenny, PhD. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Torres Olmedo Jeaneth, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador  
Yacchirema Diana, MSc. Universitat Politècnica de València, España  
Zambrano Patricio, MSc. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador



## TABLE OF CONTENTS

<b>Methods and Data Sources for Measuring Socio-Economic Factors: A Literature Review</b> Vizuete-Salazar Yasmina and Segura-Morales Marco .....	11-16
<b>Percepción Remota en el Diseño de Estrategias de planificación Urbana, Caso de Estudio Isla De Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito</b> <i>Remote Sensing in the Design of Urban Planning Strategies, Case Study Urban Heat Island of the Metropolitan District of Quito, Ecuador</i> Diana Paola Baño Saltos, José Gabriel Salazar L., Mónica Susana Delgado.....	17-26
<b>Módulo De Aurilización En Tiempo Real Para Dispositivos De Navegación Asistida Para Personas Con Discapacidad Visual</b> <i>Real Time Auralization Module for Electronic Travel Aid Devices for People with Visual Disability</i> Alex Armendáriz, José F. Lucio-Naranjo y Diego Navas.....	27-36
<b>Is Ecuador ready to change its productive matrix?: an analysis of the Ecuadorian innovation system</b> Sastre, Juan Fernández.....	37-42



# Methods and Data Sources for Measuring Socio-Economic Factors: A Literature Review

Vizuete-Salazar, Yasmina, *Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería de Sistemas,*  
 Segura-Morales, Marco, *Escuela Politécnica Nacional, Departamento en Informática y Ciencias de la Computación*

**Abstract**—The compiling of the population data, to establish its socioeconomic factors, is a high-cost task for governments and regulatory organizations due to the need for financial and human resources. This limitation makes it almost impossible to count on immediate updated socioeconomic population information. This article compiles a series of alternative data sources and methods that can be applied to reduce the costs and the time required to update such information. The review focus on how these sources and methods have been used in developing countries during time, highlighting the solutions for satisfying the need of updated socioeconomic factors of the population.

**Index Terms**—Census, Data analytics, Population, Socio-economic factors.

## I. INTRODUCTION

CENSUSES provide important information about the status of a population since they allow the establishment of its socio-economic factors and through them derive poverty indexes [1].

Poverty is a complex phenomenon that needs to be understood from many points of view in order to be taken into account adequately [2]. Nowadays, poverty is measured in a single dimension called income poverty [3], which is usually based on income or consumption. However, there are other variables with which the socio-economic situation of a family can be established (e.g. the Human Development Index [HDI] uses three dimensions: health, knowledge and life status; the Multidimensional Poverty Index [MPI] is composed of ten indicators grouped in three areas: education, health and living conditions) [3].

The method that is most widely used for collecting socio-economic data is the census. This means conducting door-to-door visits to perform surveys about family structure and the personal situation of each of its members. These visits are

carried out every five to ten years depending on budgetary availability. After processing the survey data, the collected information allows the establishment of socio-economic family situations and, through them, an aggregated value for the whole country. The results allow the government and regulatory organizations to develop social policies to improve the living conditions of the population [3], [4].

However, door-to-door surveys implies a high cost that impacts the state budget, especially in developing countries [4]. Consequently, some methods have been implemented for reducing costs: the number of variables to be compiled is reduced, some census zones are not visited, or the visits are simply postponed [1].

Alternatively, some developing countries have developed alternative data collecting mechanisms to obtain information about families for determining their socio-economic status [1], [4]. These mechanisms include, among others: the use of social networks, administrative records, mobile phone call logs, basic service records. This allows to obtain good estimates of poverty indicators at a lower cost and in a shorter time [1]. Thus, this article aims to identify these alternative methods to collect data from families to determine their socio-economic status, which can be used instead of visits. This research objective will also allow the identification of alternative information sources (i.e. already existing data which is being stored in different public or private institutions) which would make it possible to measure socio-economic indicators [5].

The remainder of this paper is organized as follows: in section II, we present the research question. In section III, we describe the search process. This is followed by a presentation of our main results (section IV). In section V, we present the validity consideration of the literature review. Section VI presents a discussion of our results. The section VII presents the conclusions of the research. Finally, new opportunities of research, derived from this review, are offered.

## II. RESEARCH QUESTION

In this research a systematic literature review was performed following the guidelines proposed by Kitchenham [6].

The research question is "which methods and techniques, other than the traditional door-to-door approach, are being used to predict the socio-economic conditions of population?"

This question allows the identification of other methods that could be used in countries where state financial resources, for

### Article history:

Received 15 April 2018

Accepted 28 May 2018

This work was supported in part by the Secretary of Higher Education, Science, Technology and Innovation of Ecuador (SENESCYT).

Vizuete-Salazar, Yasmina is with the Facultad de Ingeniería de Sistemas, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (e-mail: yasmina.vizuete@epn.edu.ec).

Segura-Morales Marco is with the Departamento en Informática y Ciencias de la Computación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (e-mail: marco.segura@epn.edu.ec).

use in census-type visits to the population in order to determine socio-economic status, are limited[4]. In addition, it allows for the identifying of other population information sources, already existing data which is being stored in different institutions (public or private) which would make it possible to establish behaviors and indicators that then could be related to the socio-economic situation of individuals or their family nucleus, such is the case of electricity consumption data.[5]

### III. LITERATURE REVIEW PROCESS

Considering the aim of the article is to identify alternative methods and data sources to measure socio-economic factors, we focused on publications reporting the use of predictive methods to establish the status, characteristics, conditions, or socio-economic factors of a population. Publications dealing with methods to determine population density, as well as economic growth, were also considered because the method used in these cases could also be used to predict socio-economic factors. It was decided that the words selected for the search were to be mentioned in the title, the keywords or in the abstract. There are the establish criteria for the research process.

The following combination was used as a search string: (socioeconomic OR economic OR household OR poverty OR deprivation OR census OR survey) AND (predictive OR predicting OR “big data” OR “data mining” OR “data analysis” OR analytics). The period for the review was established between 2013 and 2017.

Searches were carried out for collecting electronic articles published in scientific journals and conferences in English using the search engines of SCOPUS and WEB of SCIENCE.

It is necessary to mention that the terminology used to describe the predictive method changes over time, by authors and even by country. In some publications, there are combinations with the concepts of economic growth, population and housing characteristics, so that the selection of publications was difficult to determine which could be used. Accordingly, there were publications identified and selected by the search criteria that did not comply with the objectives of this study (false positive), publications that were not detected in the search but that met the objective posed (false negative or opportunistic publications), and, publications that might be of interest to the objective of this study.

The results of the search carried out are shown in Table I. It shows the order in which the bibliographic databases were consulted. Forty-three publications were found in this manner and were loaded onto ATLAS.TI for compilation and analysis. Finally, twenty-nine publications, that comply with the selection criteria and contribute to answering the posed research question, were selected. Selected articles come mainly from scientific journals (24) and the rest are from conferences (5). Most of publications correspond to the year 2017 (9 of 29).

TABLE I  
RESULTS OF THE REVIEW IN BIBLIOGRAPHIC DATABASES

Source	Searched	Selected
--------	----------	----------

Scopus	35	25
Web of Science	8	4
Total	43	29

## IV. RESULTS

### A. Analysis of the evolution of the methods

The methods used, and the purpose of the selected publications are listed in Table II. A grouping of the purpose versus method used was also carried out and the results are listed on Table III.

The largest number of publications (11) is intended to predict or identify the factors of the population using various methods: correlations, decision trees, statistical distributions, regressions, and tabulation of administrative data (Referred in Table III).

There are four publications that identify the population's poverty situation using the correlation method, and three publications to identify population characteristics through correlations, decision trees and gravity models. Other methods used are machine learning, map reduce, random coefficient model and statistical means for processing administrative records.

Upon grouping the methods vs. publication purposes, as shown in Table IV, the correlation and regression methods are the most commonly used methods. Correlation has been used to determine population characteristics, poverty situation and socio-economic factors. Regression has been used to determine population group sizes, economic growth, population mobility, proxies for social data and socio-economic factors.

TABLE II.  
METHOD AND PURPOSE OF THE SELECTED ARTICLES

Id	Method	Purpose
1	Correlation	Socio-economic factors
2	Correlation	Socio-economic factors
3	Decision tree	Socio-economic factors
4	Machine learning	Vacancy risks
5	Log-normal distribution with cross-regional and time variations	Socio-economic factors
6	Random coefficient model	Poverty rates
7	Regression	Proxies for social data
8	Correlation	Poverty situation
9	Regression	Socio-economic factors
10	Correlation	Poverty situation
11	Regression	Socio-economic factors
12	Correlation	Poverty situation
13	Regression	Population mobility
14	Correlation	Population characteristics
15	Register-based statistics administrative	Census
16	Regression	Economic growth and population aging level
17	Map Reduce	Predict Income
18	Resource selection probability function	Population density
19	Bayesian methodology	Environmental and socio-economic representativeness
20	Correlation	Poverty situation
21	Decision tree	Population characteristics
22	Reduction methods	Socio-economic factors
23	Regression	Crowd sizes
24	Regression	Socio-economic factors
25	Building-population gravity model	Population characteristics

Id	Method	Purpose
26	Tabulation and cross-tabulation	Socio-economic factors
27	Machine learning	Socio-economic factors
28	Correlation	Socio-economic factors
29	Regression	Patterns of co-benefit behaviors

Still in Table IV and according to the timeline, the publications show that the use of methods that allows establishing the socio-economic factors is tied to technological development and the data available at that moment.

### B. Evolution of Methods

Historically, the collection of data on general populations has been halted due to financial, technological, and even ethical factors [7]. For this reason, research is being carried out to look for less expensive alternatives, which take advantage of technology.

TABLE III.  
PURPOSE VS METHOD OF SELECTED ARTICLES

Purpose	Method	2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Census	Register-based statistics				1	1		
Crowd sizes	Regression				1	1		
Economic growth & population aging level	Regression			1	1			
Environmental & socio-economic representativeness	Bayesian methodology			1	1			
Patterns of co-benefit behaviors	Regression				1	1		
	Correlation		1			1		
Population characteristics	Decision tree				1	1		
	Building-population gravity model				1	1		
	Resource selection probability function				1	1		
Population density					1	1		
Population mobility	Regression			1			1	
Poverty rates	Random coefficient model	1				1		
Poverty situation	Correlation	2	1	1	4			
Predict Income	Map Reduce			1	1			
Proxies for social data	Regression	1				1		
	Correlation	1	1			1	3	
	Decision tree	1				1		
	Log-normal distribution with cross-regional & time variations	1				1		
Socio-economic factors	Machine learning				1	1		
	Reduction methods				1	1		
	Regression			2	1	1	4	
	Tabulation and cross-tabulation					1		
	Register-based statistics					1		
	Census					1		
	Building-population gravity model						1	1
Vacancy risks	Machine learning	1				1		

TABLE IV.  
METHOD VS PURPOSE OF SELECTED ARTICLES

Method	Purpose	2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Bayesian methodology	Environmental and socio-economic representativeness					1	1	
Correlation	Population characteristics			1	1	1	1	
	Poverty situation			2	1	1	4	
	Socio-economic factors	1	1			1	3	
Decision tree	Population characteristics					1	1	
	Socio-economic factors		1				1	
Log-normal distribution with cross-regional and time variations	Socio-economic factors		1				1	
Machine learning	Socio-economic factors					1	1	
	Vacancy risks	1					1	
Map Reduce	Predict Income					1	1	
Random coefficient model	Poverty rates			1			1	
Reduction methods	Socio-economic factors					1	1	
	Crowd sizes					1	1	
	Economic growth and population aging level					1	1	
Regression	Patterns of co-benefit behaviors						1	1
	Population mobility				1		1	
	Proxies for social data				1		1	
	Socio-economic factors		1	1	1	3		
Resource selection probability function	Population density					1	1	
Tabulation and cross-tabulation	Socio-economic factors						1	1
Register-based statistics	Census					1	1	
	Building-population gravity model						1	1

The door-to-door visitation method implies that the data remains the same until the next visit. For this reason, in order to estimate the current situation of the population [4], simulations are used as a very useful tool to simulate the changes that occur in an annual basis.

Data mining methods have become the most widely used in financial and commercial sectors to identify customer patterns and behaviors [8]. The reviewed articles show that these methods are being used to look for relevant information of the populations that allows socio-economic factors to be inferred, opening a new area of application for these methods.

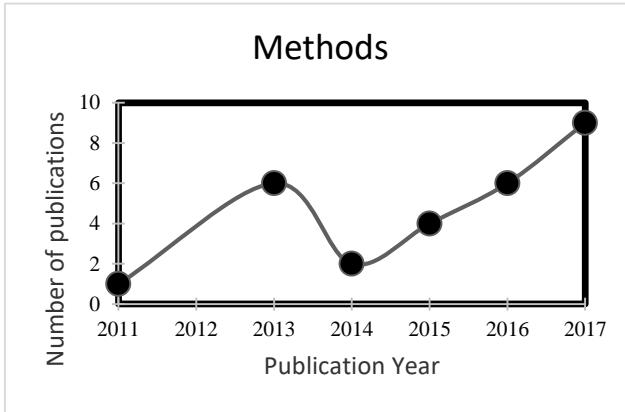


Fig. 1. Time line of the number of the articles per year, showing the different methods used to determine the socio-economic factors, poverty conditions and social status, beyond others.

### C. Data Sources

Satellite data and images from Google Maps are used in several studies (e.g. [3], [9]–[12]) to establish behavior patterns among families in selected areas.

Another data source is the one generated from Twitter (e.g. [13]–[15]). The use of “tweet data” in poor sectors allows to estimate the population in those areas as well as the relationships that are established among Twitter users.

Mobile telephony is also one of the most used data sources to establish poverty maps used by academic contributions (e.g. [1]–[3], [16], [17]). The authors of these articles agree that this source has a huge potential for determining socio-economic status since it generates a large volume of data that would allow establishing relations between users by means of a “who-calls-whom” search.

### D. Relationship between Data Sources and Methods

As shown in Table III, correlation is one of the most widely used methods for establishing the socio-economic status of the population. In the case of the use of telephone records, the analysis of certain characteristics of the records allows to establish the degree of poverty of the families. This is done by establishing networks of communication between users with similar socio-economic characteristics. This method establishes behavior patterns among users (assembling a virtual communication network). Thus, it is possible to correlate the way in which the users communicate and with whom they do it with poverty levels established for the user residence area [1], [2].

Twitter is also used on correlation studies by exploiting the geographical metadata inserted within each message at the time of being sent to the recipient. This establishes a communication network among the social network that allows the identification of patterns for inferring socio-economic factors. As indicated by Botta, Moat and Preis [15], the geographic location of the tweets allows inferring where a person resides (location under normal conditions) and his/her socio-economic status based on the characteristics of his/her contacts.

Correlations studies are also performed using geospatial data or satellite images. Similarities can be established for the population that lives in a given area while it is compared with areas already defined as being poor. Thus, it can be inferred that the population in a certain area has an established poverty level [11], [18].

All these studies highlight that, using correlation as a method; it is possible to use different data sources to infer the socio-economic factors of the population.

### V. VALIDITY CONSIDERATIONS

The literature review followed the guidelines proposed by Kitchenham. In Section III, it is mentioned the research planning process, identified the protocol used for searching the publication, the period for the bibliographic review, and the search engines used.

The research allows identifying the alternative methods used to collect data from families that is generated daily and continuously. This point is important to mention, since it would imply that it is possible to determine the socio-economic situation of families with the use of this data. Therefore, the research question was answered because we find alternative methods instead of the door-to-door approach.

In addition, the literary review also showed which methods were used to process the data and predict the socio-economic factors. Correlations and regressions are the most used methods.

### VI. DISCUSSION

The review shows various alternatives of data sources and methods that can be applied to infer the socio-economic conditions of the population.

However, it is necessary to point out that in none of the selected publications there is a comparison of the costs incurred by each one of these alternatives and what the equivalent door-to-door visits method implies. This could be a good measure of what the budgetary benefit of using these data sources and alternative methods is.

Another point that remains pending is determining whether the data used in each case was available for the studies carried out. There are publications in which the mobile service operators have made their data available to the scientific community to be analyzed and to determine its use.

The use of the methods for estimating poverty is subject to the variables chosen for the construction of the MPI or HDI indexes. It is important to establish if the available data can be related to the measures of these indexes and thus achieve a correct measurement.

### VII. CONCLUSIONS

The results show there are alternative methods to collected socio-economic data from families instead of the door-to-door approach, using data, which is available from satellite data, images from Google Maps, the consumption of basic services like mobile telephony and electricity, and from social networks. Each data source generates a large volume of data that allows establishing behavioral patterns and relationships of the population. Therefore, it is possible to estimate the

current situation of the population and to make simulations of how the socio-economic situation will vary over time.

Based on our analysis, it is crucial to determine the kinds of variables that can contribute to establish a multidimensional index to measure the socio-economic status of the families. The input data influences the selection of the dimensions to compose the aggregated index.

For this reason, the information technology tools are used to simulate the changes, merging the data and choosing the variables that can contribute to find the better approach to measure the socio-economic factors of the families.

Correlation method allows analyzing characteristics of the collected data and establish the patterns of the population, thus it is possible to find similarities between people and to infer the socio-economic situation.

Regression method also is used to measure socio-economic factors, determining the population group sizes and associating with the economic growth of the country. It contributes to use the historical data to establish the behaviors of people and communities.

The combination of these methods and the IT tools can be a great contribution to predict socio-economic factors in less time and at lower cost

### VIII. FUTURE STUDIES

Methods and data sources that would allow inferring the socio-economic factors of the population have been considered in this study, but it is possible to consider the inclusion of other sources that have not been mentioned in the revised publications.

It is possible to consider institutional databases from registry offices, labor ministries, health ministries, or even internal revenue services, because they can contribute to better adjust the inference of the socio-economic factors. Some of this data is already available in open data repositories.

With the inclusion of phone and Tweeter logs, poverty indicators could be built with data that is updated periodically. This would mean that new methods could be applied to provide low-cost poverty indicators, which would represent significant savings for the government budget and would allow updated information for the creation and adjustment of public policies.

### REFERENCES

- [1] C. Smith-Clarke, A. Mashhadi, and L. Capra, "Poverty on the Cheap: Estimating Poverty Maps Using Aggregated Mobile Communication Networks," *Proc SIGCHI Conf Hum Factors Comput Syst*, pp. 511–520, 2014.
- [2] N. Pokhriyal, W. Dong, and V. Govindaraju, "Virtual Networks and Poverty Analysis in Senegal," 2015.
- [3] N. Pokhriyal and D. C. Jacques, "Combining disparate data sources for improved poverty prediction and mapping," *Proc Natl Acad Sci*, no. 12, p. 201700319, 2017.
- [4] A. Mathiassen, "Testing Prediction Performance of Poverty Models: Empirical Evidence from Uganda," *Rev Income Wealth*, vol. 59, no. 1, pp. 91–112, 2013.
- [5] B. Anderson, S. Lin, A. Newing, A. B. Bahaj, and P. James, "Electricity consumption and household characteristics: Implications for census-taking in a smart metered future," *Comput Environ Urban Syst*, vol. 63, pp. 58–67, 2017.
- [6] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review," *Inf Softw Technol*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, 2009.
- [7] D. Helbing and S. Ballesti, *From social data mining to forecasting Socio-Economic crises*, vol. 195, no. 1. 2011.
- [8] V. Atalay, S. Ustun, and S. Bulbul, "The Determination of Socio-Economic Factors Affecting Student Success by Data Mining Methods," *2013 12th Int Conf Mach Learn Appl*, vol. 2, pp. 540–542, 2013.
- [9] E. M. Weber, V. Y. Seaman, R. N. Stewart, T. J. Bird, A. J. Tatem, J. J. McKee, B. L. Bhaduri, J. J. Moehl, and A. E. Reith, "Census-independent population mapping in northern Nigeria," *Remote Sens Environ*, vol. 204, no. February, pp. 786–798, 2018.
- [10] Y. Yao, X. Liu, X. Li, J. Zhang, Z. Liang, K. Mai, and Y. Zhang, "Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data," *Int J Geogr Inf Sci*, vol. 31, no. 6, pp. 1220–1244, 2017.
- [11] T. Gebru, J. Krause, Y. Wang, D. Chen, J. Deng, E. L. Aiden, and L. Fei-Fei, "Using Deep Learning and Google Street View to Estimate the Demographic Makeup of the US," vol. 0, 2017.
- [12] D. Quercia and D. Saez, "Mining urban deprivation from foursquare: Implicit crowdsourcing of city land use," *IEEE Pervasive Comput*, vol. 13, no. 2, pp. 30–36, 2014.
- [13] R. O. Sinnott and W. Wang, "Estimating micro-populations through social media analytics," *Soc Netw Anal Min*, vol. 7, no. 1, 2017.
- [14] C. J. Vargo and T. Hopp, "Socioeconomic Status, Social Capital, and Partisan Polarity as Predictors of Political Incivility on Twitter: A Congressional District-Level Analysis," *Soc Sci Comput Rev*, vol. 35, no. 1, pp. 10–32, 2017.
- [15] F. Botta, H. S. Moat, and T. Preis, "Quantifying crowd size with mobile phone and Twitter data," *R Soc Open Sci*, vol. 2, no. 5, p. 150162, 2015.
- [16] J. Blumenstock, G. Cadamuro, and R. On, "Predicting poverty and wealth from mobile phone metadata," *Science (80-)*, vol. 350, no. 6264, pp. 1073–1076, 2015.
- [17] B. Aragona and D. Zindato, "Counting people in the data revolution era: challenges and opportunities for population censuses\*," *Int Rev Sociol*, vol. 26, no. 3, pp. 367–385, 2016.
- [18] P. R. Choudhury and M. K. Behera, "Using Administrative Data for Monitoring and Improving Land Policy and Governance in India," *Proc 10th Int Conf Theory Pract Electron Gov - ICEGOV '17*, pp. 127–135, 2017.

**Yasmina Vizuete-Salazar** was born in Quito, Ecuador in 1973. She received the B.S. in informatics engineering from the Central University of Ecuador, Quito, in 2000. She received the M.S. degree in business information management



from the Central University of Ecuador, Quito, in 2006. She also received the M.S. degree in auditing in quality management, in 2011 from the Technical Particular University of Loja (Loja). Currently, she is a doctoral student of the Informatics Doctorate Program at the National Polytechnic School of Quito, Ecuador.

She is a professional of computer science with experience in technological administration, formulation and management of projects, management information systems, redefinition of processes and strategic planning for the organization. From 2001 to 2015, she was Expert Data Analyst and Project Manager in the social area,

with the specialty in conditional and unconditional cash transfers, with the Ministry of Economic and Social Inclusion of Ecuador. The last position was UNICEF consultant as a Project Manager, leading the development team and process for the delivery of the database-processing platform according to the guidelines and requirements made by the Ministry of Economic and Social Inclusion of Ecuador. The aim of the project was to ensure the proper functioning of the cash transfers without affecting the continuity of the business, with the highest standards of safety and quality. Currently, she is researching about the measurement of multidimensional poverty in Ecuador.

Marco Segura-Morales was born in Quito, Ecuador, in 1978. He received the B.S. degree in Computer Science from the Escuela Politécnica Nacional of Ecuador in 2004. He received his M.Sc. degree in Engineering Management in 2011 and his PhD degree in Systems Engineering in 2015 from the George Washington University, Washington D.C., USA.



He has more than fifteen years of solid experience in the fields of Software Engineering, Data Management, and Systems Engineering, leading the successful implementation of projects in local and international environments. Since 2016, he is a full-time professor at the Facultad de Ingeniería de Sistemas of the Escuela Politécnica Nacional, and his areas of research include Software Engineering and Information Systems. He has participated also as a revisor for the Latin American Journal of Computing and the IEEE ETCM.

# Percepción Remota en el Diseño de Estrategias de planificación Urbana, Caso de Estudio Isla De Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito

## *Remote Sensing in the Design of Urban Planning Strategies, Case Study Urban Heat Island of the Metropolitan District of Quito, Ecuador*

Diana Paola Baño Saltos, José Gabriel Salazar L, Mónica Susana Delgado

**Resumen** - Este estudio analizó la isla de calor urbana UCI del Distrito Metropolitano de Quito, sobre la base del cálculo de la temperatura superficial de Landsat 7 ETM multispectral y Landsat 8 OLI / TIRS. Se calculan índices de vegetación NDVI y construcciones NDBI, y se establece la relación de estas variables con la superficie de la temperatura mediante la aplicación de la correlación lineal de Pearson. Los resultados indican que las islas de calor son más pronunciadas hacia las áreas rurales donde hay un uso combinado de la tierra entre la construcción horizontal, las industrias y el equipo, en comparación con las áreas urbanas donde prevalece la evolución vertical. El índice de vegetación NDVI presenta una correlación inversa con la temperatura superficial y la tasa de construcciones, correlación directa, mientras que las temperaturas superficiales obtenidas de Landsat 7 y 8 Landsat no son comparables. En general, la caracterización de las islas de calor urbanas se explica mejor a través del análisis de la relación entre la temperatura de la superficie y el uso de la tierra.

**Palabras clave** — Calor urbano de isla, temperatura de superficie terrestre, índice de vegetación de diferencia normalizada, índice de diferencia estándar de construcción.

**Abstract**— This study analyzed the urban heat island (UHI) of the Metropolitan District of Quito with the calculation of surface temperature of multispectral Landsat 7 ETM and Landsat 8 OLI/TIRS. With these images were calculated indices of vegetation NDVI and constructions NDBI, and are established the relationship of these variables with

temperature surface through application of the correlation linear of Pearson. The results indicate that heat islands are more pronounced towards rural areas where there is a combined land use between horizontal construction, industries and equipment, compared to urban areas where there is prevalence of vertical developments. The NDVI vegetation index presents an inverse correlation with surface temperature and the rate of constructions, direct correlation, while surface temperatures obtained from Landsat 7 and 8 Landsat images are not comparable. In general, characterization of urban heat islands is best explained through the analysis of the relationship between surface temperature and land use.

**Index Terms**— Island Heat Urban, Land Surface Temperature, Index of Vegetation of Difference Normalized, Index of Difference Standard of Buildings.

## I. INTRODUCTION

EL crecimiento físico de las ciudades y su expansión demográfica implican una gran demanda de recursos naturales, que sumado a la generación de residuos, provocan impactos en el ambiente, afectando el equilibrio climático del su entorno (ONU Habitat, 2012). El reemplazo de cobertura vegetal por tejido urbano modifica los procesos energéticos e hídricos que influyen en el movimiento de las masas de aire, originando cambios en las condiciones climáticas locales a nivel atmosférico y superficial (Oke, 1987). Alteraciones que provocan un aumento en la temperatura de la urbe, respecto, de las zonas rurales circundantes, fenómeno conocido como Isla

### Article history:

Received 26 February 2018

Accepted 28 May 2018

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales.

Diana Paola Baño Saltos, Autor Jr. pertenece a la Universidad Internacional SEK del Ecuador

José Salazar, Autor, dirección de estudio pertenece a la Universidad Internacional SEK del Ecuador.

Dirección, mail jose.salazar@uisek.edu.ec

Mónica Susana Delgado, Autor, está afiliado a la Universidad Internacional SEK del Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Universidad de Valencia, su dirección para consultas es: Morlán N49-233 y Cucardas Quito-Ecuador, email: [monica.delgado@uisek.edu.ec](mailto:monica.delgado@uisek.edu.ec), [Susana.delgado@epn.edu.ec](mailto:Susana.delgado@epn.edu.ec), [modelya@uv.es](mailto:modelya@uv.es)

de Calor Urbana (ICU) (Voogt & Oke, 2003). Término empleado por primera vez en 1958 por el inglés Gordon Manley, para referirse a ésta anomalía térmica generada por los centros urbanos (Moreno, 2016).

La presencia del fenómeno de Isla de Calor Urbano, en particular, durante el verano, genera impactos positivos y negativos (EPA, 2016). Entre los positivos, se citan la extensión del ciclo de cultivo de determinadas plantas. En cuanto a los negativos, se incluyen, el aumento del consumo de energía, deterioro de la calidad del aire, alteraciones en la biodiversidad, malestar humano y riesgos para la salud de la población (Sheng et al., 2017; Voogt, 2008).

La cuantificación de la ICU se realiza con base en dos metodologías. La primera, estima la isla de calor de la capa dosel de la capa dosel (ICCD) y de la capa de perímetro (ICCP), por medio de la temperatura de aire (T) con datos provenientes de termómetros instalados en estaciones meteorológicas fijas o en vehículos. La segunda metodología, mide la isla de calor de superficie (ICS) con el empleo de la temperatura de superficie (LST) obtenida de los datos de teledetección satelital o aviones (Sheng et al., 2017; Voogt & Oke, 2003).

Utilizando el segundo enfoque, existen varios estudios que estiman ICS mediante sensores remotos como imágenes satelitales y fotografías aéreas. En este sentido, Roth, et al., (1989), emplearon la radiometría de alta resolución AVHRR de los satélites NOAA para determinar las intensidades de ICU de cinco ciudades costeras del oeste de América del Norte donde establecieron una correspondencia entre el uso de la tierra y los patrones de temperatura, relacionando a las ICU con el grado y tipo de desarrollo urbano. De esta forma estos autores establecieron a las áreas industriales con baja densidad poblacional como zonas más cálidas en comparación a regiones con presencia de vegetación. Oke y Voogt (2003) motivados por las interrogantes metodológicas planteadas por Roth, realizaron una revisión de variables como la naturaleza de la superficie de la imagen, temperatura superficial radiométrica, temperatura real, utilidad de los datos satelitales en modelos climáticos urbanos y la relación entre Islas de Calor Urbano de superficie e Islas de Calor Urbano atmosféricas para evaluar la aplicación de la teledetección térmica en el estudio del clima urbano. Estos autores concluyen que los avances en este campo de estudio se enfocan en el conocimiento de la estructura de superficie, balances energéticos superficiales, determinación de la emisividad, índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y temperatura del aire en y por encima de la capa de vegetación.

Sheng et al., (2017) en Hangzhou, Zhejiang, China, analizaron las diferentes medidas de ICU mediante datos de temperatura superficial provenientes de imágenes Landsat 5 LST y los valores de temperatura del aire.. concluyendo que la ICU cuantificada mediante el uso de imágenes satelitales y la medida en estaciones no son comparables, debido a que la temperatura del aire es una medida directa de la ICU, mientras que, los datos de temperatura superficial proporcionan una medición indirecta tal como Schwarz et al., (2011) afirmaron previamente.,.

Con el fin de mejorar fiabilidad de los datos arrojados por los sensores, se han empleado otras técnicas como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), Índice Normalizado de Agua (NDWI), Índice Normalizado de Construcción (NDBI) y

Índice Normalizado de No Cobertura (NDBal). Gallo et al., (1993), estudio la relación entre temperatura superficial y el índice NDVI, y encontraron temperaturas superficiales más bajas hacia zonas rurales con valores altos de NDVI y, temperaturas altas un NDVI más bajo en áreas urbanas; lo que se relaciona con la aparición de flujos de calor latente y sensible asociados a las características superficiales del terreno. Ling Cheng et al. (2006) al evaluar la relación entre la isla de calor y los cambios en la cubierta de uso de suelo emplearon a un análisis cuantitativo entre la temperatura e índices NDVI, NDWI, NDBI y NDBal encontrando diferencias significativas entre temperaturas asociadas a los diferentes tipos de uso de suelo.

En ese contexto, Yuan y Bauer (2006), al comparar la superficie impermeable con el índice de vegetación NDVI, establecieron una relación lineal entre la temperatura de la superficie terrestre y el porcentaje de superficie impermeable. En la misma línea, Preciado y Aldana (2011) al analizar la isla de calor en la ciudad de Santiago de Cali y su correlación con los índices: NDVI, NDWI y NDBI, evidenciaron, que la disminución de las áreas verdes urbanas y su reemplazo por tejido urbano causa un incremento de temperatura en la urbe.

Por otro lado, en diversos estudios en los que se destacan Ahmed (2017), Silva et al (2018) y Zhaoxinm et al (2018), los cuales realizan estudios en Brasil, Egipto y China, muestran la estrecha relación del efecto de isla de calor algunas variable ambientales y socioeconómicas como temperatura, velocidad del viento, vegetación, uso del suelo, densidad poblacional, densidad de construcciones, entre otras. Para evidenciar estas relaciones se emplean regresiones y correlaciones de las distintas variables con el fenómeno para comprobar su efectiva presencia.

En Ecuador, los estudios sobre climatología urbana, son limitados y no se reportan investigaciones del clima del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) con el uso de técnicas de percepción remota, y sólo se registran estudios referenciales del clima urbano. En este sentido, Serrano et al, (2012), realizan un análisis estadístico de datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en un periodo de 30 años, determinando la existencia de un microclima generado por el crecimiento urbano, que se traduce en un aumento de 1°C en la temperatura ambiental por la presencia del fenómeno de isla de calor.

El propósito de este estudio es examinar el fenómeno de Isla de Calor Urbano en el DMQ, mediante técnicas de percepción remota, a base del cálculo de la temperatura superficial de imágenes Landsat 7 y su correlación con el índice de vegetación NDVI y construcciones NDBI. En este contexto, busca exponer cómo los procesos de urbanización entre los años 2006 y 2016, han influido en la calidad térmica del aire del distrito, metodología factible de reproducirse. Con base en los resultados, se podrán identificar las zonas que requieren de estrategias de planificación que conduzcan al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y que reduzcan los efectos negativos de la ICU.

<i>Administración Zonal</i>	<i>Uso de suelo</i>
<b>Norte</b>	
Calderón	Residencial con presencia limitada de actividades económicas y de equipamiento
La Delicia	Residencial, equipamiento e industrial
<b>Centro Norte</b>	
Eugenio Espejo	Residencial, equipamiento y múltiple
<b>Centro Sur</b>	
Manuela Sáenz	Residencial y equipamiento
<b>Sur</b>	
Eloy Alfaro	Residencial con presencia de actividades económicas y equipamiento
Quitumbe	Residencial con áreas de expansión
<b>Valles</b>	
Los Chillos	Residencial con presencia limitada de actividades económicas y de equipamiento
Tumbaco	

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Área de Estudio

El DMQ está ubicado en la provincia de Pichincha, al norte del Ecuador. Tiene una superficie de 4 235,2 km<sup>2</sup> y alberga al 15,5% de la población nacional con aproximadamente a 2 239 191 habitantes para el año 2010. De sus pobladores, alrededor de 1 619 432 (72,32%) habitan en el área urbana y 619 759 habitantes (27,68%) en el área rural. Su territorio se caracteriza por presentar un contexto geográfico irregular, heterogéneo, con diversidad de recursos naturales, variedad de pisos climáticos y ecosistemas. Geográficamente, se distinguen tres zonas: la seca interandina, interandina y lluviosa interandina. Posee quince tipos de climas y dos estaciones climáticas bien definidas: la seca entre junio y septiembre y la lluviosa de octubre a mayo. Presenta temperaturas que varían entre los -4°C y 22°C, no obstante, en la zona mayormente poblada se promedia una temperatura media de 17°C. Administrativamente, está dividido en ocho zonales operativos conformados por 32 parroquias urbanas y 33 rurales, presentando mayor densidad poblacional las ubicadas en la denominada “mancha urbana”, donde se distinguen distintos modelos de clasificación de estructura para uso del suelo (Tabla 1) (Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial 2012 - 2022).

Con el fin de evaluar el comportamiento de la isla de calor de zonas residenciales, de equipamiento y expansión urbana, se seleccionó como área de estudio a un cuadrante del territorio

(Fig. 1), localizado entre las coordenadas indicadas en la Tabla 2, donde se destacan las Administraciones Zonales de Calderón, La Delicia, Eugenio Espejo y Valle de Tumbaco, lo que ha permitido un análisis del comportamiento de la ICU de 14 parroquias urbanas y 11 rurales.

### B. Adquisición de la información

Se utilizaron once imágenes satelitales de la misión Landsat 7 ETM+ en modo SLC-off, disponibles en el sitio web Earth Explorer ([earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov)) operado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Tabla 3). Las imágenes están proyectadas a la zona UTM 17 N, localizadas en el Path 10 y Row 60 y corresponden a las que presentan el menor porcentaje de nubosidad para los meses de junio a septiembre de 2006 a 2016.

### C. Preprocesamiento

El ajuste de la información, consistió en eliminar una serie de líneas de error que se presentan en las imágenes del satélite Landsat 7 ETM, modo SLC off. Este defecto, definido por la USGS como “corrector de línea de escaneo” o “gaps”, provoca una pérdida aproximada del 22% de la información de cada imagen (Rodríguez, 2016). Para corregir esta anomalía, se empleó la herramienta Gapfill del paquete informático ENVI 5.1, la cual, interpola datos de la propia imagen, banda a banda para llenar los datos faltantes, generando un archivo que contiene una nueva imagen sin vacíos. Con las bandas corregidas, se procedió a recortar el área de estudio de las imágenes satelitales, procedimiento realizado con el paquete informático ArcGis 10.1. El proceso descrito fue aplicado para las bandas 3, 4, 5 y 6 VCID.

1. Tabla 2. Coordenadas de Mercator de la zona de estudio de la ICU del DMQ

<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
9996402	774616
9996856	796347
9976791	775032
9977170	796726

Tabla 3. Imágenes seleccionadas para el estudio de la ICU del DMQ

<i>Día de toma</i>	<i>Mes</i>	<i>Año</i>	<i>Sensor</i>
26	jun	2006	
31	jul	2007	
17	jul	2008	
6	sep	2009	
9	sep	2010	
8	jun	2011	Landsat 7
10	jun	2012	
13	jun	2013	
16	jun	2014	
6	ago	2015	
5	jun	2016	

#### D. Cálculo de la Temperatura Superficial

Para el cálculo de la temperatura superficial de las imágenes Landsat 7 y Landsat 8, se aplicó la metodología descrita en el Landsat Project Science Office (2007) de la NASA. Este procedimiento hace referencia a la aplicación de ecuaciones para la determinación de la temperatura superficial de la banda del térmico, que para el sensor Landsat 7 corresponde a la banda 6 VCID\_1 de 8 bits.

El cálculo de la temperatura superficial presupone de manera previa la conversión de niveles digitales ND a unidades radiancia, proceso que ha sido calculado con la herramienta Raster Calculator del programa ArcGis 10.1, al ingresar los parámetros señalados en el archivo de metadata y se genera una nueva imagen con los valores de radiancia y temperatura superficial de la zona.

Con la ayuda de las imágenes se extraerán indicadores como temperatura superficial, NDVI y NDBI que representan variable ambientales y socioeconómicas como temperatura, densidad de vegetación y densidad de construcciones. Adicionalmente, el análisis de las imágenes realizar tomando en cuenta la división zonal que establece el municipio y que comprende la vocación del suelo los diferentes espacios del municipio.

#### E. Conversión de niveles digitales radiancia Landsat 7 ETM+

Los niveles digitales DN de la banda térmica 6 VCID\_1 de 8 bits se convirtieron a unidades de radiancia espectral watts/m<sup>2</sup> ster μm utilizando coeficientes de cambio de escala proporcionados en el archivo de la metadata. La Ecuación 1 (Landsat Project Science Office, 2007), se utilizó para convertir ND en radiancia:

$$L_\lambda = \frac{L_{\text{MAX}_\lambda} - L_{\text{MIN}_\lambda}}{Q_{\text{CALMAX}} - Q_{\text{CALMIN}}} * (Q_{\text{CAL}} - Q_{\text{CALMIN}}) + L_{\text{MIN}_\lambda} \quad (1)$$

Donde  $L_\lambda$  es la radiancia espectral en la apertura del sensor en W/m<sup>2</sup> ster μm,  $L_{\text{MAX}_\lambda}$  radiancia espectral correspondiente al  $Q_{\text{CALMAX}}$  en W/m<sup>2</sup> ster μm,  $L_{\text{MIN}_\lambda}$  radiancia espectral correspondiente al  $Q_{\text{CALMIN}}$  (W/m<sup>2</sup> ster μm),  $Q_{\text{CAL}}$  imagen en DN (banda 6),  $Q_{\text{CALMAX}}$  valor máximo del pixel cuantificado en DN igual a 255 y  $Q_{\text{CALMIN}}$  valor mínimo del pixel cuantificado en DN (correspondiente al  $L_{\text{MIN}_\lambda}$ ), igual a la unidad para productos LPGS y NLAPS (antes del 4/4/2004) y cero para productos NLAPS (después del 4/may/2004).

#### F. Obtención del brillo de superficie captado por el sensor

Los ND de la banda del térmico fueron convertidos de radiancia espectral a temperatura de brillo (referenciada a un cuerpo negro), empleando la ecuación de Planck, (Ecuación 2) (Landsat Project Science Office, 2007) donde se considera una emisividad igual a la unidad.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

Donde, T es la temperatura de brillo superficial en grados Kelvin,  $K_1$  constante de calibración 1 en W/m<sup>2</sup> ster μm (igual a 666,09),  $K_2$  constante de calibración 2 en grados Kelvin (igual a 1 282,71),  $L_\lambda$  radiancia espectral en W/m<sup>2</sup> ster μm, In logaritmo natural.

Los valores de temperatura obtenidos al estar referenciados a un cuerpo negro, deben hacerse correcciones de emisividad acordes a la naturaleza de la cobertura de la superficie (Idrovo & Hernandez, 2009), parámetro que al tratarse de áreas urbanizadas varía entre 0.92 a 0.95 (Voogt & Oke, 2003), considerándose para el área de estudio un valor de emisividad de 0.95. Para el cálculo de la temperatura superficial corregida por emisividad se aplicó la Ecuación 3 (Artis & Carnahan, 1982).

$$T_s = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda * T_B}{\rho}\right) * \ln(\varepsilon)} \quad (3)$$

Donde,  $T_s$  es la temperatura superficial (K),  $T_B$  temperatura de brillo superficial (K),  $\lambda$  centro de longitud de onda (μm), igual a 11.5 μm (Markham & Barker, 1985),  $\rho$  14380 μm-K ( $\rho = h*c/\sigma$ ), h constante de Planck's (6.626x10<sup>-34</sup>J s), c velocidad de la luz (2.998x10<sup>8</sup> m/s),  $\sigma$  constante de Boltzmann (1.38x10<sup>-23</sup>J/K) y  $\varepsilon$  emisividad de superficie. Con respecto a los valores de temperatura superficial, para convertirlos en valores de temperatura en grados Celsius se restó de los resultados obtenidos el valor de 273,15.

#### G. Cálculo de los Índices de Vegetación y Construcciones

Los índices de diferencia normalizada son parámetros que proporcionan información de las propiedades ópticas del suelo y se obtienen a partir de la combinación de valores de reflectividad de pares de bandas (Pérez & Muñoz, 2006). Para conocer la influencia de la vegetación y construcciones en la generación de la isla de calor, se calcularon los índices de diferencia normalizada NDVI y NDBI.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, representa la relación entre los valores de los niveles digitales de las bandas visibles del rojo e infrarrojo cercano NIR (Ecuación 4), contraste que permite evaluar el estado de la vegetación (Marini, 2008 en Preciado & Aldana, 2011).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo}} \quad (4)$$

Al aplicar la Ecuación 4 (Yuan & Bauer, 2006), se obtienen valores de NDVI en el rango de -1.0 a 1.0, donde valores inferiores a cero no aportan significado desde el punto de vista ecológico, mientras que, valores cercanos a la unidad se asocian con alta actividad fotosintética, y valores bajos implican ausencia de vegetación o poca reflexión de luz del infrarrojo (The Landscape Toolbox, 2016).

En cambio, que, el Índice de Diferencia Normalizada de Construcciones NDBI, refleja la respuesta espectral de las superficies edificadas a través de la relación entre niveles digitales de la banda de onda corta del infrarrojo SWIR y la del infrarrojo cercano NIR, de la aplicación de la Ecuación 5 (Ling Chen et, al. 2006), valores cercanos a cero son característicos de zonas urbanas. (Zha et, al. 2003 en Preciado & Aldana, 2011).

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR}-\text{NIR}}{\text{SWIR}+\text{NIR}} \quad (5)$$

#### H. Correlación entre temperatura superficial e intensidad de vegetación y construcciones

Para investigar la influencia de la vegetación y construcciones en la generación de la isla de calor, se recurrió al análisis de Correlación Lineal de Pearson, entre las variables de temperatura superficial e índices de vegetación NDVI y construcciones NDBI, empleando las ecuaciones 6 y 7.

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} \quad (6)$$

$$\text{Corr}_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

El empleo de estas expresiones implica resultados que varían entre 1 a -1, donde 1 representa una correlación directa positiva entre las variables, el 0 ninguna correlación, y, -1 una correlación inversa total.

## III. RESULTADOS

### A. Distribución de la temperatura superficial

En la Figura 2, se representan promedios anuales de temperatura superficial obtenidos del procesamiento de imágenes Landsat 7, los valores máximos y promedios mantienen un comportamiento similar, presentándose gran variabilidad climática entre los períodos: 2007 a 2011 y 2015 a 2016, donde se evidencian marcadas diferencias de temperatura que oscilan desde 4.56 °C a 11.37 °C, con el valor más alto en el año 2009 y el mínimo en el 2008. Entre tanto, los valores de temperatura mínima marcan su punto más alto en 2011 y el más bajo en 2010, situación que pudo presentarse debido a cambios atmosféricos a escala regional o global, por la presencia de modificaciones en los movimientos de masas de aire, producto de la ocurrencia de los fenómenos del niño o la niña.

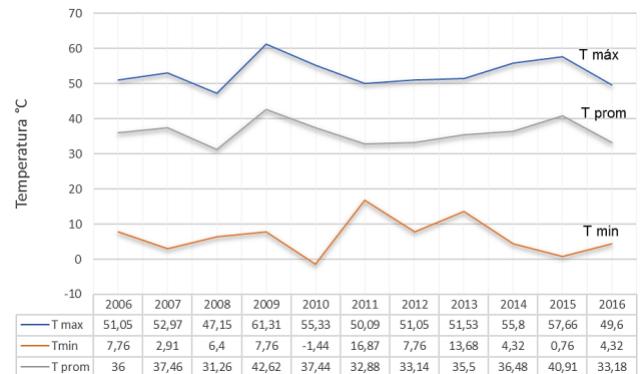
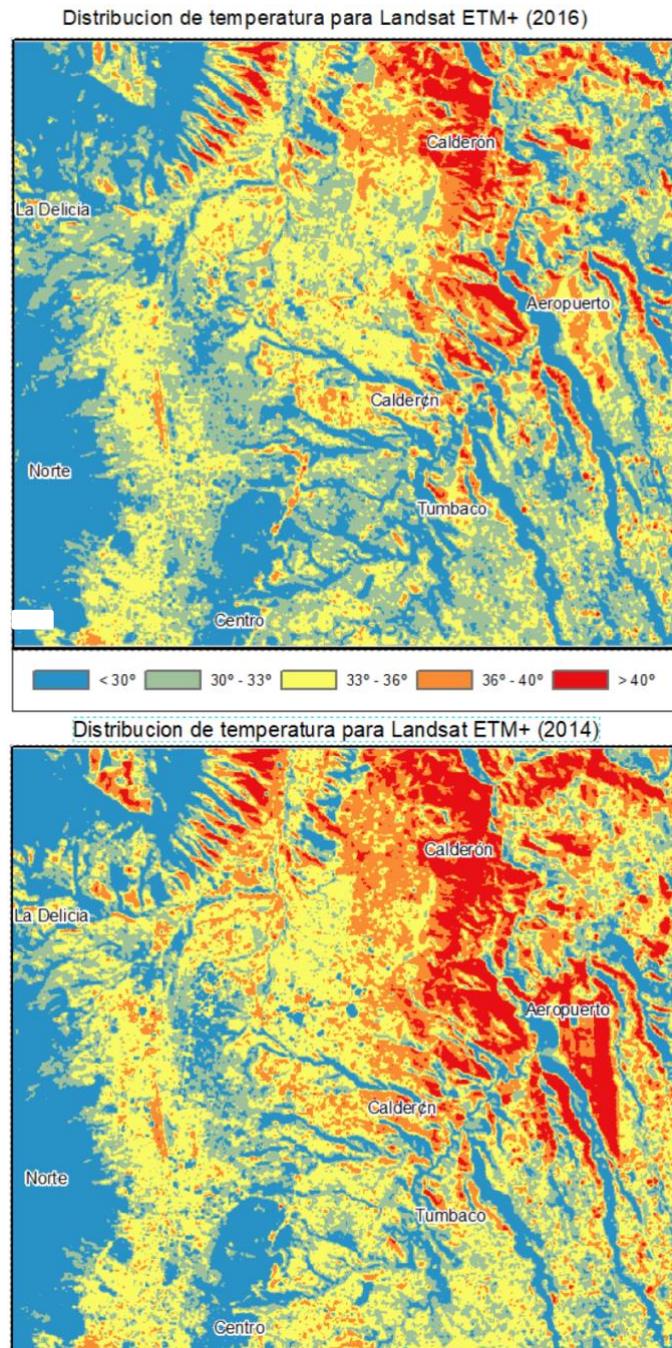


Figura 1. Variación de Temperatura Superficial del DMQ

En el análisis de los cambios producidos en la temperatura del área de estudio, se comparan los datos promedios obtenidos para los años 2006 y 2014, donde se presenta una tendencia similar, entre tanto, para una evaluación anual se consideraron los años 2012 a 2014, periodo en el cual se observa una tendencia de incremento gradual.

En la Figura 3, se observa la distribución de temperaturas Landsat ETM+ para los años 2006 y 2014. De acuerdo a esto, se identifican siete zonas con temperaturas superficiales superiores a 39 °C, localizadas en la parte central y norte de la mancha urbana de la ciudad de Quito, correspondientes a las parroquias: Carcelén, Iñaquito, La Concepción, Calderón, San Antonio de Pichincha, Tababela y Guayllabamba.



**Figura 2. Distribución Temperaturas Superficiales del DMQ**

Imágenes de 2006 (Izquierda) y 2014 (Derecha), nótese que para el año 2014 se presenta una mayor intensidad con respecto al año 2006.

De estas localidades, no se identifica efecto ICU en el área perteneciente a San Antonio de Pichincha, puesto que en esta zona no se localizan estructuras urbanas ni comerciales, la concentración de calor obedece a características climáticas secas predominantes y presencia de minas de materiales pétreos, que se extienden a lo largo de este territorio, situación que también influye hacia la parroquia Guayllabamba, la cual, pese a pertenecer a un entorno rural presenta alta concentración de calor. Entre tanto, las islas de calor identificadas en los sectores: Carcelén, Iñaquito, La Concepción y Calderón, se relacionan con zonas donde existe predominancia de uso de suelo múltiple coexistiendo residencias, comercios e industrias

de bajo impacto, mientras que, la isla de calor que se presenta en Tababela, responde a un cambio de uso de suelo debido al equipamiento del actual aeropuerto Mariscal Sucre en el año 2013.

Los valores de temperatura superficial (Tabla 4), indican que en los años 2006 y 2014, en las parroquias Tababela, Calderón y Guayllabamba, se presentó un aumento de temperatura; en cambio, en La Concepción e Iñaquito se produjo una reducción, y, en Carcelén no se observaron cambios.

**Tabla 4. Valores de las temperaturas superficiales donde se presentan ICU**

Se detallan los valores de la temperatura superficial promedio de los sectores donde se identificaron ICU.

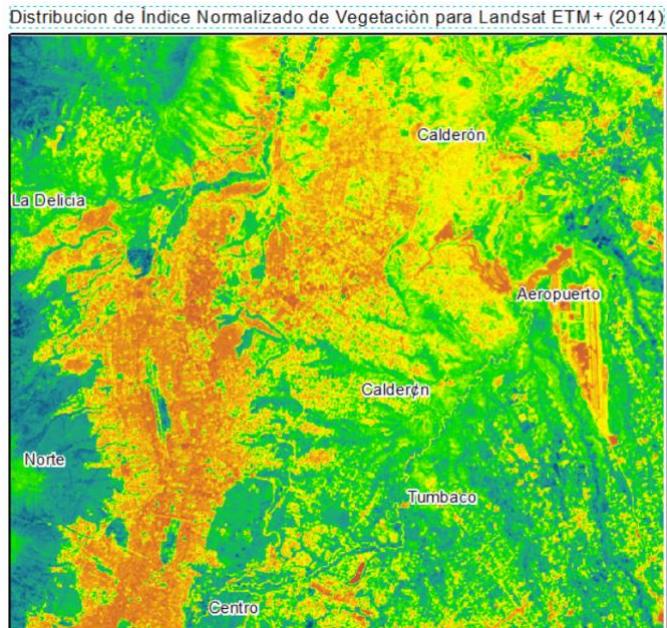
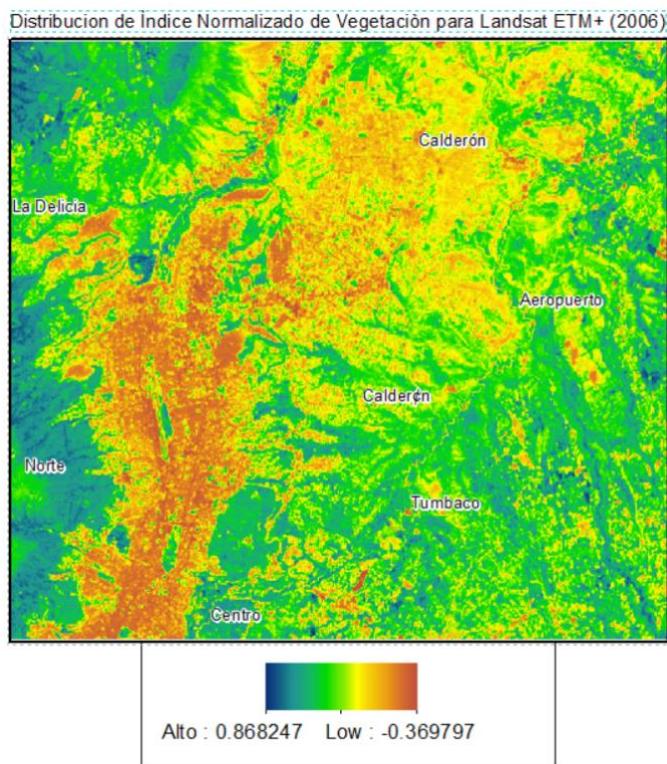
Sector	<i>T promedio °C</i>				
	2006	2012	2013	2014	2006 2014
Tababela	36,59	38,85	38,55	40,49	3,90
Calderón	39,60	37,61	39,29	40,31	0,71
La Concepción	38,13	38,02	37,79	37,69	- 0,44
Iñaquito	33,50	33,24	32,62	33,12	- 0,38
Guayllabamba	38,97	40,45	38,81	40,99	2,02
Carcelén	37,53	36,93	36,93	37,50	- 0,03

Al comparar los valores de distribución de temperatura con el uso de suelo, se determinó que el aumento de temperatura en la parroquia Tababela, está asociado con la construcción del nuevo aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, que entró en operaciones en febrero de 2013. El mismo año se presentó una disminución de temperatura en La Concepción, debido al cese de actividades operativas en la zona e implantación del Parque Bicentenario. Sin embargo, de este cambio en los usos del suelo del sector, su temperatura superficial, con respecto a Iñaquito, mantiene una diferencia de 4,57 ° C, debido a la conservación de grandes superficies impermeables cubiertas por asfalto. Entre tanto, el aumento de temperatura en Calderón está relacionada con la expansión urbana no planificada y el consecuente crecimiento poblacional. Por otro lado, la disminución de la temperatura en Iñaquito es acorde con el mejoramiento del estado vegetativo del Parque Metropolitano que se extiende en gran parte de su territorio.

#### B. Estimación de los índices NDVI y NDBI

En la Tabla 5 se resumen los valores medios de los índices NDVI (Fig. 4) y NDBI (Fig. 5), estos resultados sugieren cambios en los años 2006 y 2014 en cuanto al estado de la vegetación y construcciones. Se detectó un incremento en el índice de construcciones en las parroquias analizadas, a excepción de La Concepción donde este indicador presenta un decrecimiento, lo que está asociado con el cese de operaciones del antiguo aeropuerto.

Al analizar el índice de vegetación, se observa un mejoramiento en el estado de la vegetación en La Concepción, Iñaquito y Guayllabamba, debido a la existencia de parques y bosques en estas parroquias; mientras que, en Tababela, Calderón y



**Figura 3. Distribución del índice NDVI en el DMQ**  
Imágenes de 2006 (parte izquierda) y 2014 (parte derecha), nótense que en las áreas correspondientes a bosques y parques marcados con color rojo y amarillo presentan los valores de NDVI más altos

Carcelén, donde no existen áreas verdes, se presenta una condición desfavorable para este indicador. Estos escenarios están asociados al crecimiento demográfico y al alto desarrollo urbano no planificado de Calderón, la expansión urbanística en Carcelén y el cambio de uso de suelo en Tababela.

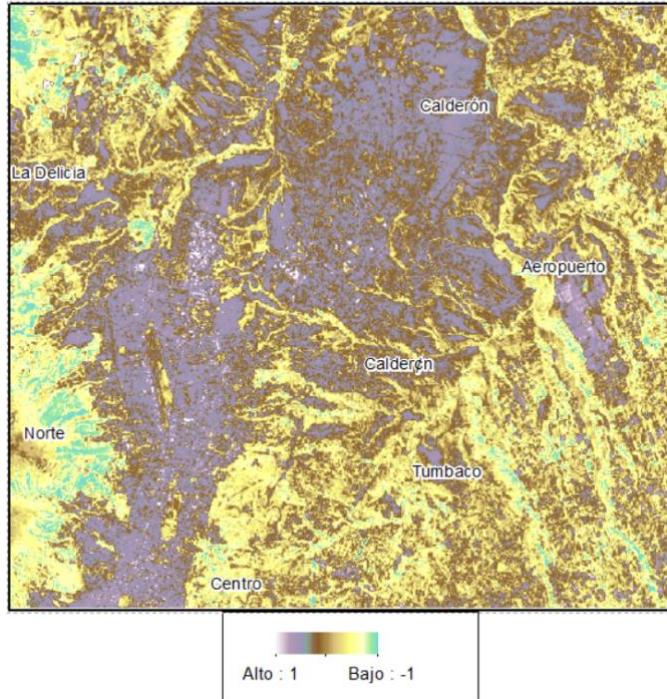
**Tabla 5. Índices NDVI y NDBI de los sectores donde hay presencia de ICU**

Sector	2006		2013		2014	
	NDVI	NDBI	NDVI	NDBI	NDVI	NDBI
Tababela	0,4846	-	0,3407	-	0,3671	-
Calderón	0,3290	-	0,2922	-	0,3050	-
La Concepción	0,2151	-	0,2177	-	0,2307	-
Iñaquito	0,3975	-	0,3969	-	0,3993	-
Guayllabamba	0,3949	-	0,4140	-	0,4057	-
Carcelén	0,3495	-	0,3251	-	0,3234	-
	0,0970		0,0824		0,0795	

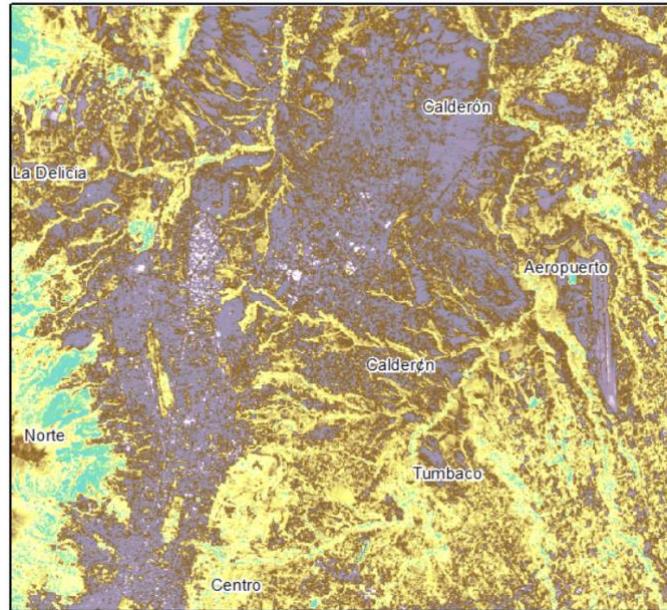
#### C. Correlación entre temperatura superficial e intensidad de vegetación y construcciones

Los valores obtenidos tras aplicar el coeficiente de correlación Lineal de Pearson entre las variables de temperatura superficial e índices de vegetación NDVI y construcciones NDBI (Tablas 6). Las correlaciones presentan niveles de significancia mayor del 95 %. La correlación entre temperatura e índice NDVI, representa una relación inversa moderada con valores cercanos a -0,5, lo que significa que a medida que se fraccionan áreas verdes la temperatura aumenta, correlación que en Calderón y La Concepción presenta valores cercanos a 0, que indican escasa presencia de vegetación o detrimento de la misma. En cambio, la correlación entre temperatura de superficie e índice de construcciones NDBI, muestra un comportamiento directo positivo, en el cual el aumento de temperatura está condicionado por la presencia de construcciones, excepto para La Concepción cuya correlación se aproxima al 0, sugiriendo que el aumento en la temperatura superficial en esta área está asociada al porcentaje de suelo impermeable existente.

Distribución de Índice Normalizado de Construcciones para Landsat ETM+ (2006)



Distribución de Índice Normalizado de Construcciones para Landsat ETM+ (2014)



**Figura 5. Distribución del índice NDBI en el DMQ**  
Imágenes de 2006 (Izquierdo) y 2014 (Derecha), nótese que en las áreas correspondientes a bosques y parques marcadas con color verde presentan los valores de NDBI más bajos

**Tabla 6. Correlación temperatura superficial e índices NDVI y NDBI**

Sector	2006		2013		2014	
	Temp/ NDVI	Temp/ NDBI	Temp/ NDVI	Temp/ NDBI	Temp/ NDVI	Temp/ NDBI
Tababela	-0,6270	0,7926	-0,6239	0,7760	0,5809	0,7777
Calderón	-0,2518	0,5111	-0,1824	0,5038	-0,0752	0,3541
La Concepción	-0,2981	0,1602	-0,1935	0,0813	-0,1075	-0,0162
Iñaquito	-0,6646	0,6855	-0,7439	0,7438	-0,6816	0,6746
Guayllabamba	-0,5264	0,6623	-0,5357	0,7246	-0,5272	0,7085
Carcelén	-0,5956	0,6671	-0,6039	0,6442	-0,4898	0,5558

#### IV. DISCUSIÓN

El área de estudio seleccionada posee diferentes características en cuanto al comportamiento espectral como: zonas urbanas, rurales, agrícolas, bosques, suelo desnudo o parques; lo que implica que la adopción de un coeficiente de corrección de emisividad uniforme de 0,95 para el cálculo de la temperatura superficial, no incorpora características particulares de cada zona.

En cuanto, al uso de índices de diferencia normalizada para evaluar la relación entre temperatura superficial, vegetación y construcciones, se obtuvo una mejor correlación entre temperatura e índice de construcciones, no obstante, para las zonas donde se presentan grandes extensiones de territorio cubiertas por superficies impermeables o construcciones de tipo horizontal, esto es, en las parroquias La Concepción y Calderón, no se presenta correlación entre las variables analizadas, por tanto, se infiere que, la evaluación de Islas de Calor Urbano se relacionaría mejor a través de una clasificación supervisada donde se distingan los componentes de la superficie.

Los resultados obtenidos indican que en las parroquias donde se presenta el fenómeno de ICU requieren del diseño de estrategias de mitigación que incorporen elementos de orden ambiental enfocados a la creación de una red verde urbana, que considere el mejoramiento de las condiciones existentes y un mejor planeamiento y control para el diseño urbano futuro tanto a nivel urbano como rural del distrito.

#### V. CONCLUSIONES

El análisis de Isla de Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito, con el fin de conocer la influencia de uso de suelo,

vegetación y construcciones en la generación de este fenómeno, genera las siguientes conclusiones: (1) A través de la determinación de la distribución espacial y temporal de la temperatura superficial se identificó que este fenómeno está presente en seis parroquias del Distrito Metropolitano de Quito, tres urbanas: Carcelén, La Concepción e Iñaquito y tres rurales: Tababela, Calderón, y Guayllabamba; (2) la presencia de islas de calor en zonas urbanas del DMQ están asociadas a procesos de zonificación de viviendas de tipo vertical; (3) en las zonas rurales la ICU se relaciona con la presencia urbanizaciones de tipo horizontal, estructuras de equipamiento de uso múltiple y falta de espacios verdes, presentándose temperaturas más elevadas que en las zonas urbanas; (4) en el año 2013 cuando se produjo un notable cambió en el uso de suelo por la reubicación del aeropuerto Mariscal Sucre, en la parroquia La Concepción se produjo una disminución de la temperatura superficial en -0,44 °C, mientras que en Tababela se registró un incremento de 3,9 °C; lo que es consecuente con los valores de los índices de vegetación y construcciones, que en el primer caso tras el cese de operaciones del antiguo aeropuerto se produjo un mejoramiento en las condiciones vegetativas de las áreas verdes existentes, mientras que para Tababela se produjo un decremento acompañado de un elevado aumento en el índice de construcciones (5) el Indicador de Vegetación Normalizada NDVI presenta una correlación inversa con la temperatura superficial, lo que significa que, a medida que se fraccionan áreas verdes la temperatura aumenta, lo que también es coincidente con la falta de espacios verdes en las parroquias de Calderón, Carcelén y Tababela (6) el Indicador Normalizado de Construcciones NDBI muestra un comportamiento directo positivo con la temperatura superficial, condicionando su incremento a la presencia de construcciones; (7) la caracterización de las Islas de Calor Urbanas se explica mejor a través del análisis de la relación entre la temperatura superficial y el uso de suelo. (8) la falta de planificación y control en el desarrollo urbano especialmente donde predominan viviendas de poca altura muy adosadas modifican las condiciones en cuanto a su temperatura superficial requiriéndose estrategias de mitigación, tales como la planificación a partir de biogeografía, geo-estadística o análisis de espacios con espectrometría. (9) Se debe profundizar el estudio de los factores que influencian o alteran el clima urbano. Al respecto este estudio brinda un primer acercamiento a esta problemática la cual debe ser complementada con otras investigaciones que nos brinden mayores luces sobre el fenómeno y sus posibles soluciones.

## REFERENCIAS

- [1] Ahmed, S. (2017). Assessment of urban heat islands and impact of climate change on socioeconomic over Suez Governorate using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*
- [2] Artis, D., & Carnahan, W. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12, 313-329.
- [3] Dai, Z., Guldmann, J. M., & Hu, Y. (2018). Spatial regression models of park and land-use impacts on the urban heat island in central Beijing. *Science of the Total Environment*, 626, 1136-1147.
- [4] EPA United States Environmental Protection Agency. (18 de 11 de 2016). Obtenido de <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts>
- [5] Gallo, K., McNAB, A., Karl, T., Brown, J., Hood, J., & Tarpley, J. (1993). The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 14(11), 2223-2230.
- [6] Ibáñez, M., & Hernández, F. (2009). Islas de calor urbano ICU. Obtenido de <http://giper.univalle.edu.co/productos/ISLAS%20DE%20CALOR%20URBANO%20ICU.pdf>
- [7] Landsat Project Science Office. (2007). Landsat 7 Science Data User's Handbook. Recuperado el 4 de 11 de 2016, de Goddard Space Flight Center, NASA, Washington, DC: [http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7\\_Handbook.pdf](http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf)
- [8] Landsat Project Science Office. (29 de Marzo de 2016). Department of the Interior U.S. Geological Survey. Obtenido de Landsat 7 Science Data User's Handbook: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- [9] Ling Chen, X., Mei Zhao, H., Xiang Li, P., & Young Yin, Z. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104, 133-146.
- [10] Marini, F. (10 de julio de 2010). Análisis del estado de la vegetación en el área de influencia de la EEA Bordenave mediante imágenes satelitales. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, (Argentina) :[http://www.inta.gov.ar/bordenave/contactos/autores/fabian/indice\\_verde\\_area\\_INTA\\_bordenave.pdf](http://www.inta.gov.ar/bordenave/contactos/autores/fabian/indice_verde_area_INTA_bordenave.pdf)
- [11] Markham, B., & Barker, J. (1985). Spectral characteristics of LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 697-716.
- [12] Moreno, M. d. (15 de Octubre de 2016). Bibliografía sobre Climatología urbana: la "isla de calor", I. Obtenido de <http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/download/46055/56860>
- [13] Oke, T. R. (1987). Boundary Layer Climates (2nd ed.). Obtenido de <http://bayanbox.ir/view/6693893538424427706/T.-R.-Oke-Boundary-Layer-Climates-Second-Edition-BookFi.org.pdf>
- [14] ONU Habitat. (12 de 11 de 2012). Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe. Rumbo a una nueva transición urbana. Brasil: Programa para las Naciones Unidas para Asentamientos Humanos. Obtenido de [http://www.un.org/es/events/habitatday/pdfs/ONU-HABITAT\\_brochure.pdf](http://www.un.org/es/events/habitatday/pdfs/ONU-HABITAT_brochure.pdf)
- [15] Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). Teledetección Nociones y Aplicaciones. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- [16] Plan Metropolitano de Ordenamiento Territorial 2012-2022. (30 de Noviembre de 2011).
- [17] Preciado, M., & Aldana, A. (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. *Ventana informática* (24), 95-114.
- [18] Rodríguez, N. (4 de 12 de 2016). Gabrielortiz.com. Obtenido de [http://www.gabrielortiz.com/%5C/descargas/Articulo\\_SLC\\_Off\\_Project\\_7\\_07.pdf](http://www.gabrielortiz.com/%5C/descargas/Articulo_SLC_Off_Project_7_07.pdf)
- [19] Rodríguez, J., & Olivella, R. (2011). Introducción a SIG y Geotemática. En P. e. al. *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotemática*. Barcelona: Carrera edició, S.L.
- [20] Roth, M., Oke, T., & Emery, W. (1989). Satellite-derived urban heat island from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Remote Sensing*, 10(11), 1699-1720.
- [21] Schwarz, N., Lautenbach, S., & Seppelt, R. (2011). Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3175-3186.
- [22] Serrano, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida, 16(2), 23-47.
- [23] Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Ecuador. (19 de Noviembre de 2016). INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/la-institucion/>
- [24] Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 72, 738-746.

- [25] Silva, J. S., da Silva, R. M., & Santos, C. A. G. (2018). Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. *Building and Environment*, 136, 279-292.
- [26] The Landscape Toolbox. (30 de 11 de 2016). Obtenido de [http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote\\_sensing\\_methods:normalized\\_difference\\_vegetation\\_index](http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:normalized_difference_vegetation_index)
- [27] Voogt, J., & Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.
- [28] Yuan, F., & Bauer, M. (2006). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 12.
- Zhao, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Application of Background Information Database in Trend Change of Agricultural Land Área of Guangxi. *International journal of remote sensing*, 583-594.



**Diana Paola Baño Saltos First A.** Autor El autor nacio en la ciudad de Guaranda, Ecuador en el 1985. Es ingeniera civil por la Universidad Central del Ecuador y cuenta con una maestría en Gestión Ambiental por la universidad Internacional SEK. En el ámbito profesional, el autor trabaja en la Contraloría General del Estado como auditora técnica de obras. Por su trabajo cuenta con experiencia en el control de proyectos de ingeniería en agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y saneamiento ambiental. Adicionalmente, está interesada sobre los efectos de la expansión urbana en la salud humana, en específico en el campo de la contaminación térmica y la gestión de aguas residuales y residuos



**José Gabriel Salazar I.** Autor nacio en Quito, Ecuador en 1982, Graduado de Ingeniería Geográfica por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y con una Maestría en Estudios Sociambientales por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. En el ámbito profesional, el autor ha participado en proyectos relacionados con el manejo de los recursos naturales y estudios sociales en instituciones como Ministerio del Ambiente, Instituto Geográfico Militar, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, entre otras. De igual manera, cuenta con experiencia en la producción de productos cartográficos para instituciones públicas y privadas.

En la actualidad, es docente investigador de la Universidad Internacional SEK de Ecuador en el Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Entre sus campos de interés están los sistemas de información geográfica, las tecnologías de la información, el manejo de recursos naturales y el cambio climático.



**Mónica Susana Delgado.** El autor nació en Quito, Ecuador en 1975, Graduada de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional, con un Master en Sistemas de Información Geográfica por parte de la Universidad de Salzburgo, una Maestría de Gestión Ambiental en la Universidad Internacional SEK, y Una Maestría en Administración Ambiental en proceso de reconocimiento.

Desde el año 1997 fue asistente de investigación para el proyecto AARAM, dentro de la temática

Dimensiones Humanas y Gestión de Riesgos Naturales y Antropogénicos. A partir del año 1999 trabajó en el laboratorio de ingeniería ambiental de la facultad de ingeniería Civil y Ambiental de la EPN, ahora CICAM. De 2001 a 2015, trabajó como consultor independiente en Medio Ambiente y Gestión de Riesgos, e Hidrología. Especialista Geomático 3 en el Instituto Espacial Ecuatoriano antiguo CLIRSEN, y luego se desempeñó como director de investigación en INAMHI, Asesor de proyectos para funcionarios de la Secretaría de Gestión de Riesgos.

En cuando a la práctica docente, desde 2004 profesor parcial en la Universidad de las Américas, iniciando la primera promoción de ingeniería ambiental, hasta el año 2014. Fue profesor a tiempo completo en la EPN, y desde el año 2017 profesor en la Universidad Internacional Sek. Es co-autor de tres libros en la temática de Gestión de Riesgos Naturales, OT aplicada a la gestión del Riesgos Naturales, Análisis de Inundaciones y Cambio Climático. Co-autor para el ministerio del ambiente del Perú de la Obra Periodos Secos y Húmedos en las cuencas Perú – Ecuador como parte del SENAMHI – INAMHI.

Sus intereses de investigación incluyen procesos y aplicaciones en Gestión de Riesgos, tanto naturales como Antropogénicos. Se desempeña en la temática investigativa de efectos de la contaminación, toxicología, bio-informática aplicada, Sanidad ambiental, Geomática.

Contribuye con proyectos de Caracterización del Riesgo: identificación de amenazas por fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, sociales, sanitario ecológico y químico tecnológico; Identificación de vulnerabilidades en función de determinantes sociales, ambientales, enfermedades crónicas transmisibles y no transmisibles, así como la ubicación geográfica de infraestructura en zonas de amenaza alta y media. Definición de escenarios de riesgo que relacione las amenazas y vulnerabilidades identificadas.

# Módulo De Aurilización En Tiempo Real Para Dispositivos De Navegación Asistida Para Personas Con Discapacidad Visual

## *Real Time Auralization Module for Electronic Travel Aid Devices for People with Visual Disability*

Alex Armendáriz, José F. Lucio-Naranjo y Diego Navas

**Resumen**—En este trabajo se presenta un módulo de software de aurilización en tiempo real que será utilizado para recrear la sensación acústica producida por un obstáculo sonoro tanto en ambientes virtuales como reales. Dicho módulo cumple la función de insertar, en una señal de audio cualquiera, el efecto de posicionamiento tridimensional que permite al oyente determinar la ubicación de una fuente de sonido dentro del ambiente de pruebas escogido. Este efecto se logra usando una técnica de procesamiento de señales llamada convolución segmentada y varias funciones contenidas en una base de datos de respuestas impulsivas asociadas a cabeza humana (HRIRs). El módulo fue probado dentro de un ambiente de pruebas real y uno virtual. En el ambiente de pruebas real el usuario llevaba consigo una cámara estereoscópica que cumplía la función de un detector de obstáculos, así como un computador y auriculares, en los cuales se instaló el módulo y se emitían las alertas sonoras tridimensionales respectivamente. De esta forma, los efectos pudieron ser registrados, analizados, discutidos y finalmente validados.

**Palabras clave**—Aurilización, convolución segmentada, ETA, validación de realidad virtual.

**Abstract**—This paper presents a software module for real-time auralization that was used to recreate the acoustic perception produced by a sound obstacle in virtual and real environments. This module fulfills the function of inserting, in any audio signal, a three-dimensional positioning effect that allows the listener to determine the location of a sound source within the chosen test environment. This effect was achieved with a processing technique called segmented convolution and several functions contained in a database of head related impulse responses (HRIRs). The module was tested in a real environment and a virtual one. In the real test environment, the user had a stereoscopic camera that fulfilled the function of an obstacle detector, as well as a computer and headphones, in which the module was installed and three-dimensional sound alerts were generated. In this way, the effects could be recorded, analyzed, discussed and finally validated.

**Index Terms**—Aurilization, segmented convolution, ETA, validation of virtual reality.

#### Article history:

Received 13 April 2018

Accepted 28 May 2018

Alex Armendaris fue investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y de la Escuela Politécnica Nacional

José Lucio-Naranjo y Diego Navas son investigadores de la Escuela Politécnica Nacional

## I. INTRODUCCIÓN

La innovación tecnológica relacionada con Realidad Virtual (RV) ha permitido crear entornos virtuales cada vez más realistas. Su relevancia se refleja en el ámbito comercial, dado que en el año 2016 se registraron ventas aproximadas a mil millones de dólares en productos de realidad virtual [1]. Esto ha aumentado la necesidad de recrear los ambientes sonoros de estos entornos virtuales de maneras más precisas, para lo cual es imprescindible utilizar técnicas de aurilización.

El término aurilización (de auricular) fue introducido por Mendel Kleiner [2] y es análogo a “visualización” que quiere decir “hacer visible” un objeto proveniente de distintas fuentes reales o virtuales. En el caso de la aurilización, se trata de lograr que un efecto acústico ocasionado por un ambiente y las características del receptor sea procesado en un resultado audible [3].

La aurilización, al ser una técnica de RV, resulta sumamente útil en el análisis subjetivo acústico de espacios arquitectónicos tanto los existentes como en fase de proyecto. También tiene aplicaciones en dispositivos de apoyo a personas con capacidades especiales, video juegos, entre otros. De los anteriores, los dispositivos de Navegación Asistida Electrónicamente (ETA - del inglés Electronic Travel Aid) tienen como propósito detectar obstáculos y de alguna manera comunicar al usuario de la ubicación de los mismos. Una opción en ese sentido es generar sonidos sintetizados utilizando técnicas de aurilización, que recreen la impresión de la presencia de una fuente sonora en la posición del obstáculo. Dichas señales de audio son reproducidas al usuario mediante auriculares estéreo [4].

Existen estudios previos sobre la influencia que tienen las HRTFs en sistemas de alertas sonoras en la ubicación de obstáculos por parte de personas no videntes, las cuales fueron previamente entrenadas en el uso del dispositivo [5]. A diferencia de esos estudios, el presente proyecto pretende medir cuantitativamente y cualitativamente la precisión de un sistema de alertas de sonido tridimensional con sujetos que no hayan tenido entrenamiento previo. Para dicho propósito se desarrolló un software que recrea un ambiente virtual de pruebas donde existen diversas fuentes sonoras. Por otro lado, este trabajo también contempló la realización de pruebas en un

ambiente real, para lo cual se adaptó el módulo de aurilización para que funcione como un servidor de audio que se alimenta de un sistema de detección de un obstáculos y recrea la impresión de la presencia de una fuente sonora en la posición del obstáculo.

El trabajo está ordenado de la siguiente manera: en la sección II se aborda todas las técnicas computacionales utilizadas tanto para el procesamiento de señales digitales, la generación del ambiente virtual y la interacción entre ambos. Así mismo, se revisan brevemente las técnicas para la detección de obstáculos y la implementación del servidor de audio que fue utilizado para las pruebas en ambientes reales. En la sección III se presentan los resultados obtenidos y finalmente en la sección IV se discuten los principales hallazgos de la investigación.

## II. METODOLOGÍA

Para las pruebas virtuales, el proyecto requirió la implementación de un programa que consta de dos módulos. El primero está relacionado con un motor de aurilización en tiempo real que genera el audio escuchado por el usuario y el segundo permite la simulación de un ambiente tridimensional para la interacción del usuario con fuentes sonoras virtuales mediante los periféricos de un computador. Las pruebas virtuales permitieron depurar el módulo de aurilización para verificar su funcionamiento antes de que fuera integrado al sistema detector de obstáculos.

El módulo de aurilización integrado al sistema detector de obstáculos fue validado con las pruebas en ambientes reales. Dicho sistema utiliza una cámara estereoscópica y procesa la información obtenida por la cámara en un computador embebido para obtener el objeto más cercano. La integración requirió que se adapte el módulo de aurilización para ser usado como servidor de audio, el mismo que se alimenta de las coordenadas obtenidas por el sistema detector de obstáculos. Este servidor funciona de manera independiente y se comunica mediante un socket con el sistema detector de obstáculos y así se recrea por medio de auriculares la impresión de la presencia de una fuente sonora en la posición del obstáculo utilizando técnicas de procesamiento de señales digitales.

Tanto los módulos como el servidor de audio fueron programados usando C++ para reducir problemas de latencia que aparecen con lenguajes de alto nivel en su mayoría introducidos por el manejo automático de memoria de los *garbage collectors* [6], entre otros. Se utilizó Juce como *framework* para facilitar la programación de las clases relacionadas con el audio, procesamiento de señales, gráficos tridimensionales y procesamiento en paralelo.

### A. Motor de Aurilización

La aurilización se basa en el principio de los sistemas acústicos lineales invariantes en el tiempo. Esto quiere decir, que la respuesta impulsiva caracteriza completamente el sistema de transmisión acústico lineal, desde una dada ubicación de la fuente sonora hasta la posición del receptor [7]. Un sistema lineal acústico invariable en el tiempo para realidad virtual está determinado por su respuesta impulsiva biauricular y sus

efectos pueden ser recreados en una señal de audio arbitraria utilizando un producto de convolución [8]. Para esto, se realiza un producto de convolución entre una señal audio cualquiera con una respuesta impulsiva específica, obteniendo de esta forma el efecto de posicionamiento de la fuente sonora en el espacio. Estos principios serán aplicados tanto para las pruebas en ambientes reales como virtuales.

Basándonos este principio, se debe utilizar una base de datos con pares de HRIRs (del inglés, Head Related Impulse Responses), cada uno de estos pares caracteriza la forma como un sonido llega de un punto del espacio a los oídos de una persona [9]. En ese sentido, cada par de HRIRs tendrá respuestas impulsivas correspondientes a dos sistemas lineales invariantes en el tiempo, que a su vez corresponden a dos receptores (oído izquierdo y derecho) y una fuente sonora ubicada en una posición específica. En este caso, se utilizó la base de HRIRs del MIT, levantada experimentalmente con la cabeza artificial KEMAR dentro de una sala anecoica [9].

Lo primero que se debe tomar en cuenta es que el procesamiento de la señal debe funcionar en tiempo real (con una latencia mínima). Por tal motivo, para este caso se manejó bloques de audio de 512 muestras y una tasa de muestreo de 44100 (el tamaño del bloque puede tener otro tamaño dependiendo de las capacidades de la tarjeta de sonido). Para obtener la latencia se debe dividir el tamaño del bloque entre la tasa de muestreo obteniendo así una latencia aproximada de 11,61 milisegundos [6].

Las frecuencias bajas no son direccionales, es decir no sufren de modificaciones espectrales significativa si se las capta de otra dirección [10]. Por tal motivo, no es necesario añadir el efecto de posicionamiento en ellas [11]. Por lo que es necesario dividir la señal que se va a procesar en dos partes: una que contenga sus componentes de baja frecuencia de 0 Hz a 200 Hz y otra los componentes de alta frecuencia de 200 Hz a 22.05 KHz. Para lograr la separación debemos utilizar dos filtros digitales IIR, un pasa bajos y un pasa altos. A continuación, se procesa únicamente las frecuencias altas y a este resultado se le suma la señal de baja frecuencia.

Al utilizar un producto de convolución, expresado en su forma convencional en la Ec. 1, se debe procesar la señal integralmente. Esto requiere un gran número de operaciones lo que introduce retardos en el procesamiento [12].

$$x[k] * h[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]h[k-n] \quad (1)$$

Estos retardos atentan contra la generación de audio en tiempo real, por lo que es necesario usar un algoritmo de convolución segmentada lo que permite procesar la señal por bloques [12]. El procesamiento por bloques basa su funcionamiento en la Ec. 2.

$$x_L[k] = \sum_{p=0}^{L/P} x_p[k - p \cdot P] \quad (2)$$

Este algoritmo, conocido como “sumas de superposiciones” [12], separa la señal  $X_L[k]$  (de tamaño  $L$ ) en segmentos

de  $X_p[k]$  (de tamaño  $P$ ) que están definidos como:

$$x_p[k] = \begin{cases} x_L[k - p \cdot P] & \text{para } k = 0, 1, \dots, P - 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

La longitud  $P$  del bloque depende del tamaño del *buffer* de salida de audio. No obstante, el tamaño de cada elemento procesado será de  $P + N - 1$  (donde  $N$  es el tamaño de la respuesta impulsiva  $h_N[k]$ ). Este problema se supera sumando las muestras que sobrepasan la longitud  $P$  al siguiente bloque, tal como ilustra la Fig. 1.

Por lo anterior, el resultado de una convolución  $X_L[k] * h_N[k]$  se puede expresar como la suma de superposiciones de una serie de convoluciones  $X_p[k] * h_N[k]$ , cada una desplazada en múltiplos de  $P$  [12].

Utilizando el teorema de la convolución [13], descrito en la Eq. 4, es posible realizar una optimización final al algoritmo.

$$x[k] * h[k] = X[w]H[w] \quad (4)$$

De esta forma, en lugar de realizar múltiples productos y sumas en el dominio del tiempo con la Ec. 1, la señal monofónica de entrada es transformada al dominio de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT). Luego la señal es multiplicada por el par de HRTFs obteniendo una señal estéreo, y el producto resultante es transformado nuevamente al dominio de tiempo utilizando la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT).

Dado que se está lidiando con principios aplicables a sistemas lineales invariantes en el tiempo, el efecto de realidad virtual se alcanza actualizando las respuestas impulsivas (HRIRs) dependiendo de la orientación y la posición de la cabeza en un dado instante de tiempo. No obstante, este cambio puede ser brusco debido al movimiento arbitrario de la cabeza en el ambiente de pruebas, lo cual puede generar clics u otros efectos indeseados [14]. Por tal motivo, es necesario contar con dos módulos de convolución, uno de destino y uno actual. El módulo de destino contendrá el par de HRIRs que se va a utilizar a continuación y el actual contendrá el par de HRIRs que utiliza actualmente el usuario. La solución se obtiene aplicando un efecto *crossfade* entre los módulos utilizando interpolaciones lineales muestra a muestra [11].

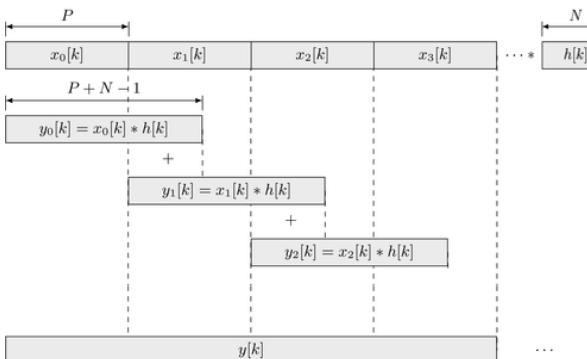


Figura 1. Convolución Segmentada [12]

### B. Ambiente 3D y Sistema de Interacción Físico

En el ambiente virtual tridimensional se puede encontrar obstáculos que se pueden visualizar como mallas compuestas de triángulos (ver Fig. 2).

El receptor es representado por una esfera que tiene una unidad espacial virtual de radio. Por otro lado, los emisores fueron representados como puntos en el espacio. El sistema, mediante el mouse y teclado, permite navegar dentro del ambiente moviendo una cámara virtual con perspectiva en primera persona. Para la creación de todos los gráficos computacionales se utilizó OpenGL.

La determinación de la dirección relativa de la fuente sonora con respecto al receptor biauricular determina un rayo que parte desde el centro del receptor hacia el centro del emisor. En seguida se analiza si existe colisión entre el rayo y algún triángulo componente de algún obstáculo de la escena utilizando el algoritmo de Möller–Trumbore [15].

Si existe colisión del rayo con algún triángulo, y su distancia de colisión es menor que la distancia del emisor al receptor, se verifica que existe oclusión por lo que no se podría escuchar la fuente. En ese caso, se desactiva el generador de audio 3D, caso contrario se activa el generador de audio 3D, tal como lo indica la Fig. 3.

Al no existir oclusión, se transforma la dirección de llegada del rayo al sistema de coordenadas del receptor que es dependiente del movimiento de traslación y rotación provocado por el usuario usando el mouse y teclado. Para esto se utiliza matrices de rotación (Ecs. 5 y 6) alrededor de los ejes  $x$  y  $y$  [16].

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Posteriormente, se transforma las coordenadas de arriba del rayo del sistema cartesiano a polar para que estas sean compatibles con la base de datos de HRIRs de Kemar [9]. Con estas coordenadas de arriba, se realiza la búsqueda del

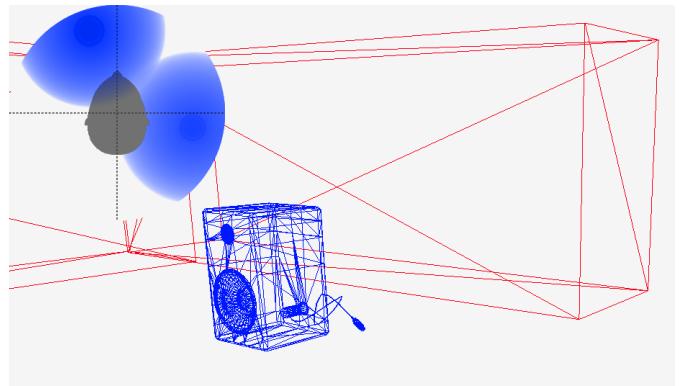


Figura 2. Interface Gráfica

par de HRIRs en la base de datos obteniendo el par de HRIRs más próximo a la dirección de incidencia del rayo sobre el receptor.

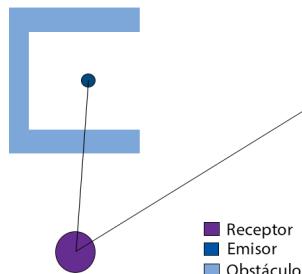
Para terminar el procesamiento se calcula un factor de ganancia, la cual se usará para recrear el efecto de reducción de intensidad del sonido debido a la distancia. Esta ganancia es inversamente proporcional al área de una esfera, que tiene por radio el módulo del vector existente entre la fuente y el receptor. Este factor de ganancia es compensado por otro factor (obtenido de manera experimental) para mejorar el realismo entre la distancia que se observa en el simulador y la que se escucha. Este procedimiento se efectúa cada vez que un nuevo cuadro de vídeo es generado en la escena, como se ilustra en el Alg. 1.

```

while no finalice el programa do
    Determinar un rayo desde el emisor hasta el centro
    del receptor;
    if no existen colisiones or módulo del rayo < que la
    distancia emisor-triángulo intersecado then
        Trasladar rayo al sistema de referencia del
        receptor;
        Transformar a coordenadas polares;
        Buscar HRIR en la base de datos;
        Calcular ganancia dependiendo de la distancia del
        emisor al receptor;
    else if Existe oclusión then
        Bloquear sonido de la fuente;
    end

```

**Algorithm 1:** Algoritmo de interacción física fuente-receptor



**Figura 3.** Sistema de Interacción Físico

### C. Procesamiento paralelo ambiente virtual

Para el funcionamiento en tiempo real (con una latencia mínima), la aplicación que recrea el ambiente de manera virtual requiere que el audio y gráficos se ejecuten en diferentes hilos de ejecución de forma paralela. En el caso del audio, se ejecuta un hilo de alta prioridad, mientras que para los gráficos se utiliza un hilo de prioridad normal. En la Fig. 4 se muestra la arquitectura de los hilos sincronizados mediante mecanismos libres de bloqueos.

Un bloqueo es cualquier procedimiento que requiera esperar por un recurso (esperas causadas por el procesamiento de otros hilos o lectura de datos del disco duro, presencia de mutex o socket, entre otras). Cuando el audio es procesado por bloques (tiempo real), esperar por un recurso causa la pérdida de muestras del buffer de audio, lo cual se traduce en breves interrupciones causando ruido en la señal de sonido lo cual no es adecuado para una ejecución en tiempo real [6].

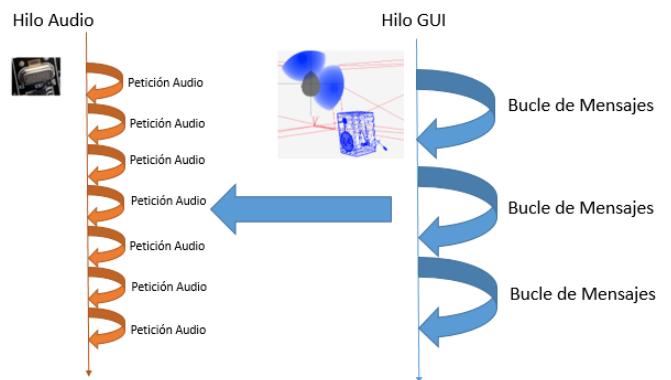
Para realizar una sincronización libre de bloqueos es conveniente el uso de variables atómicas para garantizar el acceso seguro a las mismas, evitando de esta forma que existan “data races”. Para este caso se utilizaron como variables atómicas (de la librería standard de C++ [17]) al azimuth  $\phi$  y la elevación  $\theta$ , las cuales se obtienen del sistema de interacción 3D.

### D. Arquitectura servidor de audio

La arquitectura escogida para el programa para las pruebas en el ambiente real fue una arquitectura cliente servidor, debido a que nos permite que el módulo de aurilización sea independiente del sistema detector de obstáculos tanto en el desarrollo del mismo como en su funcionamiento.

Un cliente es un sistema o programa que realiza peticiones de una o varias actividades a otro programa o sistemas, llamados servidores, que cumplen tareas específicas [18]. En este caso el cliente es el sistema detector de obstáculos que envía las coordenadas y distancia del obstáculo al servidor de audio para que el mismo procese una señal de audio y recreen la impresión de la presencia de una fuente sonora en la posición del obstáculo que es audible mediante auriculares.

Para la comunicación se utilizan sockets TCP que se comunican mediante un servidor local con IP 127.0.0.1, lo que



**Figura 4.** Arquitectura de Hilos de una Típica Aplicación de Audio

permite tener una latencia aproximada menor a 1 milisegundo en la comunicación en un computador Jetson TK1. El cliente cada vez que procesa una nueva posición en coordenadas polares envía la misma al servidor de audio para que genere un resultado audible. Al igual que en la aplicación para pruebas en un ambiente virtual es necesario que el socket de comunicación se ejecute en un hilo separado. Lo que genera la necesidad de sincronización con el hilo de procesamiento de audio, para esto se utilizaron variables atómicas. Para esta comunicación fue necesario definir un protocolo de intercambio de 13 bytes, cada byte es de tipo carácter de C++. Los tres primeros bytes representan la posición en azimuth del obstáculo que puede variar en 90 y -90 grados, seguidos por un byte de separación que es representado por una coma. A continuación, los siguientes tres bytes representan la posición en elevación del obstáculo que puede variar en -90 y 90 grados, se agrega una coma de separación y finalmente los últimos 5 bytes representan la distancia al obstáculo. Si no existe un obstáculo la distancia toma un valor negativo y es ignorada por el servidor de audio. Debido a que se utiliza la base de HRIR de KEMAR [9] si el azimuth fuera menor a -40 grados, se utilizará la HRIR con posición más baja en altura de la base de datos (-40 grados en elevación).

#### E. Sistema de Detección de Obstáculos

La estereoscopia, también denominada visión estero, permite el análisis y procesamiento de espacios tridimensionales en base a técnicas y mecanismos de adquisición de información bidimensional (imágenes) con el uso de dos o más cámaras. De esta forma este método simula la capacidad visual de los seres vivos al analizar las diferencias entre dos imágenes adquiridas. En el presente trabajo se hace uso de uno de los métodos para realizar reconstrucción tridimensional, el mismo que se basa en el uso de una cámara estereoscópica comercial llamada ZED que presenta una disposición alineada de sus dos cámaras [19].

El proceso de reconstrucción tridimensional a partir de visión binocular (estereoscopia con dos cámaras) comienza con la adquisición de las imágenes al mismo tiempo [19]). Una vez obtenidas las imágenes, se procede al análisis de correspondencias que se define como el proceso de encontrar las coordenadas de un píxel en dos diferentes imágenes que corresponden al mismo punto en el mundo real [20]. Los resultados de este proceso son distancias entre píxeles denominadas disparidades. A continuación, se realiza un proceso de triangulación de dichas disparidades para hallar una dimensión adicional. Con toda esta información se selecciona una de las imágenes obtenidas al inicio y cada píxel es empujado en una nueva dimensión para obtener una representación 3D del entorno. Todos estos procesos son realizados gracias a la calibración constante de las cámaras para determinar parámetros indispensables en las transformaciones realizadas.

Para la detección de obstáculos la información 3D obtenida de la cámara estereoscópica es procesada mediante una librería conocida como Point Cloud Library (PCL) [21]. Se realiza una reducción de información para mejorar el desempeño del sistema a través procesamientos y filtros [22] como: Region of Interest (ROI), Voxel y Statistic Outliner Removal

(SOR) [23]. Para la eliminación de puntos correspondientes al suelo se procesa el entorno reconstruido mediante el algoritmo RANSAC que permite la segmentación y eliminación de datos con características seleccionadas [24].

Una vez obtenido los obstáculos del entorno y los datos del suelo, se encuentra un conjunto de puntos más cercano, se eliminan datos atípicos (SOR) y se determina el centroide del mismo que es considerado la ubicación del obstáculo más cercano. Para el suavizado de la respuesta se utiliza un filtro de media móvil.

### III. RESULTADOS

#### A. Prueba en Ambiente Virtual

Para probar la eficiencia de procesamiento y precisión de los resultados que produce esta aplicación en ambientes virtuales se desarrollaron 2 tipos de pruebas:

1. Prueba de navegación ciega.
2. Prueba de valoración subjetiva.

Para la primera prueba participaron dos sujetos sin entrenamiento previo. Esta validación consistía en realizar una navegación dentro del ambiente virtual por medio de los periféricos, sin tener una realimentación visual. Inicialmente, el sujeto era colocado en un punto fijo del ambiente virtual a una elevación de 1 unidad <sup>1</sup> y la fuente de sonido era ubicada alrededor del sujeto en una posición aleatoria con un azimuth variable entre 0° y 360° a la altura del piso a 26 unidades de distancia del sujeto. El objetivo era llegar lo más cerca posible de la fuente sonora, apenas guiándose por el sonido que provenía de auriculares ecualizados. Una vez que el sujeto creía alcanzar su objetivo, este debía presionar una tecla para finalizar el procedimiento, el cual se repitió 50 veces.

Los resultados indican que se logró reducir la distancia inicial de separación en un 93,96 % en promedio. Esto a pesar de que las pruebas fueron realizadas con las HRIRs de la cabeza artificial KEMAR [9] y no las específicas de cada sujeto de prueba, lo cual puede generar distorsiones en la percepción [25]. Adicionalmente, la base de datos de HRIRs no cuentan con datos para elevaciones menores a -40°, lo cual genera mayores imprecisiones cuando el sujeto está cerca de la fuente.

Los resultados de las distancias finales que separan a la fuente sonora del sujeto se presentan en las Tabs. 1 y 2 para el sujeto 1 y 2 respectivamente. Se utilizan 6 intervalos para sintetizar la información. La segunda columna define el rango de distancia de los intervalos. Para cada intervalo se presenta la frecuencia de ocurrencia,  $f_i$  (tercera columna), y la frecuencia acumulada,  $F_i$  (cuarta columna). Además, en la quinta columna se presenta el rango de error relativo obtenido.

Los datos muestran que el 62 % de los intentos el error no sobrepasa el 8 % de la distancia original. Apenas el 20 % de los intentos sobrepasa el 10 %, sin embargo, ninguno de estos supera el 15 %. El error relativo promedio fue de 6,04 %. Cabe recalcar que los gráficos de frecuencia de ocurrencia de los intervalos, registran que existe una tendencia hacia abajo de los intervalos de peor desempeño (ver Figs. 5 y 6).

<sup>1</sup>Unidad de distancia dentro del ambiente virtual.

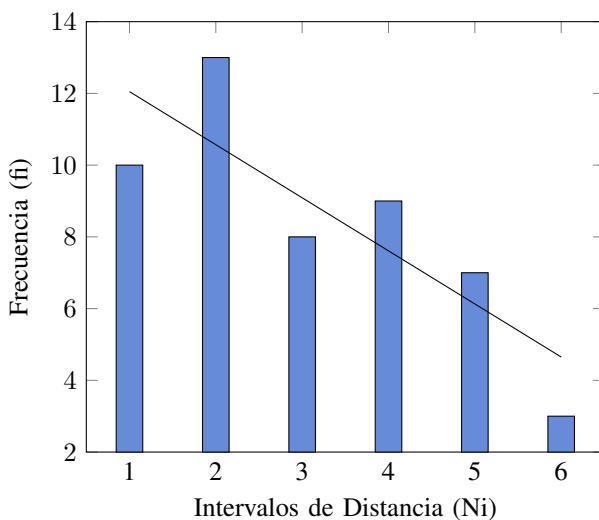


Figura 5. Resultados Sujeto 1

La segunda prueba consistió en una valoración subjetiva realizada a 70 sujetos durante la presentación de la aplicación durante el evento “Encuentros ciencia y tecnología EPN 2016 Ciudades Sostenibles en el Siglo XXI” en el marco del Hábitat III. En esta validación se pidió a los sujetos provistos de audífonos a que naveguen libremente en un ambiente virtual tridimensional donde se encontraban varias fuentes sonoras. Después, se les solicitó que llenen una encuesta cualitativa de dos preguntas de opción múltiple sobre la fidedignidad del sonido 3D generado por la aplicación.

La primera pregunta (ver Fig. 7) estaba relacionada a la impresión del sujeto sobre si se consiguió generar correctamente sonidos tridimensionales. El 90 % respondió validando el efecto de la aplicación.

La segunda pregunta (ver Fig. 8) buscaba información sobre cuánto costó percibir el efecto de inmersión acústica 3D en términos de manipulación de la aplicación. El 53 % de

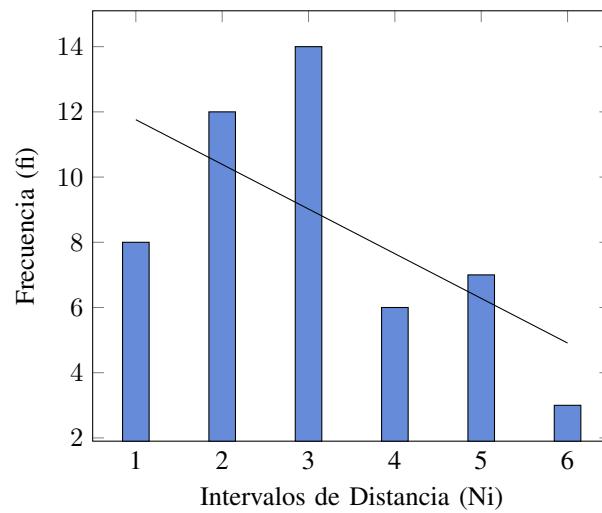


Figura 6. Resultados Sujeto 2

los encuestados reportó haber percibido el efecto de forma inmediata. Al siguiente 36 % le costó un poco acostumbrarse, mientras que el 11 % restante reportó haber tenido dificultades significativas.

#### B. Prueba en Ambiente Real

El equipo utilizado para las pruebas fue un computador Jetson TK1 con un procesador NVIDIA 4-Plus- Quad-Core ARM, una tarjeta de video NVIDIA Kepler con 192 núcleos CUDA y Ubuntu 14.04 como sistema operativo. Se utilizó un tamaño de bloque de 4096 muestras (el tamaño más pequeño sin que produzca ruido) y una taza de muestreo de 44100 muestras por segundo para el procesamiento del audio. Lo que nos da una latencia aproxima de 90 milisegundos en el audio que se obtiene dividiendo el tamaño del bloque para la taza de muestreo. Para la adquisición se utilizó una cámara estereoscópica Zed conectada a la Jetson TK1 que alimenta

Tabla 1  
RESULTADO DISTANCIA SUJETO 1

Ni	Distancia	fi	Fi	Error
1	0,0998 a 0,8072	10	10	0 % al 3 %
2	0,8072 a 1,4146	13	23	3 % al 5 %
3	1,4146 a 2,0220	8	31	5 % al 8 %
4	2,0220 a 2,6294	9	40	8 % al 10 %
5	2,6294 a 3,2368	7	47	10 % al 12 %
6	3,2368 a 3,8441	3	50	12 % al 15 %

Tabla 2  
RESULTADO DE DISTANCIA SUJETO 2

Ni	Distancia	fi	Fi	Error
1	0,0501 a 0,6194	8	8	0 % al 2 %
2	0,6194 a 1,1887	12	20	2 % al 5 %
3	1,1887 a 1,7580	14	34	5 % al 7 %
4	1,7580 a 2,3273	6	40	7 % al 9 %
5	2,3273 a 2,8966	7	47	9 % al 11 %
6	2,8966 a 3,4659	3	50	11 % al 13 %

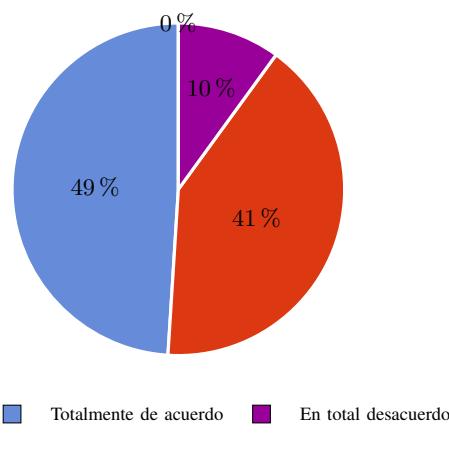
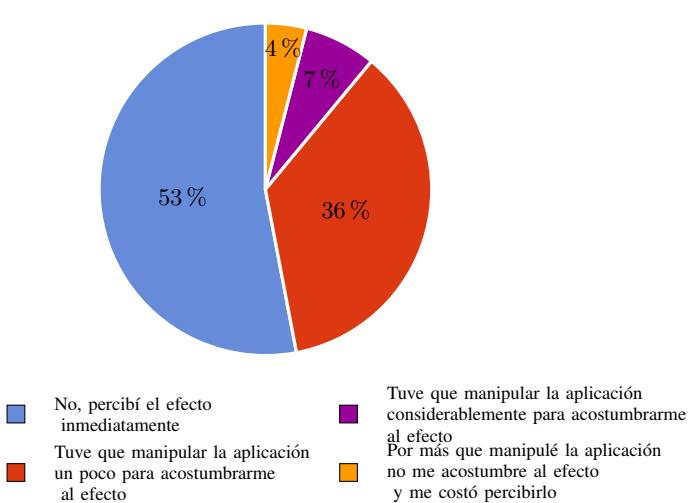


Figura 7. ¿Considera que el software simula correctamente sonido tridimensional?



**Figura 8.** ¿Tuvo necesidad de acostumbrarse al sonido para percibir la sensación 3D?



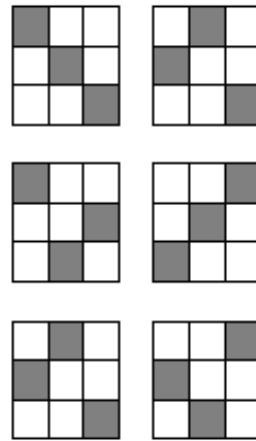
**Figura 9.** Sujeto 3 realizando la prueba

el sistema de detección de obstáculos. Dicho sistema provee de información de posición al servidor de audio cada 0.35 segundos en promedio (3 cuadros por segundo).

Las pruebas se realizaron en un espacio cerrado Fig. 9 con 6.60 m de largo por 2.60 m de ancho. Se dividió en espacios de 2.2 m de largo por 0.87 cm de ancho. Donde se ubicaban obstáculos de tamaño 1.76 m de altura y 60 cm de ancho, de manera aleatoria para cada una de sus 6 combinaciones posibles sin que un obstáculo se encuentre en la misma columna, ver Fig. 10. Alrededor existía una barrera de 73 cm de alto y al final de la sala se encontraba una fuente de sonido con música a la que el sujeto debía llegar completamente a ciegas esquivando los obstáculos.

Se realizó una prueba preliminar sin una fuente sonora guía en la posición de llegada. Aquí se pudo notar que el sujeto se desoriente al no tener noción de su posición ni del lugar de llegada. Para las siguientes pruebas fue necesario añadir una fuente de sonido guía al final de la sala para que el sujeto tenga una referencia a la posición de llegada.

Los sujetos de prueba tenían una capacidad visual normal,



**Figura 10.** Posiciones aleatorias utilizadas

cada sujeto se entrenó 5 minutos para aprender la relación del volumen que percibía con la distancia de la fuente antes de realizar la prueba.

Todos los sujetos fueron capaces de percibir las señales de alerta producidos por el módulo de aurilización y el sistema de detección de obstáculos, aunque algunos lo percibían de mejor manera que otros. Esto se debe en parte a las diferencias anatómicas que causan distorsiones en la percepción, al poco entrenamiento y la falta de familiaridad con el dispositivo.

En promedio existe menos de una colisión con los obstáculos por prueba (0.53 col por prueba). Igualmente existe en promedio menos de una colisión con las barreras por intento, pero existían choques con la misma barrera en el mismo lugar debido a que la cámara estereoscópica falla con obstáculos a estas alturas.

Los resultados en promedio de los seis sujetos se muestran en la Tab. 3. El tiempo promedio del recorrido fue 1.31 minutos con 0.53 colisiones (una cada dos intentos) con los obstáculos en promedio y 0.33 colisiones (una cada tres intentos) en promedio con las barreras. Como se puede observar existe una tendencia a que el tiempo disminuya Fig. 11, pero con esto se incrementa la cantidad de colisiones sobre todo con los obstáculos ver Fig. 12 y Fig. 13. Este incremento se debe a la latencia que posee la cámara que da percepciones erróneas sobre el posicionamiento de los obstáculos lo que causa interpretaciones erróneas del usuario, por lo tanto, colisiones con los obstáculos.

Las tres pruebas que no se finalizaron se debe a que el

**Tabla 3**  
RESULTADOS DISTANCIA SUJETO 1

N.	Tiempo (min)	C. Barrera	C. Obstáculo	N. P. Terminadas
1	1,57	0,40	0,40	5
2	1,08	0,00	0,50	4
3	1,01	0,20	0,20	6
4	1,36	0,50	0,50	6
5	0,84	0,17	0,67	6
6	1,05	0,17	0,67	6

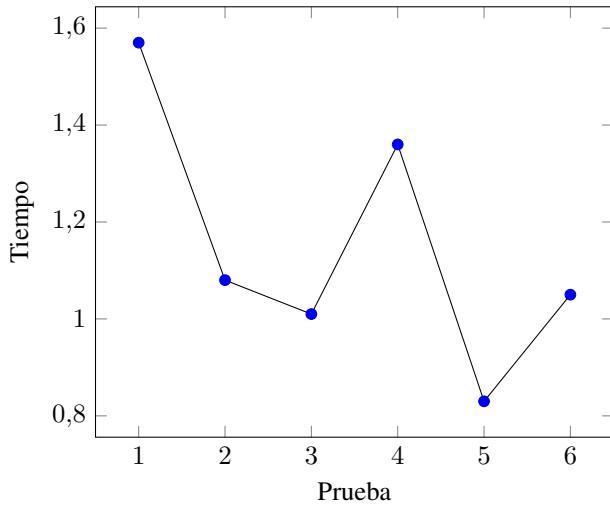


Figura 11. Tiempo promedio por prueba

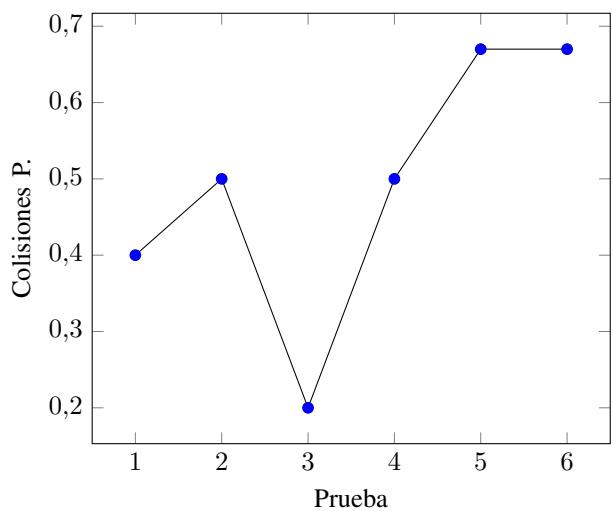


Figura 13. Colisiones promedio con obstáculos por prueba

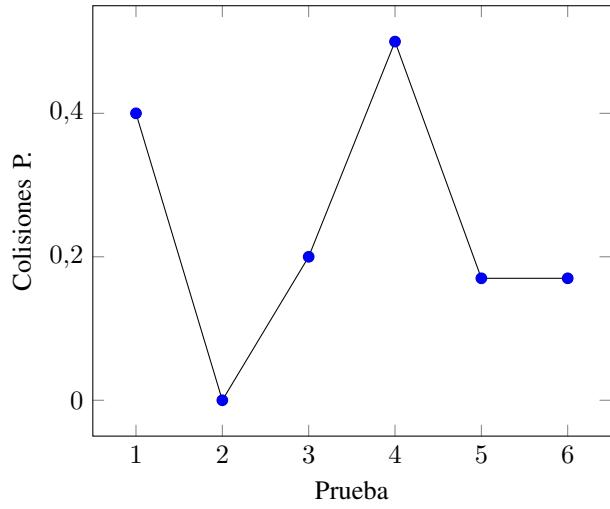


Figura 12. Colisiones promedio con barreras por prueba

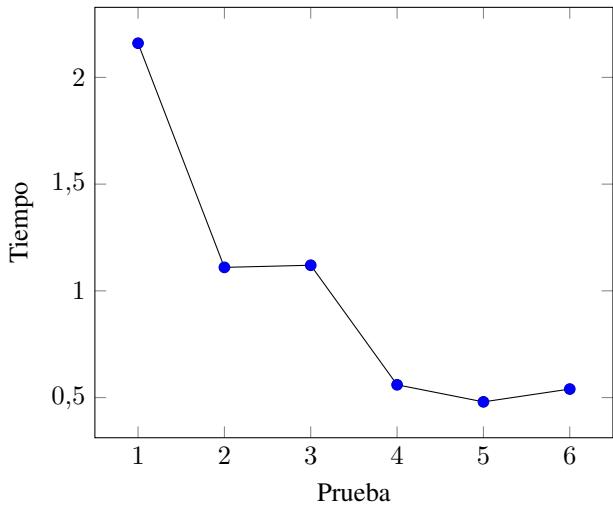


Figura 14. Tiempo sujeto 3

sujeto quedó atrapado entre la barrera y a una distancia menor a 50 cm por lo que escuchaba alertas sonoras en muchas direcciones. Esto se debe a que la cámara empieza a fallar en distancias menores a 50 cm y con obstáculos que se encuentren por debajo de la cintura del sujeto.

Si observamos las estadísticas del sujeto de prueba con mejor desempeño (Tab. 3), podemos observar como disminuye el número de colisiones y a la vez reduce el tiempo. Como se muestra en la tabla 2 este sujeto redujo el número de colisiones y además el tiempo con cada repetición (ver Fig 14 y 15). El sujeto finalizó las pruebas con un promedio de 59.7 segundos de tiempo y 0.33 colisiones por intento.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se consiguió desarrollar un módulo de aurilización para alertas sonoras de obstáculos y que funciona en tiempo real dentro de un ambiente, pudiendo ser este real o virtual.

Para el caso de las pruebas en el ambiente simulado, fue necesario configurar los comandos de translación y rotación

sobre su propio eje usando periféricos como el mouse y el teclado. Con esta herramienta de software fue posible realizar dos pruebas, una cuantitativa y otra cualitativa para poder validar el correcto funcionamiento del motor de aurilización. Los resultados cuantitativos demuestran que, a pesar de utilizar las HRIRs de la cabeza artificial KEMAR, los sujetos son capaces de reducir la distancia de separación con la fuente sonora en un 93,96 %. El análisis de frecuencia de los casos clasificados en intervalos de precisión muestra también una

**Tabla 4**  
RESULTADOS DISTANCIA SUJETO 3

N.	Tiempo (min)	C. Barrera	C. Obstáculo	P. Terminada
1	2,16	0	1	si
2	1,11	0	0	si
3	1,12	0	1	si
4	0,56	0	0	si
5	0,48	0	0	si
6	0,54	0	0	si

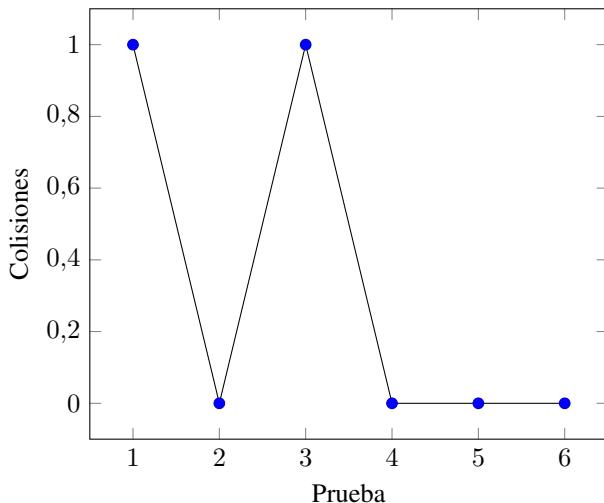


Figura 15. Colisiones sujeto 3

tendencia a la baja de los casos de más bajo desempeño. Esto indica que a medida que se repite el proceso, se produce un proceso de adaptación del sujeto a los sonidos 3D generados por la aplicación.

Por otro lado, los resultados de las pruebas cualitativas validan positivamente la generación del efecto sonoro 3D en el 90% de los casos y que el mismo fue percibido de forma prácticamente intuitiva. En el caso del 10% restante, se estima que existe un problema relacionado con falta de familiaridad con la interfaz de la aplicación. Es muy probable que esto también esté relacionado a impresiones producidas por no usar las HRIRs propias del sujeto. Este problema puede resolverse con un proceso de entrenamiento, tanto en el uso de la aplicación como en la utilización de HRIRs ajenas al sujeto.

Para el caso de las pruebas en el ambiente real, el sujeto con la mejor relación entre choques y tiempo tiene un promedio de 0.33 choques por prueba y tardó en promedio 59.7 segundos por prueba. Lo que demuestra que el sistema permite detectar obstáculos, aunque los sujetos hayan tenido un entrenamiento corto.

La latencia del sistema dificultó a los sujetos percibir los obstáculos de manera correcta, ya que debían permanecer sin movimiento hasta que el punto captado por el sensor se estabilice. Además, debido a que los sensores están a la altura del pecho, los obstáculos que se encuentran a la altura de la cintura como las barreras laterales son más difíciles de detectar. Por lo que se deben buscar mejores sensores o complementar los existentes para reducir los fallos.

Finalmente debido al aumento de velocidad de los sujetos (ya que se sentían más confiados) la latencia del dispositivo causó más colisiones, por lo que es recomendable utilizar computadores que soporten una mayor cantidad de cómputo.

En conclusión, el motor de aurilización fue probado exitosamente (tanto en el ambiente virtual como real) con las pruebas descritas en este trabajo. Por tal motivo, este prototipo de software tiene el potencial de ser aplicado para la generación de sonidos 3D en dispositivos ETA comerciales, de manera

que alerten de obstáculos a personas con discapacidad visual. Se prevé que sea necesario reducir aún más la complejidad computacional del motor de aurilización para poder procesar varias fuentes al mismo tiempo (para lidiar con varios obstáculos) o para poder simplificar la arquitectura del dispositivo. Otra alternativa sería reemplazar los actuales procedimientos de detección de obstáculos con técnicas alternativas de machine learning para acelerar su procesamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Escuela Politécnica Nacional para el desarrollo de este proyecto de investigación y específicamente de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en lo referente al motor de aurilización en ambientes virtuales.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Lee and D. Stewart, "Virtual reality (vr): a billion dollar niche tmt predictions 2016." [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/tmt-pred16-media-virtual-reality-billion-dollar-niche.html>
- [2] K. Mendel, B.-I. Dalenbäck, and P. Svensson, "Auralization – an overview," *J. Audio Eng. Soc.* 41, p. 861, 1993.
- [3] M. Vorländer, *Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Springer, 2008.
- [4] J. F. Lucio Naranjo, R. Tenenbaum, L. A. Paz Arias, H. P. Morales Escobar, and I. J. Iniguez Jarrín, "3d sound applied to the design of assisted navigation devices for the visually impaired," *Latin-American Journal of Computing*, 2015.
- [5] I. Lengua, D. Larisa, G. Peris, and B. Defez, "Dispositivo de navegación para personas invidentes basado en la tecnología time of flight." [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532013000300004](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000300004)
- [6] R. Bencina, "Real-time audio programming 101: time waits for nothing." [Online]. Available: <http://www.rossbencina.com/code/real-time-audio-programming-101-time-waits-for-nothing>
- [7] G. Alonso, L. Budde, and M. Zannier, "Síntesis de respuesta impulsiva de recintos a través del método de trazado de rayos," *UTN FRC - Depto Ing. Electrónica*, 2012.
- [8] F. Pishdadian, "Filters, Reverberation & Convolution," 2017. [Online]. Available: <http://www.cs.northwestern.edu/~pardo/courses/eecs352/lectures/MPM16-topic9-Filtering.pdf>
- [9] B. Gartner and K. Martin, "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone." [Online]. Available: <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [10] Ref. ?, p. 28.
- [11] T. Woźniak, "Implementing Binaural (HRTF) Panner Node with Web Audio API," April 2015. [Online]. Available: <https://codeandsound.wordpress.com/2015/04/08/implementing-binaural-hrtf-panner-node-with-web-audio-api/>
- [12] S. Spors, "Segmented Convolution—DigitalSignalProcessing 0.0 documentation." [Online]. Available: [http://dsp-nbsphinx.readthedocs.io/en/nbsphinx-experiment/nonrecursive\\_filters/segmented\\_convolution.html](http://dsp-nbsphinx.readthedocs.io/en/nbsphinx-experiment/nonrecursive_filters/segmented_convolution.html)
- [13] S. Smith, "FFT Convolution." [Online]. Available: <http://www.dspsguide.com/ch18/2.htm>
- [14] G. Wersnyi, "Effect of emulated head-tracking for reducing localization errors in virtual audio simulation," *IEEE Transactions On Audio, Speech, And Language Processing*, vol. 17, no. 2, pp. 247–252, 2009.
- [15] T. Möller and B. Trumbore, "Fast, Minimum Storage Ray/Triangle Intersection," in *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, ser. SIGGRAPH '05. New York, NY, USA: ACM, 2005. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1198555.1198746>
- [16] Ref. ?, p. 98.
- [17] T. C. R. Network, "Cplusplus reference `atomic`." [Online]. Available: <http://www.cplusplus.com/reference/atomic/>
- [18] G. Held, *Server Management*. CRC Press, 2000.
- [19] F. Torres, P. Pomares, J. and Gil, and S. Puente, *Robots y Sistemas Sensoriales*. Prentice Hall, 2002.
- [20] P. Corke, *Robotics, Vision and control*. Springer, 2013.

- [21] T. C. R. Network, "About - point cloud library (pcl)." [Online]. Available: <http://pointclouds.org/about/>
- [22] B. Li, X. Zhang, Munoz, X. J. P., X. J., Rong, and Y. Tian, "Assisting blind people to avoid obstacles: An wearable obstacle stereo feedback system based on 3d detection," *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2016.
- [23] A. Garcia, "Towards a real-time 3d object recognition pipeline on mobile gpgpu computing platforms using low-cost rgb-d sensors," ser. CEUR Workshop Proceedings, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [24] A. Nguyen and B. Le, "3d point cloud segmentation: A survey," ser. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RAM.2013.6758588>
- [25] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson, and C. Avendano, "The cipic hrif database." [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/cee9/f63da2cafe7dd7b8bd0752bea57f38d4afc5.pdf>

## V. AUTORES



**Alex Armendáriz** Ingeniero en Sistemas y Computación por la Ingeniería en Sistemas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (2017). Actualmente estudiante distancia de Point Blank London en la carrera de Ing. en sonido y producción musical, participó como ayudante de investigación en el área de simulación acústica en la Escuela Politécnica Nacional y la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Su principal campo de estudio está enfocado en aplicaciones de audio en tiempo real. El trabajo que actualmente realiza se encuentra enfocado en la implementación de sistemas de aurilización utilizando técnicas de procesamiento digital de señales, computación gráfica e inteligencia artificial.



**José F. Lucio-Naranjo** Ingeniero en Sistemas y Computación por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (2005). Máster y Ph.D. en Modelado Computacional por la Universidad del Estado de Río de Janeiro (2010 y 2014 respectivamente). Su investigación doctoral fue reconocida y apoyada por la Acoustical Society of América mediante ASA International Student Grant. Su principal campo de estudio está enfocado en técnicas de simulación numérica e inteligencia computacional aplicadas al modelado de la propagación acústica y a la generación de realidad virtual. Actúa como investigador y profesor titular de sistemas y computación en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN) y también como profesor e investigador a tiempo parcial en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). También ha actuado como profesor en la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), la Universidad Federal Fluminense, la Universidad de las Américas (UDLA) y la Universidad Central del Ecuador (UCE). Fue miembro de la Sociedad Brasileña de Acústica (SOBRAC).



**Diego Francisco Navas Flores** Nació en 1993 en Atuntaqui-Ecuador. Estudió su secundaria en la Unidad Educativa "La Salle". Se graduó como ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en el 2018. Fue miembro de Club de Robótica de la EPN desde el año 2014. Trabaja como ayudante de investigación en la Escuela Politécnica Nacional.

# ¿Está Ecuador preparado para cambiar su matriz productiva?: un análisis del sistema ecuatoriano de innovación

## *Is Ecuador ready to change its productive matrix?: an analysis of the Ecuadorian innovation system*

Sastre, Juan Fernández, *Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-Ecuador)*

**Resumen**—A través de una revisión de las encuestas ecuatorianas de ciencia, tecnología e innovación y de varios estudios empíricos sobre Ecuador; el presente artículo describe el sector empresarial ecuatoriano, sus agentes científico-tecnológicos y las interacciones que se producen entre ambos; con el objetivo de reflexionar sobre la capacidad del sistema ecuatoriano de innovación para transitar hacia una matriz productiva basada en el conocimiento. El análisis indica que el Ecuador todavía no cuenta con un sistema de innovación con capacidad de aprendizaje, que posibilite dicha transición, cuando las condiciones tecnológicas sean propicias.

**Palabras clave**— cambio estructural; paradigma tecnológico; sistemas nacionales de innovación.

**Abstract**—Through a review of the Ecuadorian science, technology and innovation surveys and of several empirical studies on Ecuador; this article describes the Ecuadorian business sector, its science and technology organizations and their interactions; with the objective of examining the capacity of the Ecuadorian innovation system to move towards a productive structure based on the use of knowledge. The analysis indicates that Ecuador does not yet have an innovation system with learning capacity, which allows such a transition, when the technological conditions are propitious.

**Index Terms**— structural change; technological paradigm; national innovation systems

### I. INTRODUCTION

ENSUSES provide important information about the status of a population since they allow the establishment of its socio-

Article history:

Received 15 April 2018

Accepted 28 May 2018

Juan Fernández Sastre is a PhD in Economía y Gestión de la Innovación from the Universidad Autónoma de Madrid. He is with the Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-Ecuador) (e-mail: jfernandez@flacso.edu.ec).

economic factors and through them derive poverty indexes [1].

Poverty is a complex phenomenon that needs to be understood from many points of view in order to be taken into account adequately [2]. Nowadays, poverty is measured in a single dimension called income poverty [3], which is usually based on income or consumption. However, there are other variables with which the socio-economic situation of a family can be established (e.g. the Human Development Index [HDI] uses three dimensions: health, knowledge and life status; the Multidimensional Poverty Index [MPI] is composed of ten indicators grouped in three areas: education, health and living conditions) [3].

The method that is most widely used for collecting socio-economic data is the census. This means conducting door-to-door visits to perform surveys about family structure and the personal situation of each of its members. These visits are carried out every five to ten years depending on budgetary availability. After processing the survey data, the collected information allows the establishment of socio-economic family situations and, through them, an aggregated value for the whole country. The results allow the government and regulatory organizations to develop social policies to improve the living conditions of the population [3], [4].

However, door-to-door surveys implies a high cost that impacts the state budget, especially in developing countries [4]. Consequently, some methods have been implemented for reducing costs: the number of variables to be compiled is reduced, some census zones are not visited, or the visits are simply postponed [1].

Alternatively, some developing countries have developed alternative data collecting mechanisms to obtain information about families for determining their socio-economic status [1], [4]. These mechanisms include, among others: the use of social networks, administrative records, mobile phone call logs, basic service records. This allows to obtain good estimates of poverty indicators at a lower cost and in a shorter time [1]. Thus, this article aims to identify these alternative methods to collect data from families to determine their socio-economic status, which can be used instead of visits. This research objective will also allow the identification of

alternative information sources (i.e. already existing data which is being stored in different public or private institutions) which would make it possible to measure socio-economic indicators [5].

The remainder of this paper is organized as follows: in section II, we present the research question. In section III, we describe the search process. This is followed by a presentation of our main results (section IV). In section V, we present the validity consideration of the literature review. Section VI presents a discussion of our results. The section VII presents the conclusions of the research. Finally, new opportunities of research, derived from this review, are offered.

## II. RESEARCH QUESTION

In this research a systematic literature review was performed following the guidelines proposed by Kitchenham [6].

The research question is "which methods and techniques, other than the traditional door-to-door approach, are being used to predict the socio-economic conditions of population?

This question allows the identification of other methods that could be used in countries where state financial resources, for use in census-type visits to the population in order to determine socio-economic status, are limited[4]. In addition, it allows for the identifying of other population information sources, already existing data which is being stored in different institutions (public or private) which would make it possible to establish behaviors and indicators that then could be related to the socio-economic situation of individuals or their family nucleus, such is the case of electricity consumption data.[5]

## III. LITERATURE REVIEW PROCESS

Considering the aim of the article is to identify alternative methods and data sources to measure socio-economic factors, we focused on publications reporting the use of predictive methods to establish the status, characteristics, conditions, or socio-economic factors of a population. Publications dealing with methods to determine population density, as well as economic growth, were also considered because the method used in these cases could also be used to predict socio-economic factors. It was decided that the words selected for the search were to be mentioned in the title, the keywords or in the abstract. There are the establish criteria for the research process.

The following combination was used as a search string: (socioeconomic OR economic OR household OR poverty OR depravation OR census OR survey) AND (predictive OR predicting OR “big data” OR “data mining” OR “data analysis” OR analytics). The period for the review was established between 2013 and 2017.

Searches were carried out for collecting electronic articles published in scientific journals and conferences in English using the search engines of SCOPUS and WEB OF SCIENCE.

It is necessary to mention that the terminology used to describe the predictive method changes over time, by authors and even by country. In some publications, there are combinations with the concepts of economic growth,

population and housing characteristics, so that the selection of publications was difficult to determine which could be used. Accordingly, there were publications identified and selected by the search criteria that did not comply with the objectives of this study (false positive), publications that were not detected in the search but that met the objective posed (false negative or opportunistic publications), and, publications that might be of interest to the objective of this study.

The results of the search carried out are shown in Table I. It shows the order in which the bibliographic databases were consulted. Forty-three publications were found in this manner and were loaded onto ATLAS.TI for compilation and analysis. Finally, twenty-nine publications, that comply with the selection criteria and contribute to answering the posed research question, were selected. Selected articles come mainly from scientific journals (24) and the rest are from conferences (5). Most of publications correspond to the year 2017 (9 of 29).

TABLE I  
RESULTS OF THE REVIEW IN BIBLIOGRAPHIC DATABASES

Source	Searched	Selected
Scopus	35	25
Web of Science	8	4
Total	43	29

## IV. RESULTS

### A. Analysis of the evolution of the methods

The methods used, and the purpose of the selected publications are listed in Table II. A grouping of the purpose versus method used was also carried out and the results are listed on Table III.

The largest number of publications (11) is intended to predict or identify the factors of the population using various methods: correlations, decision trees, statistical distributions, regressions, and tabulation of administrative data (Referred in Table III).

There are four publications that identify the population's poverty situation using the correlation method, and three publications to identify population characteristics through correlations, decision trees and gravity models. Other methods used are machine learning, map reduce, random coefficient model and statistical means for processing administrative records.

Upon grouping the methods vs. publication purposes, as shown in Table IV, the correlation and regression methods are the most commonly used methods. Correlation has been used to determine population characteristics, poverty situation and socio-economic factors. Regression has been used to determine population group sizes, economic growth, population mobility, proxies for social data and socio-economic factors.

TABLE II.  
METHOD AND PURPOSE OF THE SELECTED ARTICLES

Id	Method	Purpose
1	Correlation	Socio-economic factors
2	Correlation	Socio-economic factors
3	Decision tree	Socio-economic factors

Id	Method	Purpose	Purpose	Method							
					2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
4	Machine learning	Vacancy risks	Population density	Resource selection probability function				1	1		
5	Log-normal distribution with cross-regional and time variations	Socio-economic factors	Population mobility	Regression			1				
6	Random coefficient model	Poverty rates	Poverty rates	Random coefficient model		1					
7	Regression	Proxies for social data	Poverty situation	Correlation	2	1	1				4
8	Correlation	Poverty situation	Predict Income	Map Reduce		1					1
9	Regression	Socio-economic factors	Proxies for social data	Regression	1						1
10	Correlation	Poverty situation	Census	Correlation	1	1					3
11	Regression	Socio-economic factors	Economic growth and population aging level	Decision tree	1						1
12	Correlation	Poverty situation	Predict Income	Log-normal distribution with cross-regional & time variations	1						1
13	Regression	Population mobility	Population density	Socio-economic factors	Machine learning						1
14	Correlation	Population characteristics	Environmental and socio-economic representativeness	Reduction methods							1
15	Register-based statistics administrative	Census	Poverty situation	Regression	1						1
16	Regression	Economic growth and population aging level	Population characteristics	Tabulation and cross-tabulation							1
17	Map Reduce	Predict Income	Socio-economic factors	Machine learning	1						1
18	Resource selection probability function	Population density	Crowd sizes								
19	Bayesian methodology	Environmental and socio-economic representativeness	Socio-economic factors	Regression	1	1	1				3
20	Correlation	Poverty situation	Machine learning	Tabulation and cross-tabulation							1
21	Decision tree	Population characteristics	Reduction methods	Machine learning							1
22	Reduction methods	Socio-economic factors	Regression								1
23	Regression	Crowd sizes	Tabulation and cross-tabulation								1
24	Regression	Socio-economic factors	Socio-economic factors								1
25	Building-population gravity model	Population characteristics	Patterns of co-benefit behaviors								1
26	Tabulation and cross-tabulation	Socio-economic factors									
27	Machine learning	Socio-economic factors									
28	Correlation	Socio-economic factors									
29	Regression	Patterns of co-benefit behaviors									

TABLE IV.

METHOD VS PURPOSE OF SELECTED ARTICLES

Method	Purpose	2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Bayesian methodology	Environmental and socio-economic representativeness				1	1		
	Population characteristics			1			1	1
Correlation	Poverty situation		2	1	1			4
	Socio-economic factors	1	1			1	3	
Decision tree	Population characteristics				1	1		
	Socio-economic factors	1					1	1
Log-normal distribution with cross-regional and time variations	Socio-economic factors	1						1
Machine learning	Socio-economic factors					1	1	
	Vacancy risks	1					1	1
Map Reduce	Predict Income					1	1	
Random coefficient model	Poverty rates	1						1
Reduction methods	Socio-economic factors						1	1
	Crowd sizes						1	1
	Economic growth and population aging level							1
	Patterns of co-benefit behaviors							1
Regression	Regression	1	1					1
	Correlation	1		1				
	Decision tree	1	1					
	Building-population gravity model	1	1					
	Socio-economic	1	1	1				3

TABLE III.

PURPOSE VS METHOD OF SELECTED ARTICLES

Purpose	Method	2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Census	Register-based statistics		1	1				
Crowd sizes	Regression			1	1			
Economic growth & population aging level	Regression			1	1			
Environmental & socio-economic representativeness	Bayesian methodology		1	1				
Patterns of co-benefit behaviors	Regression			1	1			
	Correlation	1		1				
Population characteristics	Decision tree		1	1				
	Building-population gravity model			1	1			

Method	Purpose	2011	2013	2014	2015	2016	2017	Total
factors								
Resource selection probability function	Population density			1		1		
Tabulation and cross-tabulation	Socio-economic factors				1	1		
Register-based statistics administrative	Census				1		1	
Building-population gravity model	Population characteristics				1	1		

The door-to-door visitation method implies that the data remains the same until the next visit. For this reason, in order to estimate the current situation of the population [4], simulations are used as a very useful tool to simulate the changes that occur in an annual basis.

Data mining methods have become the most widely used in financial and commercial sectors to identify customer patterns and behaviors [8]. The reviewed articles show that these methods are being used to look for relevant information of the populations that allows socio-economic factors to be inferred, opening a new area of application for these methods.

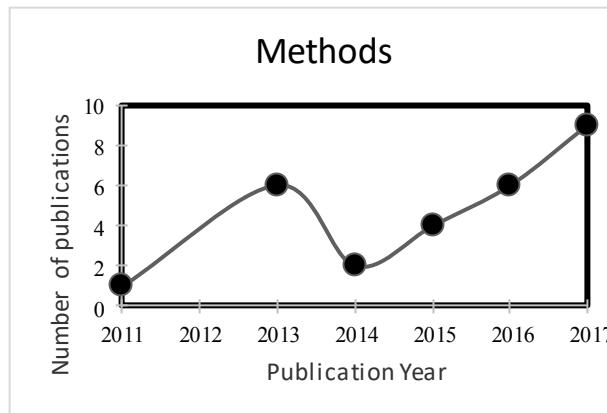


Fig. 1. Time line of the number of the articles per year, showing the different methods used to determine the socio-economic factors, poverty conditions and social status, beyond others.

### C. Data Sources

Satellite data and images from Google Maps are used in several studies (e.g. [3], [9]–[12]) to establish behavior patterns among families in selected areas.

Another data source is the one generated from Twitter (e.g. [13]–[15]). The use of “tweet data” in poor sectors allows to estimate the population in those areas as well as the relationships that are established among Twitter users.

Mobile telephony is also one of the most used data sources to establish poverty maps used by academic contributions (e.g. [1]–[3], [16], [17]). The authors of these articles agree that this

source has a huge potential for determining socio-economic status since it generates a large volume of data that would allow establishing relations between users by means of a “who-calls-whom” search.

### D. Relationship between Data Sources and Methods

As shown in Table III, correlation is one of the most widely used methods for establishing the socio-economic status of the population. In the case of the use of telephone records, the analysis of certain characteristics of the records allows to establish the degree of poverty of the families. This is done by establishing networks of communication between users with similar socio-economic characteristics. This method establishes behavior patterns among users (assembling a virtual communication network). Thus, it is possible to correlate the way in which the users communicate and with whom they do it with poverty levels established for the user residence area [1], [2].

Twitter is also used on correlation studies by exploiting the geographical metadata inserted within each message at the time of being sent to the recipient. This establishes a communication network among the social network that allows the identification of patterns for inferring socio-economic factors. As indicated by Botta, Moat and Preis [15], the geographic location of the tweets allows inferring where a person resides (location under normal conditions) and his/her socio-economic status based on the characteristics of his/her contacts.

Correlations studies are also performed using geospatial data or satellite images. Similarities can be established for the population that lives in a given area while it is compared with areas already defined as being poor. Thus, it can be inferred that the population in a certain area has an established poverty level [11], [18].

All these studies highlight that, using correlation as a method; it is possible to use different data sources to infer the socio-economic factors of the population.

### V. VALIDITY CONSIDERATIONS

The literature review followed the guidelines proposed by Kitchenham. In Section III, it is mentioned the research planning process, identified the protocol used for searching the publication, the period for the bibliographic review, and the search engines used.

The research allows identifying the alternative methods used to collect data from families that is generated daily and continuously. This point is important to mention, since it would imply that it is possible to determine the socio-economic situation of families with the use of this data. Therefore, the research question was answered because we find alternative methods instead of the door-to-door approach.

In addition, the literary review also showed which methods were used to process the data and predict the socio-economic factors. Correlations and regressions are the most used methods.

## VI. DISCUSSION

The review shows various alternatives of data sources and methods that can be applied to infer the socio-economic conditions of the population.

However, it is necessary to point out that in none of the selected publications there is a comparison of the costs incurred by each one of these alternatives and what the equivalent door-to-door visits method implies. This could be a good measure of what the budgetary benefit of using these data sources and alternative methods is.

Another point that remains pending is determining whether the data used in each case was available for the studies carried out. There are publications in which the mobile service operators have made their data available to the scientific community to be analyzed and to determine its use.

The use of the methods for estimating poverty is subject to the variables chosen for the construction of the MPI or HDI indexes. It is important to establish if the available data can be related to the measures of these indexes and thus achieve a correct measurement.

## VII. CONCLUSIONS

The results show there are alternative methods to collected socio-economic data from families instead of the door-to-door approach, using data, which is available from satellite data, images from Google Maps, the consumption of basic services like mobile telephony and electricity, and from social networks. Each data source generates a large volume of data that allows establishing behavioral patterns and relationships of the population. Therefore, it is possible to estimate the current situation of the population and to make simulations of how the socio-economic situation will vary over time.

Based on our analysis, it is crucial to determine the kinds of variables that can contribute to establish a multidimensional index to measure the socio-economic status of the families. The input data influences the selection of the dimensions to compose the aggregated index.

For this reason, the information technology tools are used to simulate the changes, merging the data and choosing the variables that can contribute to find the better approach to measure the socio-economic factors of the families.

Correlation method allows analyzing characteristics of the collected data and establish the patterns of the population, thus it is possible to find similarities between people and to infer the socio-economic situation.

Regression method also is used to measure socio-economic factors, determining the population group sizes and associating with the economic growth of the country. It contributes to use the historical data to establish the behaviors of people and communities.

The combination of these methods and the IT tools can be a great contribution to predict socio-economic factors in less time and at lower cost

## VIII. FUTURE STUDIES

Methods and data sources that would allow inferring the socio-economic factors of the population have been considered in this study, but it is possible to consider the

inclusion of other sources that have not been mentioned in the revised publications.

It is possible to consider institutional databases from registry offices, labor ministries, health ministries, or even internal revenue services, because they can contribute to better adjust the inference of the socio-economic factors. Some of this data is already available in open data repositories.

With the inclusion of phone and Tweeter logs, poverty indicators could be built with data that is updated periodically. This would mean that new methods could be applied to provide low-cost poverty indicators, which would represent significant savings for the government budget and would allow updated information for the creation and adjustment of public policies.

## REFERENCES

- [1] C. Smith-Clarke, A. Mashhadi, and L. Capra, "Poverty on the Cheap: Estimating Poverty Maps Using Aggregated Mobile Communication Networks," *Proc SIGCHI Conf Hum Factors Comput Syst*, pp. 511–520, 2014.
- [2] N. Pokhriyal, W. Dong, and V. Govindaraju, "Virtual Networks and Poverty Analysis in Senegal," 2015.
- [3] N. Pokhriyal and D. C. Jacques, "Combining disparate data sources for improved poverty prediction and mapping," *Proc Natl Acad Sci*, no. 12, p. 201700319, 2017.
- [4] A. Mathiassen, "Testing Prediction Performance of Poverty Models: Empirical Evidence from Uganda," *Rev Income Wealth*, vol. 59, no. 1, pp. 91–112, 2013.
- [5] B. Anderson, S. Lin, A. Newing, A. B. Bahaj, and P. James, "Electricity consumption and household characteristics: Implications for census-taking in a smart metered future," *Comput Environ Urban Syst*, vol. 63, pp. 58–67, 2017.
- [6] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review," *Inf Softw Technol*, vol. 51, no. 1, pp. 7–15, 2009.
- [7] D. Helbing and S. Baitetti, *From social data mining to forecasting Socio-Economic crises*, vol. 195, no. 1. 2011.
- [8] V. Atalay, S. Ustun, and S. Bulbul, "The Determination of Socio-economic Factors Affecting Student Success by Data Mining Methods," *2013 12th Int Conf Mach Learn Appl*, vol. 2, pp. 540–542, 2013.
- [9] E. M. Weber, V. Y. Seaman, R. N. Stewart, T. J. Bird, A. J. Tatem, J. J. McKee, B. L. Bhaduri, J. J. Moehl, and A. E. Reith, "Census-independent population mapping in northern Nigeria," *Remote Sens Environ*, vol. 204, no. February, pp. 786–798, 2018.
- [10] Y. Yao, X. Liu, X. Li, J. Zhang, Z. Liang, K. Mai, and Y. Zhang, "Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data," *Int J Geogr Inf Sci*, vol. 31, no. 6, pp. 1220–1244, 2017.
- [11] T. Gebru, J. Krause, Y. Wang, D. Chen, J. Deng, E. L. Aiden, and L. Fei-Fei, "Using Deep Learning and Google Street View to Estimate the Demographic Makeup of the US," vol. 0, 2017.
- [12] D. Quercia and D. Saez, "Mining urban deprivation from foursquare: Implicit crowdsourcing of city land use," *IEEE Pervasive Comput*, vol. 13, no. 2, pp. 30–36, 2014.
- [13] R. O. Sinnott and W. Wang, "Estimating micro-populations through social media analytics," *Soc Netw Anal Min*, vol. 7, no. 1, 2017.
- [14] C. J. Vargo and T. Hopp, "Socioeconomic Status, Social Capital, and Partisan Polarity as Predictors of Political Incivility on Twitter: A Congressional District-Level Analysis," *Soc Sci Comput Rev*, vol. 35, no. 1, pp. 10–32, 2017.
- [15] F. Botta, H. S. Moat, and T. Preis, "Quantifying crowd size with

- mobile phone and *Twitter* data,” *R Soc Open Sci*, vol. 2, no. 5, p. 150162, 2015.
- [16] J. Blumenstock, G. Cadamuro, and R. On, “Predicting poverty and wealth from mobile phone metadata,” *Science (80- )*, vol. 350, no. 6264, pp. 1073–1076, 2015.
- [17] B. Aragona and D. Zindato, “Counting people in the data revolution era: challenges and opportunities for population censuses\*,” *Int Rev Sociol*, vol. 26, no. 3, pp. 367–385, 2016.
- [18] P. R. Choudhury and M. K. Behera, “Using Administrative Data for Monitoring and Improving Land Policy and Governance in India,” *Proc 10th Int Conf Theory Pract Electron Gov - ICEGOV '17*, pp. 127–135, 2017.



Published by:

Escuela Politécnica Nacional  
Facultad de Ingeniería de Sistemas  
Departamento de Informática y Ciencias de la Computación  
Ecuador

<http://lajc.epn.edu.ec/>  
lajc@epn.edu.ec

May 2018

