EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

ISSN 3122-4806

REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA
SEMESTRE AGOSTO - DICIEMBRE 2024

Volumen 1 - No. 1 - 2024

http://orizaba.tecnm.mx/revistaojs

CINTILLO LEGAL

REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA, volumen 1 - número 1 - 2024, agosto – diciembre 2024, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx, a través del Instituto Tecnológico de Orizaba, Avenida Oriente 9 no. 852 Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320. Orizaba, Veracruz, México. Contacto: 272 110 5360, riim.responsable.general@ito-depi.edu.mx, http://orizaba.tecnm.mx/revistaojs. Editor Responsable: Eduardo Mael Sánchez Coronado. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2023-091910590800-102, otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor; ISSN 3122-4806 ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, División de Estudios de Posgrado, Ofelia Landeta Escamilla, Avenida Oriente 9 no. 852 Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320. Orizaba, Veracruz, México. Fecha de la última modificación: 10 de agosto de 2024.

Queda prohibida la reproducción total o parcial en cualquier medio, del contenido de la presente revista electrónica, sin contar con la autorización del Instituto Tecnológico de Orizaba.

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Ofelia Landeta Escamilla **Responsable General**	**riim.responsable.general@ito-depi.edu.mx**
Dr. Fernando Ortiz Flores **Responsable Técnico**	**riim_soporte@orizaba.tecnm.mx**
Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado **Editor en jefe**	**riim.editor@ito-depi.edu.mx**
Dra. Araceli Ortiz Celiseo **Responsable de Ing. Química**	**riim.quimica@ito-depi.edu.mx**
Dr. Víctor Ricardo Castillo Intriago **Responsable de Ing. Administrativa**	**riim.administrativa@ito-depi.edu.mx**
Dra. Ma. Eloísa Gurruchaga Rodríguez **Responsable de Ing. Industrial**	**riim.industrial@ito-depi.edu.mx**
Dr. José Luis Sánchez Cervantes **Responsable de Sistemas Computacionales**	**riim.sistemas@ito-depi.edu.mx**
Dra. María G. Balderrábano Saucedo **Responsable de Investigación Educativa**	**riim.educativa@ito-depi.edu.mx**
Dr. Ignacio Herrera Aguilar **Responsable de Ing. Mecánica y Mecatrónica**	**riim.mecatronica@ito-depi.edu.mx**
Dr. Gerardo Águila Rodríguez **Responsable de Ing. Eléctrica y Electrónica**	**riim.electronica@ito-depi.edu.mx**
Dr. Miguel Josué Heredia Roldán **Responsable de Logística**	**riim.logistica@ito-depi.edu.mx**
Dr. Mauricio Romero Montoya **Responsable de Logística Técnica**	**riim.logistica.tecnica@ito-depi.edu.mx**
MC. Enrique Alejandro Cuellar Cortes **Webmaster**	**riim.webmaster@ito-depi.edu.mx**
Dr. Guillermo Alfredo Arrioja Carrera **Diseño editorial**	**riim.diseno@ito-depi.edu.mx**

ÍNDICE

1 **Medición del desempeño de clasificadores usando atributos sintéticos polinomiales y selección de atributos con MrMR** *L. A. Banda Peláez, K. M. Ramírez Vergara, A. López Chau, V. Trujillo Mora, C. O. González Moran.* **5 - 13**

2 **Software para la clasificación y conteo de vehículos en autopistas basado en aprendizaje automático y visión artificial**
E. Vázquez Benito, C. Murrieta Vázquez, P. Ochoa Trujillo. **14 - 22**

3 **Adsorción del colorante naranja de metilo con un polímero metal-orgánico (MOF) de cobalto**
Cecilia Rivera García, María Elizabeth Márquez López, Lidia Elena Chiñas Rojas, Rodolfo Peña Rodríguez, José María Rivera Villanueva. **23 - 32**

4 **Detección de depresión mediante procesamiento de fotogramas**
Rodolfo Romero-Herrera, Odan Ricardo García Mosqueda, Cecilia Rivera García. **33 - 42**

5 **Índices factoriales de competitividad, mercadeo y capital humano de las prácticas administrativas en mype suburbanas**
Luis Carlos Ortuño-Barba, Armando Heredia-González, Renato E. Ortiz-Saucedo, Ninivet S. Chiñas-Álvarez. **43 - 52**

6 **Potencial de aplicación de biomasa de residuo forestal como fuente de energía renovable**
Jorge Bedolla-Hernández, Vicente Flores-Lara, Marcos Bedolla-Hernández, José Michael Cruz-García, Efrén Sánchez-Flores. **53 - 62**

7 **Aplicación del modelo de pensamiento Effectuation, para el emprendimiento docente: Proyecto Forest-Acción**
J. Contreras Ruiz, M. R. Méndez Pérez, A. L., Cruz González, I. P. Rodríguez Mendoza, E. M. Meza Rosas. **63 - 70**

8 **Diseño de un guante recolector de chícharo con tecnología de impresión 3D**
A.C. Valdés Álvarez, A. Calderón Jiménez, L. A. Hernández Sánchez, C. Méndez Rivera, R. Mora Guadalupe. **71 - 80**

9 **Mejora del rendimiento de un proceso mediante Kaizen, en una empresa de acuicultura en México**
L. G. González Sosa, B. A. Villalobos Martínez, L. M. Blanco González, J. K. López Orduña, J. A. Sarmiento Torres. **81 - 90**

10 **El problema Dial–a–Ride y sus variantes**
Erick Cervantes–Mendieta, M. Angélica Salazar–Aguilar. **91 - 98**

Medición del desempeño de clasificadores usando atributos sintéticos polinomiales y selección de atributos con MrMR

L. A. Banda Peláez[1], K. M. Ramírez Vergara[2], A. López Chau[3], V. Trujillo Mora[4], C. O. González Moran[5]

[1]UAEMex; lbandap001@alumno.uaemex.mx,[2]UAEMex; kramirezv003@alumno.uaemex.mx, [3]UAEMex; alchau@uaemex.mx, [4]UAEMex; vtrujillom@uaemex.mx, [5]UAEMex; cogonzalezm@uaemex.mx.

***Área de participación**: Sistemas Computacionales*

Resumen

Las diferentes complejidades presentes en los datos perjudican el desempeño de los modelos predictivos. Entre las complejidades más comunes en los datos se encuentra el desbalance de clases, la presencia de casos atípicos traslape de clases, y alta dimensionalidad. Una de las formas de tratar con este problema es la creación y adición de atributos sintéticos a los datos, con la finalidad de mejorar el desempeño. En este artículo, se realiza una comparativa del comportamiento (en términos de la métrica F1-score) de seis clasificadores cuando se agregan atributos sintéticos de tipo polinomial. El objetivo de los experimentos es verificar si la creación de atributos sintéticos ayuda a lograr un mejor desempeño en comparación con los atributos originales.

***Palabras clave**: Clasificador, Métricas de desempeño, Atributos sintéticos, MrMR.*

Abstract

The different complexities present in the data impair the performance of predictive models. Among the most common complexities in data are class imbalance, the presence of outliers, class overlap, and high dimensionality. One of the ways to deal with this problem is to create and add synthetic attributes to the data, in order to improve performance. In this article, a comparison is made of the behavior (in terms of the F1-score metric) of six classifiers when polynomial-type synthetic attributes are added. The objective of the experiments is to verify if the creation of synthetic attributes helps to achieve better performance compared to the original attributes.

***Key words**: Classifier, Performance metrics, Synthetic attributes, MrMR.*

Introducción

Una de las tareas más importantes en minería de datos es la clasificación, la cual pertenece al tipo de aprendizaje supervisado. Existen varios métodos de clasificación, entre ellos se encuentran los árboles de decisión, máquinas de vectores soporte, redes neuronales, K-vecinos más cercanos y clasificador Bayesiano ingenuo. Cuando se aplican estos métodos de clasificación a un mismo conjunto de datos etiquetado, generalmente se obtienen resultados de desempeño diferente, es decir, para cada método de clasificación empleado sobre un mismo conjunto de datos, se presentan resultados diferentes dependiendo de las complejidades del modelo predictivo aplicado.

Entre los principales tipos complejidades que se pueden encontrar en datos etiquetados se pueden nombrar los siguientes [1]:

a) *Elevado número de instancias o muestras en el conjunto de datos*. Provoca que no se pueda cargar en memoria principal todo el conjunto de datos.
b) *Número muy reducido de muestras*. No existen suficientes muestras para generar modelos predictivos con buen desempeño.

c) *Alta dimensionalidad.* Cuando se tiene un elevado número de atributos, es posible que varios de ellos perjudiquen el desempeño de los modelos predictivos, debido a que son irrelevantes o redundantes.
d) *Traslape de clases*. El traslape de clases es un problema complejo, provoca que los clasificadores obtengan una tasa de error de predicción alta.
e) *Desbalance.* Sucede cuando hay un gran número de muestras de una clase, y una proporción significativamente más pequeña de otra clase.
f) *Casos anómalos*. Son muestras muy diferentes al resto, de acuerdo con algún criterio estadístico, esto puede hacer que los modelos predictivos se sesguen.

Estas complejidades dañan la exactitud de las predicciones de los clasificadores, por lo que se han diseñado estrategias orientadas a mejorar el desempeño de los métodos de clasificación, por ejemplo, la creación y adición de atributos sintéticos a los datos. Las máquinas de vectores de soporte (SVM) son uno de los algoritmos de clasificación y regresión más potentes y robustos en múltiples campos de aplicación; generan indirectamente una elevada cantidad de atributos, a través de funciones no lineales (llamadas funciones Kernel), para obtener un hiperplano de clasificación en un espacio de características de dimensión potencialmente infinita [2]. Otros métodos, como las redes neuronales totalmente conectadas, crean nuevos atributos a través de capas ocultas, mediante las salidas de funciones de activación que toman como argumentos los productos internos entre salidas de capas anteriores y los pesos sinápticos de la capa actual.

Las características sintéticas se generan a partir de los atributos existentes de manera implícita o explícita. Los métodos implícitos de generación de atributos sintéticos son efectivos para reducir los efectos de la complejidad de los datos sobre el desempeño de los clasificadores, aunque en otro sentido, tienen un funcionamiento menos comprensible para los humanos. La generación explícita de atributos sintéticos se realiza mediante operaciones entre atributos, como las sumas, productos, potencias y algoritmos. Este tipo de métodos considera la importancia de los atributos y descarta los atributos irrelevantes, con el objetivo de conocer explícitamente las transformaciones realizadas a los datos, sin embargo, el costo computacional puede llegar a ser elevado [3].

En este artículo se realiza un estudio exploratorio sobre el efecto que tiene la generación y adición de atributos sintéticos de tipo polinomial sobre el desempeño de seis métodos de clasificación muy conocidos. Para validar los resultados, se usan seis conjuntos de datos disponibles públicamente en internet. La metodología propuesta en el artículo consta de tres secciones. La primera de ellas describe las métricas más populares para evaluar el desempeño de clasificadores; la segunda sección menciona la metodología empleada y aplicada en esta investigación. Finalmente, se muestran los resultados tres experimentos aplicados a seis conjuntos de datos, con la finalidad de conocer si el uso se atributos sintéticos favorecen o no a los modelos predictivos.

Antecedentes

Métricas de desempeño de clasificadores

La tarea de clasificación en aprendizaje automático es ampliamente usada en problemas de diversas áreas, para poder aplicar un clasificador en ambientes reales, es necesario medir su desempeño en ambientes realistas. La técnica empleada comúnmente para validar los resultados consiste en usar dos tipos de muestras. El primer conjunto de datos etiquetados (*datos de entrenamiento)*, es para generar un modelo predictivo (el clasificador propiamente), el segundo conjunto *(datos de prueba)*, sirve para evaluar las predicciones realizadas por el clasificador; usualmente se utiliza un 80% de los datos para entrenamiento, y el 20% de los datos para pruebas.

Para medir la calidad de las predicciones de un clasificador, existe una variedad de métricas, la mayoría de ellas se obtienen de las estadísticas condensadas en una matriz confusión, cuya estructura general se muestra en la Figura 1 [4].

	Predicción positiva	**Predicción negativa**
Clase positiva	Verdaderos positivos (VP)	Falsos negativos (FN)
Clase negativa	Falsos positivos (FP)	Verdaderos negativos (VN)

Figura 1. Matriz de confusión para clasificación binaria.

Las matrices de confusión se pueden extender al número de clases que contenga el conjunto de datos. Con base en ella, se definen métricas de desempeño de un modelo predictivo como la exactitud, la precisión, la exhaustividad y F1-score.

La exactitud se calcula dividiendo la cantidad de predicciones correctas por el total de los datos [5]. Así mismo, la tasa de error mide los errores que el clasificador comete [4]. La forma de calcular estas métricas se muestra en la ecuación (1):

$$Exactitud = \frac{VP\#VN}{VP\#FN\#FP\#VN} \qquad Tasa\ de\ error = \frac{FP\#FN}{VP\#FN\#FP\#VN} \quad (1)$$

La precisión (ecuación 2) es una métrica caracterizada por utilizar las predicciones positivas realizadas, está dada por un cociente que toma en cuenta el número de predicciones positivas y el total de todas las predicciones positivas [4].

$$Precisión = \frac{Verdaderos\ positivos}{Verdaderos\ positivos\#Falsos\ positivos} \quad (2)$$

La métrica de exhaustividad tiene como objetivo principal, minimizar los falsos negativos, es decir, obtener un porcentaje de las predicciones positivas realizadas en relación con el total de predicciones positivas que posiblemente se realizaron [4], la ecuación (3) muestra la forma de calcular la exhaustividad.

$$Exhaustividad = \frac{VerdaderosPositivos}{VerdaderosPositivos\#Falsos\ \ Ne2ativos} \quad (3)$$

Para el cálculo de F-measure (o F1-score) se usa una media armónica, donde el numerador es el producto de la precisión y la exhaustividad multiplicada por dos, mientras que le denominador consta de la suma entre la precisión y la exhaustividad (ver ecuación (4)). Al usar los porcentajes de la precisión y la exhaustividad permite simplificar en un solo valor el rendimiento del clasificador [6].

$$F - measure = \frac{3 \times Precisión \times Ex:austividad}{Precisión\#Ex:austividad} \quad (4)$$

Generación de atributos sintéticos polinomiales

Los atributos sintéticos son la creación de nuevas características artificiales, basándose en los datos reales. El propósito principal de agregar este tipo de atributos a los datos es mejorar la calidad del modelo de clasificación [7]. Existen diversas maneras de generar atributos sintéticos a partir de los atributos presentes en un conjunto de datos. En este trabajo, inspirados en el kernel polinomial de las SVM (ver ecuación (5)), se eligió la utilización de formas polinómicas.

$$K(x, y) = (x^T y + c)^d \quad (5)$$

Los atributos sintéticos que se generan tienen la forma mostrada en la ecuación (6):

$$a^{<} = \prod_{i}^{i \in C} x_i \quad (6)$$

Donde

a^j: es el atributo sintético j

$x^{\$}$: es el atributo i-ésimo del conjunto de datos

C: es una de las $\frac{(n \cdot Q k)!}{(n \cdot Q!k!}$ posibles combinaciones (sin reemplazo), siendo n los mejores atributos y k el grado del polinomio.

Por ejemplo, si un conjunto de datos tiene tres atributos ($x_{(}$, x_2, x_3), y $k = 2$, entonces los atributos sintéticos generados serían $x_{(}x_{(}$, x_2x_2, x_3x_3, $x_{(}x_2$, $x_{(}x_3$, x_2x_3. Es importante aclarar, que solo se consideran atributos de tipo numérico entero o real. Debido a que la cantidad de atributos generados mediante la ecuación (6) puede llegar a ser muy grande, se aplica una técnica de selección de atributos.

Selección de atributos con MrMR

La selección de atributos con MrMR (Mínima redundancia – Máxima Relevancia) es un método reciente, que ha demostrado su efectividad. Este método permite seleccionar las características de un conjunto de datos que tienen mayor poder para discriminar entre clases, y simultáneamente, reduce la redundancia de los atributos [8]. En cada iteración MrMR evalúa el atributo f mediante el cociente mostrado en la ecuación (7).

$$score_{\mathrm{i}}(f) = \frac{relevance(@\ |tar2et)}{redundancy(@\ |\ @eatures\ selected\ until\ \mathrm{i{-}E})} \quad (6)$$

La relevancia del atributo f se calcula mediante la dependencia estadística que cada atributo tiene con la clase [9]. La redundancia es con respecto a las características ya elegidas hasta el paso i-ésimo de MrMR.

Metodología

Conjunto de datos

La Tabla 1 muestra un resumen de los conjuntos de datos usados en los experimentos. Todos estos datos se encuentran disponibles públicamente en internet [10].

Tabla 1. Resumen de los conjuntos de datos usados en los experimentos.

Conjunto de datos	Total de muestras	Total de atributos	Clases
cmc	1473	9	3
dermatology	366	34	6
ecoli	336	8	8
glass	214	9	7
haberman	306	3	2
raisin shuttle	14500	9	7

La Figura 1 muestra un resumen gráfico de la metodología empleada en este artículo. La estructura principal consiste en cuatro bloques, explicados a continuación.

El primer paso denominado ‘preparación’, corresponde a la lectura de los datos. En esta etapa se separan los atributos de las clases, además se implementa un filtro que tiene como objetivo seleccionar los atributos de tipo numérico (enteros o reales), y eliminar a los que no son numéricos, como nominales, categóricos u ordinales.

Experimento I: Desempeño de clasificadores con todos los atributos

En este paso, se separa pseudo-aleatoriamente el conjunto de datos, analizado en dos subconjuntos disjuntos: el primer subconjunto corresponde al de entrenamiento (80% de los datos) y el segundo subconjunto al de prueba (20% restante). El conjunto de datos de entrenamiento (X_{train}, Y_{train}) es usado para generar un modelo predictivo o clasificador, mientras que el de prueba (X_{test}, Y_{test}) es empleado para calcular la precisión, exhaustividad y F1-score del modelo. La finalidad de calcular el desempeño de cada clasificador usando todos los atributos numéricos es para compararlo con el conjunto de datos con los atributos sintéticos añadidos. Es importante mencionar que los desempeños se reportan considerando 30 repeticiones de cada experimento, usando los mismos datos en todos ellos, pero seleccionado muestras diferentes en cada repetición.

Experimento II: Desempeño de clasificadores con atributos seleccionados con MrMR

En el segundo experimento se seleccionan los k mejores atributos del conjunto de datos de entrenamiento con MrMR. Esos mismos atributos son elegidos del conjunto de datos de prueba. Posteriormente, se genera un modelo predictivo y se evalúa su desempeño. El propósito de este experimento es inspeccionar el efecto de MrMR sobre el desempeño del clasificador.

Experimento III: Desempeño de clasificadores con atributos sintéticos añadidos

En este experimento, se generan atributos sintéticos a partir de los mejores atributos seleccionados en el experimento II. Como se mencionó anteriormente, los atributos sintéticos generados son polinomiales, es decir, productos de variables numéricas presentes en el conjunto de datos original. En este experimento la carga computacional es elevada, debido a que la cantidad de atributos generados es muy grande. Para evitar el consumo excesivo de memoria, se decidió aplicar MrMR a los atributos sintéticos. De esta manera, se generan modelos predictivos usando los atributos originales y los sintéticos más relevantes.

Almacenamiento de resultados

En la fase de almacenamiento se reestructuran todos los datos obtenidos por cada prueba. Los resultados reportados son la media y desviación estándar de la precisión, exhaustividad y F1-score de los 30 experimentos.

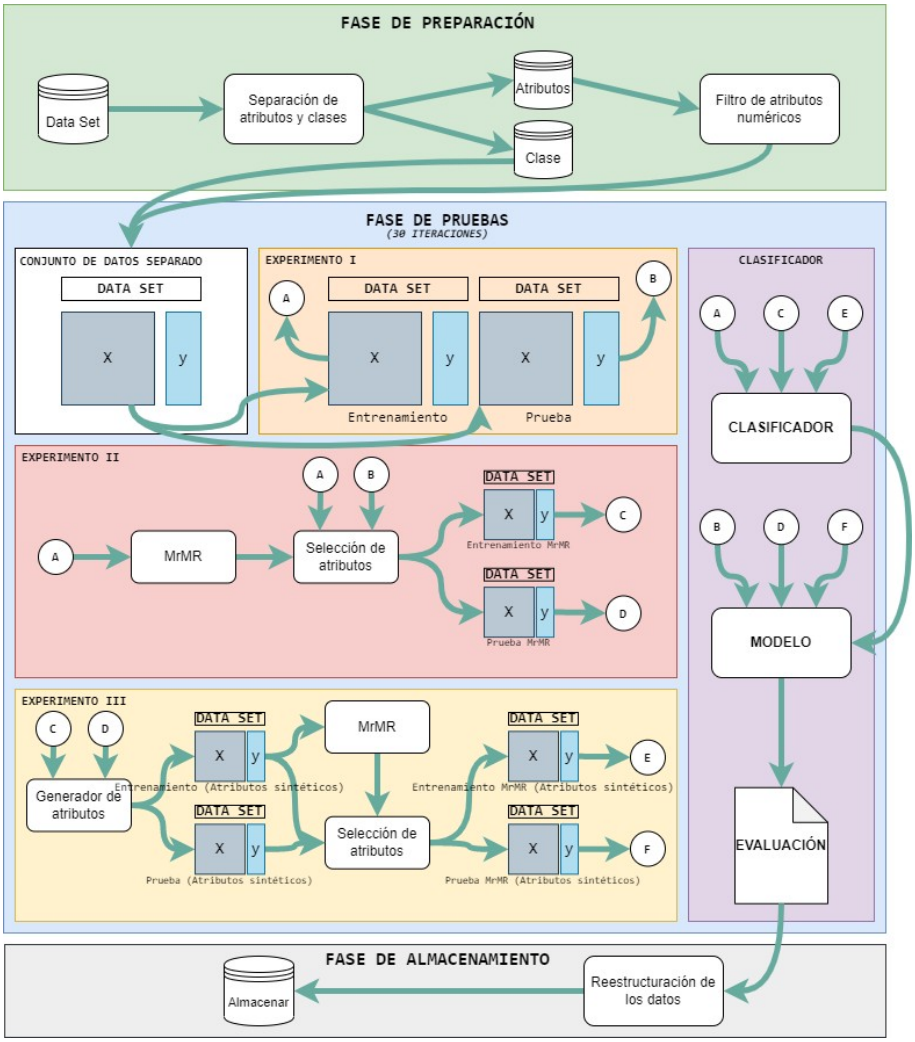


Figura 3. Diagrama representativo del funcionamiento del algoritmo de un modelo de clasificación. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Se midieron los desempeños de los clasificadores K-NN, regresión logística, árbol de decisión, SVM, perceptrón multicapa (MLPC) y Naive Bayes con cada uno de los conjuntos de datos, para cada experimento. Debido a la gran cantidad de datos generados, se decidió mostrar solamente el valor de F1-score. Para cada experimento, se ajustaron los principales parámetros de cada clasificador aplicando el método de búsqueda exhaustiva por rejilla. Todos los experimentos fueron ejecutados en una computadora.

Resultados Experimento I

La tabla 2 muestra los valores de F1-score, precisión y exhaustividad para cada conjunto de datos.

Tabla 2. Desempeños de clasificadores (F1-score/STD) con todos los atributos

Conjunto de datos	KNN	SVM	Logistic Regression	Decision Tree	Naive Bayes	Neural Network
cmc	0.47/0.02	0.50/0.02	0.51/0.02	0.49/0.01	0.48/0.02	0.50/0.03
dermatology	0.97/0.02	0.98/0.02	0.98/0.02	0.96/0.03	0.88/0.02	0.94/0.02
ecoli	0.70/0.03	0.88/0.02	0.86/0.02	0.79/0.04	0.80/0.04	0.70/0.03
glass	0.60/0.03	0.58/0.07	0.51/0.06	0.64/0.03	0.26/0.10	0.56/0.06
haberman	0.67/0.02	0.66/0.03	0.67/0.02	0.70/0.04	0.72/0.05	0.66/0.04
raisin shuttle	1.00/0.00	0.99/0.00	0.95/0.00	1.00/0.00	0.92/0.01	0.99/0.01

En los conjuntos de datos cmc, glass y ecoli es donde se observa que los clasificadores alcanzan un bajo desempeño. Por otra parte, el conjunto de datos raisin_shuttle es en el cual los clasificadores presentan un mayor valor de F1-score.

Resultados Experimento II

Las tablas 3a presenta los desempeños de los métodos de clasificación analizados. Se observa que, para 15 casos, se mejoró el desempeño ligeramente.

Tabla 3a. Desempeños de clasificadores (F1-score/STD) con selección de atributos

Conjunto de datos	KNN	SVM	Logistic Regression	Decision Tree	Naive Bayes	Neural Network
cmc	0.46/0.02	0.52/0.03	0.52/0.02	0.43/0.02	0.51/0.02	0.52/0.03
dermatology	0.98/0.01	0.98/0.02	0.98/0.01	0.95/0.01	0.82/0.05	0.95/0.04
ecoli	0.86/0.03	0.87/0.03	0.88/0.03	0.80/0.04	0.76/0.07	0.71/0.05
glass	0.67/0.06	0.60/0.02	0.58/0.03	0.63/0.05	0.47/0.11	0.69/0.06
haberman	0.68/0.04	0.70/0.04	0.68/0.05	0.74/0.04	0.72/0.03	0.65/0.02
raisin shuttle	1.00/0.00	0.98/0.00	0.93/0.00	1.00/0.00	0.94/0.00	0.99/0.01

La tabla 3b muestra los mejores parámetros encontrados para cada método de clasificación. En la primera columna se muestra la cantidad de atributos seleccionados en cada conjunto de datos.

Tabla 3b. Parámetros de los clasificadores con selección de atributos

Conjunto de datos Atributos Seleccionados	KNN	SVM	Logistic Regression	Decisión Tree	Neural Network
cmc MrMR:9	K: 13	C: 5, degree:3, kernel: poly	C: 10	criterion: entropy	activation: relu
dermatology MrMR: 24	K: 13	C: 1, degree: 4, kernel: poly	C: 1	criterion: entropy	activation: relu
Ecoli MrMR: 5	K: 7	C: 10, gamma: auto, kernel: sigmoid	C:10	criterion: gini	activation: tanh
glass MrMR: 5	K: 3	C: 10, degree: 2, kernel: poly	C: 10	criterion: entropy	activation: identity
haberman MrMR: 1	K: 11	C: 10, gamma: auto, kernel: sigmoid	C: 0.01	criterion: gini	activation: logistic

raisin shuttle MrMR: 3	K: 3	C: 100, degree: 4, kernel: poly	C: 10	criterion: gini	activation: relu
cmc MrMR:9	K: 13	C: 5, degree:3, kernel: poly	C: 10	criterion: entropy	activation: relu

Resultados Experimento III

Tabla 4a. Desempeños de clasificadores (F1-score/STD) con selección y generación de atributos sintéticos polinomiales

Conjunto de datos	KNN	SVM	Logistic Regression	Decision Tree	Naive Bayes	Neural Network
cmc	0.48/0.02	0.52/0.03	0.54/0.03	0.44/0.04	0.49/0.03	0.54/0.02
dermatology	0.94/0.03	0.95/0.03	0.94/0.03	0.91/0.02	0.83/0.03	0.95/0.04
ecoli	0.73/0.03	0.71/0.04	0.69/0.04	0.71/0.02	0.76/0.02	0.71/0.04
glass	0.94/0.02	0.87/0.03	0.75/0.03	0.98/0.02	0.96/0.01	0.73/0.03
haberman	0.73/0.05	0.67/0.03	0.66/0.03	0.64/0.03	0.71/0.04	0.67/0.03
raisin shuttle	1.00/0.00	0.93/0.00	0.90/0.00	1.00/0.00	0.94/0.00	0.99/0.01

La tabla 3b muestra los mejores parámetros encontrados para cada método de clasificación. En la primera columna se muestra la cantidad de atributos seleccionados en cada conjunto de datos, y el grado polinomial de los atributos sintéticos.

Tabla 4b. Parámetros de los clasificadores con selección y generación de atributos sintéticos polinomiales.

Conjunto de datos Atributos Seleccionados	KNN	SVM	Logistic Regression	Decisión Tree	Neural Network
cmc MrMR: 9 Polinomio: 6	K: 17	C': 100, 'gamma': 0.01, 'kernel': 'sigmoid	C: 1	criterion: entropy	activation: identity
dermatology MrMR: 20 Polinomio: 1	K: 7	C: 100, gamma: 0.01, kernel: sigmoid	C: 1	criterion: gini	activation: relu
Ecoli MrMR: 8 Polinomio: 2	K:11	C: 10, gamma: 1, kernel: sigmoid	C: 10	criterion: entropy	activation: identity
glass MrMR: 2 Polinomio: 2	K: 3	C: 100, gamma: 0.1, kernel: sigmoid	C: 10	criterion: entropy	activation: identity
haberman MrMR: 2 Polinomio: 2	K: 7	C: 100, gamma: 0.1, kernel: sigmoid	C: 10	criterion: gini	activation: logistic
raisin shuttle MrMR: 2 Polinomio: 2	K: 3	C: 100, degree: 5, kernel: poly	C: 10	criterion: gini	activation: relu

Discusión

Con base en los resultados obtenidos, se observa lo siguiente:

- La metodología propuesta es correcta y adecuada para evaluar el efecto de nuevos atributos agregados a los datos, ya que permite evaluar de manera objetiva si estos atributos logran contribuir a enfrentar las complejidades en los datos, mediante la medición del desempeño de los métodos de clasificación.
- La adición de atributos sintéticos polinomiales tiene un efecto positivo (aunque pequeño) sobre el desempeño de los clasificadores con los conjuntos de datos analizados.
- La técnica de selección de atributos por sí misma, también tuvo un efecto positivo y pequeño, ya que los valores de F1-score mejoraron un poco en algunos casos, pero no fue así en la mayoría.

Por lo tanto, se sugiere lo siguiente:

- Considerar la metodología propuesta como una referencia evaluar el efecto de la adición de atributos sintéticos a los datos sobre el desempeño de métodos de clasificación.
- Proponer otros tipos de atributos sintéticos, por ejemplo, con funciones exponenciales, trigonométricas o combinación de varias funciones no lineales.

Trabajo a futuro

Gracias a los resultados obtenidos en este artículo, se plantea la necesidad de continuar realizando pruebas con otros tipos de atributos sintéticos, para enfrentar de mejor manera las complejidades que se pueden encontrar en datos etiquetados. Se tiene planeado el uso de un algoritmo evolutivo para la generación de atributos sintéticos.

Conclusiones

Las complejidades de los datos degradan el desempeño de los métodos de aprendizaje supervisado. Una forma de enfrentar este problema es la generación de atributos sintéticos a los datos. En este artículo se analizó el desempeño de seis métodos de clasificación cuando se agregan atributos sintéticos.

Se realizaron experimentos para evaluar mediante la métrica F1-score, si la adición de atributos sintéticos de tipo polinomial puede ayudar a lograr un mejor desempeño en los clasificadores: SVM, Árbol de decisión, Regresión logística, Naive Bayes, clasificador K-NN y red neuronal multicapa. Además, se combinó este enfoque con la técnica de selección de atributos MrMR, para reducir la dimensionalidad mediante la eliminación de los atributos menos relevantes. Analizando los resultados se encontró que, en algunos conjuntos de datos, los clasificadores tienen un desempeño alto; con la selección y la adición de atributos sintéticos polinomiales se incrementa un poco el valor de F1-score. Así mismo, en los conjuntos de datos donde los clasificadores alcanzan valores bajos, la mejora en el desempeño de los clasificadores no es alta. Se requieren más estudios para determinar si es posible generar atributos de otro tipo que ayuden a lograr un mejor tratamiento a las complejidades presentes en los datos.

El código en Python desarrollando a lo largo de esta investigación se encuentra públicamente disponible en la siguiente liga: https://github.com/arthurp215/Clasificador-Polinomial-MrMR.git.

Referencias

[1] A. C. Lorena, A. I. Maciel, P. B. C. de Miranda, I. G. Costa, and R. B. C. Prudêncio, “Data complexity meta-features for regression problems,” *Mach Learn*, vol. 107, no. 1, pp. 209–246, Jan. 2018, doi: 10.1007/s10994-017-5681-1.

[2] J. Cervantes, F. Garcia-Lamont, L. Rodríguez-Mazahua, and A. Lopez, “A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends,” *Neurocomputing*, 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.118.

[3] S. Xiang, Y. Fu, G. You, and T. Liu, “Attribute analysis with synthetic dataset for person re-identification,” Jun. 2020, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2006.07139

[4] J. Brownlee, “Imbalanced Classification with Python Choose Better Metrics, Balance Skewed Classes, and Apply Cost-Sensitive Learning,” 2020.

[5] A. J. Larner, *The 2x2 Matrix*. Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-74920-0.
[6] H. Dalianis, *Clinical text mining: Secondary use of electronic patient records*. Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-78503-5.
[7] A. H. Alsaffar, "Empirical study on the effect of using synthetic attributes on classification algorithms," *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, vol. 10, no. 2, pp. 111–129, 2017, doi: 10.1108/IJICC-08-2016-0029.
[8] Mazzanti Samuele, "'MRMR' Explained Exactly How You Wished Someone Explained to You | by Samuele Mazzanti | Towards Data Science," Feb. 12, 2021. https://towardsdatascience.com/mrmr-explained-exactly-how-you-wished-someone-explained-to-you-9cf4ed27458b (accessed Jul. 15, 2022).
[9] M. Billah and S. Waheed, "Minimum redundancy maximum relevance (mRMR) based feature selection from endoscopic images for automatic gastrointestinal polyp detection," *Multimed Tools Appl*, vol. 79, no. 33–34, pp. 23633–23643, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11042-020-09151-7.
[10] D. Dua and C. Graff, "UCI Machine Learning Repository." 2017. [Online]. Available: http://archive.ics.uci.edu/ml

Software para la clasificación y conteo de vehículos en autopistas basado en aprendizaje automático y visión artificial

E. Vázquez Benito[1], C. Murrieta Vázquez[2], P. Ochoa Trujillo[3]*
[1] Academia de Maestría en Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Fracción I y II S/N, Aire Libre, Teziutlán, Puebla. México.
emmanuel.vb@teziutlan.tecnm.mx
[2] Programa académico de Maestría en Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Fracción I y II S/N, Aire Libre, Teziutlán, Puebla. México.
19TE0009P@teziutlan.tecnm.mx
[3] Academia de Ingeniería Informática, Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Fracción I y II S/N, Aire Libre, Teziutlán, Puebla. México.
patricia.ot@teziutlan.tecnm.mx

***Área de participación**: Sistemas Computacionales*

Resumen

El presente artículo describe el desarrollo del software para el conteo y clasificación de vehículos para autopistas en México, mediante el reconocimiento de imágenes utilizando visión artificial y machine learning; para el conteo de vehículos se utilizó la detección de contornos y el método de substracción de fondo; para la clasificación se hace uso de detección de características tipo Haar, así como el algoritmo de Viola-Jones, Haar cascade, el desarrollo de la aplicación se consiguió utilizando la metodología OOHDM. Las pruebas se realizaron en el entronque de la Autopista Cardel-Poza Rica y la autopista Gutiérrez Zamora-Tihuatlán.

Con el uso de reconocimiento de imágenes para identificar y contar vehículos, se reduce el número de dispositivos que actualmente conforman un sistema aforador o de clasificación vehicular, mejorando su efectividad y desempeño. Actualmente esta tecnología, solo es aplicada para monitoreo de tráfico, detección de filas y sistemas inteligentes de transporte.

***Palabras clave**: machine learning, visión artificial, clasificación, vehículos*

Abstract

This article describes the development of software for counting and classifying vehicles for highways in Mexico, through image recognition using artificial vision and machine learning; contour detection and the background subtraction method were used for counting vehicles; For the classification, detection of Haar-type characteristics is used, as well as the Viola-Jones algorithm, Haar cascade, the development of the application was achieved using the OOHDM methodology. The tests were carried out at the junction of the Cardel-Poza Rica Highway and the Gutiérrez Zamora-Tihuatlán Highway.

With the use of image recognition to identify and count vehicles, the number of devices that currently make up a gauge or vehicle classification system is reduced, improving its effectiveness and performance. Currently this technology is only applied for traffic monitoring, queue detection and intelligent transport systems.

***Key words**: machine learning, artificial vision, classification, vehicles*

Introducción

Los sistemas de peaje en México utilizan en su mayoría sensores mecánicos incrustados en la superficie de rodamiento de los vehículos, para la clasificación y detección vehicular, el sobrepeso de los vehículos de carga a pesar de estar normado, es el principal responsable del deterioro de los mismos, en el mercado actual no existe una tecnología de reconocimiento de imágenes que sea precisa lo que incentiva la investigación publicada en el presente artículo.

En México, la tarificación para el cobro del peaje de un vehículo está basada en el número y tipo de ejes, los porcentajes de clasificación con los que deben cumplir los índices de desempeño en un sistema aforador son los siguientes: para motocicletas el porcentaje de desempeño debe ser mayor al 95%, para automóviles y camionetas con o sin remolque debe ser mayor a 97% en el caso de camiones rígidos debe ser mayor al 98% y para camiones articulados mayor al 99%.

En la plaza de cobro Totomoxtle II, perteneciente a la autopista Cardel – Poza Rica y la autopista Gutiérrez Zamora-Tihuatlán en el Estado de Veracruz, se utiliza un sistema aforador que muestra una baja eficiencia en la clasificación y conteo de vehículos, dicho sistema presenta fallas operativas y un alto porcentaje de errores, que lo ponen por debajo de los índices de desempeño requeridos en un sistema aforador, el mantenimiento correctivo al sistema de clasificación vehicular representa el cierre parcial de uno de los dos carriles de la autopista, provocando retrasos en el recorrido a los usuarios, además de la afectación a la superficie de rodamiento por la instalación de estructuras y ductos colocados en el piso que soportan a los sensores y el cableado. Por lo anterior se propone usar una tecnología opcional basada en visión artificial y aprendiazaje automático que pueda integrarse como parte de un sistema de peaje que ya exista en el mercado y que se usa en casetas de peaje en México, que sea menos costosa en su implementación y mantenimiento, disminuyendo la infraestructura que hoy se utiliza.

La visión artificial también conocida como visión por computador (del inglés Computer Vision) incluye métodos para procesar, analizar y extraer información de imágenes o frames de videos, con el propósito de generar información a partir de representaciones numéricas. La visión por computador pretende reproducir el funcionamiento de la vista humana utilizando computadoras para el análisis de imágenes o videos obtenidos por medio de cámaras u otros dispositivos. (Barriga, 2017).

El aprendizaje automático o *Machine Learning*, es una rama de la inteligencia artificial que crea sistemas que aprenden de manera automática y que les permite a estos, aprender de los datos que recolectan. También permite entrenar modelos con los conjuntos de datos, sin tener que ser programados de manera explícita.

Para el desarrollo del software del presente artículo se hizo uso de Open CV, que es una biblioteca de visión por Computadora y aprendizaje automático de código libre que se usa para para el manejo de imágenes y detección de objetos. El lenguaje de programación aplicado es Phyton haciendo uso de la función findContours() y drawContours() para dibujar contornos en imágenes previamente binarizadas. Se utilizó el método HaarCascade con OpenCV, para realizar la clasificación de vehículos; para el conteo aplicando la substracción de fondo y detección de contornos, se consideró el número de pixeles que cambian dentro del área de interés definida, y que corresponde a la zona por donde cruzan los vehículos de la autopista.

Metodología

Tipo de investigación

El tipo de investigación en el presente trabajo es del tipo cuantitativo, el diseño de la investigación que se presenta es del tipo no experimental, se realizó un análisis transversal, la elección de este tipo de investigación se basa principalmente en que se requiere medir el porcentaje de error en cuanto a la clasificación y conteo de vehículos.

Selección de la muestra

El tipo de muestra es del tipo probabilística aleatoria.

Unidad de muestra

Las unidades de análisis son 744 vehículos que en promedio transitan entre las autopistas “Cardel-Poza Rica” y “Tihuatlán-Gtz. Zamora”, durante un período de 3 horas.

Identificación de variables

Las características para considerar el análisis de unidades de muestreo son: clase vehicular, dimensiones de las llantas, número de ejes y tipo de ejes. Se debe incluir el sentido de tránsito, dirección (origen-destino), cuerpo del carril, hora y fecha del vehículo analizado.

Instrumentos y técnicas.

El instrumento de medición es por observación sistemática regulada, se realizaron muestreos de vehículos mediante la aplicación desarrollada a las imágenes obtenidas en tiempo real de una cámara IP instalada en la autopista.
Un sistema de medición de aforo vehicular debe cumplir con el siguiente cálculo del porcentaje de error, de acuerdo con la norma de SCT:
Precisión en la clasificación requerido ≥ 99.5% (mayor o igual a noventa y nueve punto cinco por ciento), es decir Pclreq= 99.5%
Precisión en la clasificación mínimo ≥ 95.0% (mayor o igual a noventa y cinco punto cero por ciento), es decir Pclmin = 95.0%

$$Pcl_c < Pcl_{min} = DC_{\%inc(clasif)} = 1$$

$$Pcl_c \geq Pcl_{req} = DC_{\%inc(clasif)} = 0$$

$$Pcl_{min} \leq Pcl_c < Pcl_{req} = 1 - \frac{Pcl_c - Pcl_{min}}{Pcl_{req} - Pcl_c}$$

Desarrollo del sofware

El diseño del software se llevó a cabo con el uso de OOHDM por sus siglas en inglés *Object Oriented Hipermedia Design Method* que es una metodología de diseño hipermedia orientada a objetos, define las etapas de:

1. Obtención de requerimientos. Casos de uso.
2. Diseño conceptual.
3. Diseño navegacional.
4. Interfaces abstractas.
5. Implementación.

En las Ilustraciones 1,2,3 y 4 muestran los artefactos resultantes del seguimiento de la metodología OOHDM, en esta etapa se determinó como actor a la aplicación “Aforador vehicular inteligente”, debido a que es el responsable de la detección y clasificación vehicular.

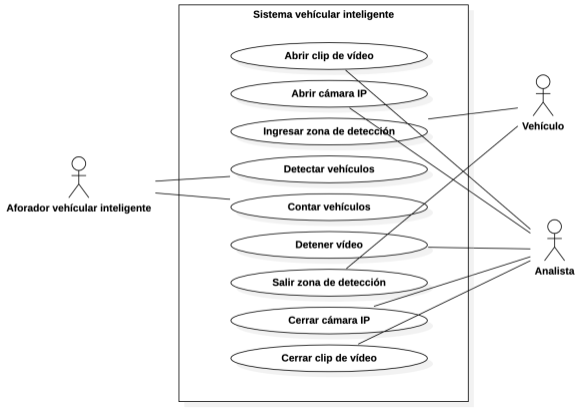


Ilustración 1. Etapa uno de OOHDM, obtención de requerimientos, diagrama de casos de uso general del sistema vehicular inteligente.

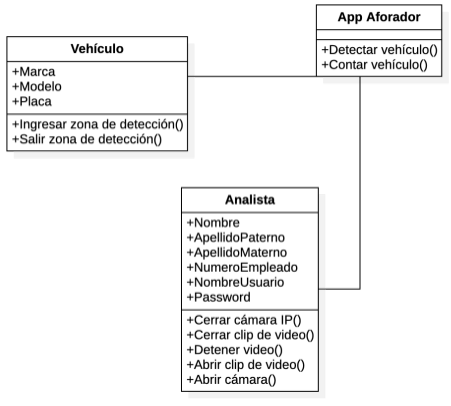


Ilustración 2. Etapa dos de OOHDM, diseño conceptual del sistema vehicular inteligente

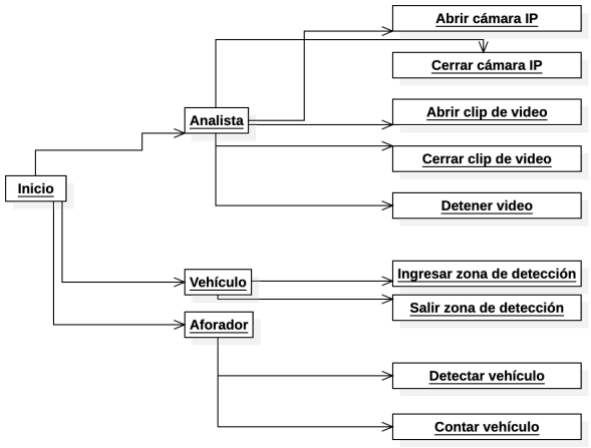


Ilustración 3. Etapa tres de OOHDM, diseño navegacional del sistema vehicular inteligente.

Como se observa en la Ilustracion 4, se cuenta con una sola pantalla, desde la que se abrirá el video, ya sea desde un archivo de video o directo de una cámara IP y con la que interactua el usuario.

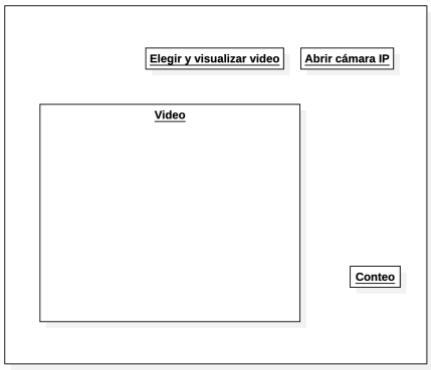


Ilustración 4. Etapa cuatro de OOHDM, diseño de interfaces abstractas.

La implementación es la etapa cinco de la metodología OOHDM, como resultado se obtuvo el siguiente software al que se le llamó “Aforador Vehicular Inteligente” que se muestra en la Ilustración 5.

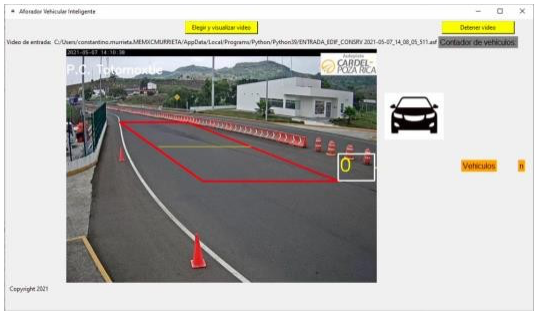


Ilustración 5. Área de detección de vehículos redimensionada

Detección de contornos

Se hace uso de Open CV, que es una biblioteca de visión por computadora y machine learning de código abierto, útil para el manejo de imágenes, puede trabajar en conjunto con distintos lenguajes de programación, Open CV es utilizada sobre imágenes previamente binarizadas, para obtener los contornos se hace uso de la función findContours() y para dibujarlos drawContours().

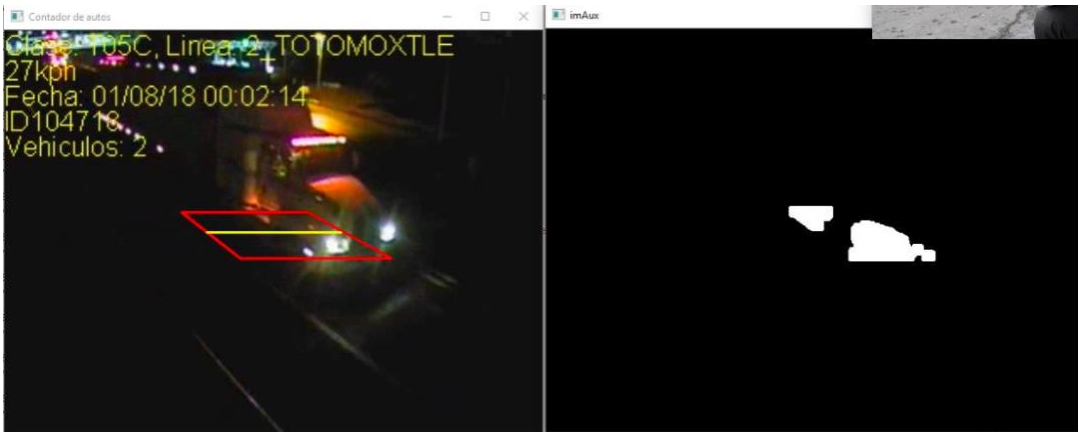


Ilustración 6. Detección de contornos aplicado en el software.

Substracción de fondos

Este método consiste en comparar las imágenes o fotogramas de un video con una imagen de fondo o de referencia, obtenidas de una cámara fija. De esta característica de donde proviene el nombre, también conocida como background subtraction. Los cambios en los elementos detectados representan objetos en movimiento. En 2010, este algoritmo fue utilizado en un trabajo previo para detectar y rastrear vehículos por Nicholas A. Mandellos, obteniendo resultados positivos.

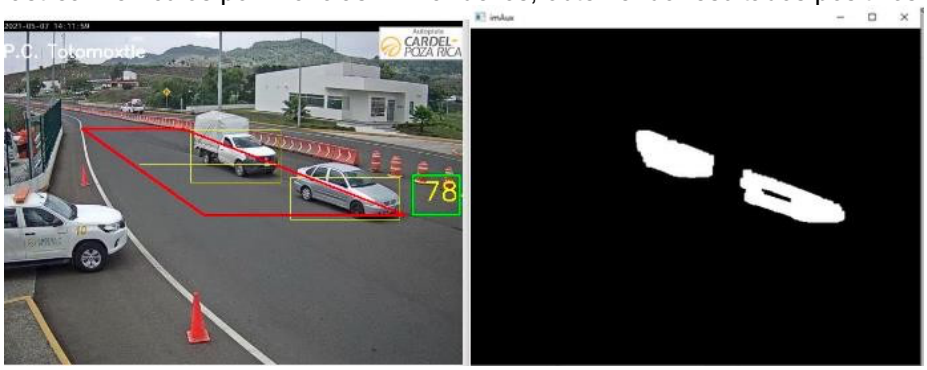


Ilustración 7. Imágenes obtenidas con la aplicación propuesta utilizando el método de substracción de fondo.

HaarCascade

Para la clasificación de los vehículos se utilizó la clase CascadeClasifier de OpenCV. En 2001, Paul Viola y Michael Jones desarrollaron un método utilizando un enfoque de aprendizaje automático (machine learning) para la detección visual de objetos capaz de procesar objetos extremadamente rápidos y logrando una alta tasa de detección para la detección de rostros en una imagen.

El algoritmo se creó para la detección de rostros, hace uso de clasificadores que se agrupan de manera sucesiva y responden a un conjunto de características fundamentales que son: a) la imagen integral, para la representación de una imagen; b) un algoritmo de aprendizaje basado en Adaboost (Adaptative boosting), (Viola-Jones, 2001) que propone construir a una serie de clasificadores base, c) la creación de las estructuras a partir de los clasificadores, que combina en cascada de grupos de clasificación más complejos es decir con un mayor número de características (Viola-Jones, 2001).

Conteo de vehículos

Se realizó un programa que, utilizando las técnicas de manejo de imágenes, para la detección de objetos, usando la substracción de fondo y detección de contornos, considere el número de pixeles que cambian dentro del área de interés definida, y que corresponde a la zona por donde cruzan los vehículos de la autopista.

Las primeras pruebas se realizaron, dibujando un polígono dentro del archivo de video, para posteriormente ejecutarlo dentro de la interfaz.



Ilustración 8. Funcionalidad de conteo vehicular.

Resultados y discusión

Una vez realizado el conteo vehicular, posteriormente el desarrollo del prototipo encamina al almacenamiento de la información obtenida en una base de datos, que pueda ser consultada mediante una aplicación web, bajo el protocolo de internet, para ofrecer consultas vía remota.

De igual manera, utilizar las imágenes de video para entrenar una red neuronal para la clasificación de los vehículos.

Se puede mejorar la clasificación de los vehículos para otras categorías como autobuses, motos y camiones entrenando al clasificador usando la clase CascadeClasifier de OpenCV.

Selección de pruebas estadísticas

Las pruebas se realizaron durante un periodo de ocho horas, seleccionando el carril que tiene la dirección o sentido de tránsito Gtz-Zamora – Nautla, para la prueba de video en directo desde una cámara IP *Internet Protocol*, el análisis de las pruebas se realizó en tres días distintos, esto con el objetivo de probar en distintas condiciones de luz, el momento 1 **(M1)** se tomó la muestra en el horario de 8 a 9 hrs el día 23 de mayo del 2021, el momento 2 (**M2**) de 13 a 14 hrs del día 04 de junio 2021, y el tercer **(M3)** momento de 18 a 19 hrs el día 07 de junio.

Análisis del conteo vehicular.

Se realizó el aforo de manera visomanual en los videos para realizar la comparativa contra el conteo realizado de manera automática por la aplicación de reconocimiento de imágenes. Tomando como referencia las siguientes consideraciones, el resumen del análisis se muestra en la Tabla 2:

Verdadero Positivo: son los casos en que el objeto detectado es un vehículo real y la aplicación si lo contó correctamente.

Verdaderos Negativos: son los casos en que el objeto detectado no es un vehículo real o válido y la aplicación no lo consideró en el conteo.

Falso Positivo: son los casos en que el objeto detectado no es un vehículo y la aplicación si lo consideró en el conteo.

Falso Negativo: son los casos en que el objeto si es un vehículo real y la aplicación no lo consideró en el conteo.

Tabla 1. Aforo vehicular

Tipo de análisis de video	*Resultado*	*M1*	*M2*	*M3*
Manual	Vehículo	32	30	27
Manual	No Vehículo	3	3	6
Automático	Verdaderos positivos	24	20	22
Automático	Verdaderos negativos	0	3	1
Automático	Falsos positivos	0	7	0
Automático	Falsos negativos	8	10	9

Análisis de la clasificación vehicular

Verdadero Positivo: son los casos que pertenecen a la clase auto y la aplicación los detectó y clasificó como auto.
Verdaderos Negativos: son los casos que no pertenecen a la clase y el clasificador definió que no pertenecen a esa clase.
Falso Positivo: son los casos que no pertenecen a la clase, pero el clasificador los definió en esa clase.
Falso Negativo: son los casos que sí pertenecen a la clase y el clasificador no los definió en esa clase.

Tabla 2. Clasificación vehícular

Tipo de análisis de video	*Resultado*	*1*	*2*	*3*
Manual	Auto	21	20	24
Manual	No auto	10	11	4
Automático	Verdaderos positivos	21	15	20
Automático	Verdaderos negativos	10	7	6
Automático	Falsos positivos	5	10	3
Automático	Falsos negativos	0	5	5

Tabla 3. Porcentaje de error y de efectividad del sistema en el conteo vehicular.

Análisis de video	*M1*	*M2*	*M3*
Manual	32	30	27
Automático	24	20	22
Porcentaje de error	25	66.67	18.52
Porcentaje de efectividad	75	33.33	81.48

Tabla 4. Porcentaje de error y efectividad del sistema en la clasificación de autos.

Análisis de video	*M1*	*M2*	*M3*
Manual	21	20	24
Automático	21	15	20
Porcentaje de error	0	25	16.67
Porcentaje de efectividad	100	75	83.33

Considerando los valores de la Tabla 5, se obtiene el porcentaje de error en el conteo obtenido por la aplicación con respecto al conteo del aforo visomanual, realizado en el video, el cual consiste en el conteo visual por una persona.

Avm = Aforo vehicular visomanual
Ava = Aforo vehicular automático

$$\% \text{ error} = \frac{Avm - Ava}{Avm} * 100$$

Tabla 5. Porcentaje de error y efectividad del software.

Análisis de video	*M1*	*M2*	*M3*
Manual	32	30	27
Automático	24	20	22
Porcentaje de error	25	66.67	18.52
Porcentaje de efectividad	75	33.33	81.48

En la Tabla 6, se observa el porcentaje de efectividad, la propuesta al momento aún no cumple con los índices de desempeño que debe tener un sistema aforador, el porcentaje de efectividad se incrementa de acuerdo a las condiciones de luz, se observó que es necesaria el aumento de la capacidad de procesamiento en los equipos donde se implemente el software, así como la definición de la cámara IP a utilizar.

Trabajo a futuro

El uso de la aplicación para la clasificación y conteo de vehículos, puede mejorarse al utilizar la información obtenida para su posterior análisis y toma de decisiones, se pretende que la información pueda ser consultada mediante una aplicación web.
De igual manera, utilizar las imágenes de video para entrenar una red neuronal para la clasificación de los vehículos, se puede mejorar la clasificación de los vehículos para otras categorías como autobuses, motos y camiones entrenando al clasificador usando la clase CascadeClasifier de OpenCV.

Conclusiones

Se puede concluir que es posible el uso de visión artificial para el conteo y clasificación de vehículos; se observó también que para el conteo de vehículos utilizando la técnica de substracción de fondo y detección de contornos, en algunos conteos se obtuvieron lecturas falsas debido al reflejo de la luz de los faros de los vehículos en el agua.
Se encontró también que, en la noche, la detección de contornos se complica debido a los reflejos de luz, esto puede mejorarse si se configura la cámara en modo infrarrojo, para tener visión nocturna. Es posible obtener mejores resultados si la cámara se ubica de frente y por encima del paso de los vehículos en la autopista, mejorando el ángulo de visión, en el conteo de vehículos la velocidad del video es factor importante para que el conteo se pueda realizar de manera precisa. Se observó que los vehículos que pasaban a mayor velocidad no se contabilizaron.
El presente trabajo permite llegar a la conclusión que el uso de visión por computadora es una herramienta útil, con poca inversión en hardware, abaratando los costos de instalación y mantenimiento de un sistema de aforo vehicular.

Referencias

[1] Aristizábal, S. G., & Caro, A. S. (2018). Desarrollo de un semáforo portátil inteligente para el control del flujo vehicular. (p. 50). Instituto Tecnológico Metropolitano.
[2] Bas, E., Tekalp, A. M., & Salman, F. S. (2007). Automatic Vehicle Counting from Video for Traffic Flow Analysis. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 392–397.
[3] Barriga, E. R. C. (2017). Aplicación práctica de la visión artificial para el reconocimiento de rostros en una imagen. 60.
[4] Beltrán, J.C.(2014). Tecnologías inteligentes para salvar recursos energéticos. Ciudad de México ITS México.

[5] Chan, M.J. (2006). Sistema automático de conteo y clasificación de flujo vehicular basado en secuencias de video y redes neuronales artificiales. San Nicolás de los Garza, N.L.
[6] Enrique Urrego, Germán & Calderón, Francisco Carlos, & Forero, Alejandro & Quiroga, Julián Armando (2009). Adquisición de variables de tráfico vehicular usando visión Por computador. Revista de Ingeniería, (30), 7-15.
[7] Erhan Baş, A. Murat Tekalp, Fellow, IEEE, and F. Sibel Salman Automatic Vehicle Counting from Video for Traffic Flow Analysis. College of Engineering, Koç University, 34450 Sariyer, Istanbul, Turkey ISSN: 0121-4993.
[8] Esparza, J. E. M. (2014). Análisis de tráfico vehicular usando visión artificial en la ciudad de San Juan de Pasto. Universidad de Nariño.
[9] Granados, A.F. & Marín H.,J.I. (2007). Detección de flujo vehicular basado en visión artificial. Scientia et Technica ISSN 0122-1701, Vol. 3, No. 35, 3(35), 163-168. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4803620
[10] Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarrezaei, M., Rahimian Koloor, S. S., & Petrů, M. (2020). *A Review on Vehicle Classification and Potential Use of Smart Vehicle-Assisted Techniques*. Sensors, 20(11), 3274.
[11] P. Viola and M. Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features," Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, 2001, pp. I-I, doi: 10.1109/CVPR.2001.990517.

Adsorción del colorante naranja de metilo con un polímero metal-orgánico (MOF) de cobalto

Cecilia Rivera García[1], María Elizabeth Márquez López[1], Lidia Elena Chiñas Rojas[1], Rodolfo Peña Rodríguez[1], José María Rivera Villanueva[1].

[1]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana Prolongación Oriente 6, No. 1009, Colonia Rafael Alvarado, CP 94340 Orizaba, Veracruz, México.

[2]Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Universidad Autónoma de Yucatán C. 60 491A, Parque Santa Lucia, Centro, 97000 Mérida, Yucatán.

Área de participación: Ingeniería Química

Resumen

El presente trabajo es de carácter experimental, en el que se sintetizó un polímero metal-orgánica (MOF) para evaluar la capacidad de adsorción del colorante naranja de metilo. Este material se logró sintetizar a partir de dos ligantes orgánicos y nitrato de cobalto los cuales estuvieron en una solución de DMF. Esta reacción se llevó a cabo por el método solvotérmico. El polímero obtenido se denominó como MOF Azo-1 y se caracterizó a través de los métodos de difracción de rayos-x de polvos (DRX), análisis termogravimétrico (TGA), microanálisis elemental por EDS. Con los resultados obtenidos de las técnicas efectuadas, fue posible obtener la caracterización del polímero y de esta manera verificar que el colorante se encontraba en el MOF. Además, también se pudo evaluar la capacidad máxima de adsorción del colorante NM, así como determinar el grado de velocidad de la reacción.

Palabras clave*: Polímero Metal Orgánico, adsorción, naranja de metilo, contaminantes.*

Abstract

The present work is experimental in nature, in which a metal-organic polymer (MOF) was synthesized to evaluate the adsorption capacity of methyl orange dye. This material was synthesized from two organic binders and cobalt nitrate which were in a DMF solution. This reaction was carried out by the solvothermal method. The polymer obtained was named as MOF Azo-1 and was characterized by powder X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), elemental microanalysis by EDS. With the results obtained from the techniques carried out, it was possible to obtain the characterization of the polymer and thus verify that the dye was in the MOF. In addition, it was also possible to evaluate the maximum adsorption capacity of the NM dye, as well as to determine the degree of speed of the reaction.

Key words*: Metal Organic Polymer, adsorption, methyl orange, contaminants.*

Introducción

Los MOF (polímeros metal-orgánicos) son un tipo de materiales sólidos porosos y cristalinos, que están formados por ligandos orgánicos que poseen hetero átomos capaces de donar electrones y centros metálicos capaces de aceptar electrones y coordinarse. Existe la síntesis convencional que trata de reacciones que van desde

temperatura ambiente, hasta temperaturas altas. Y la síntesis no convencional involucra otro tipo de energía que no es el calentamiento en medio líquido para efectuar la reacción. Por otro lado, uno de los factores que puede llegar a afectar la síntesis de estos materiales es la temperatura, ya que, si el solvente utilizado en la reacción no alcanza la temperatura adecuada para que esta reacción inicie, la reacción no ocurre y no se forma el material [1]. Normalmente se utilizan altas temperaturas de reacción empleando reactores de acero inoxidable para tener condiciones solvotérmicas y de esta manera lograr obtener este tipo de materiales y poder tener el control sobre las condiciones de reacción y se usa regularmente para obtener materiales altamente cristalinos [2]. Una de las características principales de este tipo de materiales radica en su alta porosidad, misma que se logra gracias a los cúmulos metálicos y los espacios vacíos que quedan entre ellos. El tamaño de poro de estos materiales se debe principalmente al tamaño de los ligandos orgánicos y se encuentran en el rango de los microporos, con distancias que van desde los 6 Å hasta los relativamente estables con poros de 38 Å [3]. Los MOF se han estudiado por muchos años y es porque tienen diversos campos de aplicación y uno de los más estudiados es en la industria de textiles, pero no dejando a un lado que también es usado en laboratorios como un indicador ácido-base o incluso en investigaciones como lo es el caso de este trabajo [4]. En este trabajo se logró estudiar la capacidad de adsorción de naranja de metilo NM en medio acuoso, utilizando el MOF de Co sintetizado, ya que se sabe que el NM es uno de los colorantes más usados en industrias, por lo que resulta ser un contaminante muy presente en el agua y debido a que tiene grupo cromóforo N=N es difícil eliminarlo del agua residual [5]. Se llevó a cabo la síntesis del material cristalino poroso a partir del ácido bencen-1,2,4,5-tetracarboxílico, azopiridina y el nitrato de cobalto. La reacción se llevó a cabo en un medio acuoso, usando N, N-dimetilformamida (DMF) como disolvente polar. De igual manera, se llevaron a cabo diferentes pruebas de identificación para poder caracterizar y determinar las propiedades de este nuevo material. El material sintetizado se utilizó para poder conocer las capacidades de adsorción de este. Para las pruebas de adsorción, el material sintético poroso (adsorbente) fue sometido a diferentes concentraciones de soluciones acuosas de naranja de metilo NM, el cual fue utilizado como (adsorbato). La concentración del NM al inicio y a diferentes tiempos de contacto, se logró obtener mediante el uso del espectrofotómetro Uv-Vis. [6]

Metodología

Materiales (Reactivos y equipo)

Los reactivos que se emplearon para la síntesis del MOF Azo 1 son de la marca Sigma-Aldrich, siendo nitrato de cobalto (II) de fórmula $Co\ (NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ y con un peso molecular de 290.79 5 g/mol, el ácido bencen-1,2,4,5tetracarboxílico con fórmula $C_{10}H_6O_8$ y un peso molecular de 254.15 g/mol, 4-4´azopiridina con fórmula empírica $C_{10}H_8N_4$ y un peso molecular de 184.20 g/mol y como único disolvente se utilizó DMF el cual tiene una fórmula empírica de C_3H_7NO y posee un peso molecular de 73.09 g/mol. En el caso del colorante NM fue de la marca REAGENZIEN MERCK. Los cristales obtenidos fueron examinados mediante un microscopio estereoscopio binocular marca Cole Palmer. La lectura de absorbancias se realizó en un espectrómetro UV-Vis-NIR Varian Cary 5000. Las pruebas de DRX de polvos se realizaron con un difractómetro Bruker D-8 Advance. El análisis termogravimétrico (TGA), se realizó en un sistema modular de la serie Discovery de TA, Instruments. Las curvas de TGA se lograron obtener con una rampa de calentamiento de 10°C/min iniciando en 30°C hasta 500°C.

Síntesis

Para la síntesis inicialmente se pesó 0.1 g (100 mg) de ácido bencen-1,2,4,5-tetracarboxílico, 0.229 g (299 mg) de Co $(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ y 0.072 g (72 mg) de azopiridina, se disolvió en 6 mL de DMF, colocándolo en un reactor de acero inoxidable con interior de teflón. Los reactores se introdujeron en una mufla programable con una rampa que alcanzó una temperatura constante de 90°C durante 72 h, en la **Figura 1** se muestra un esquema de la reacción del MOF Azo 1.

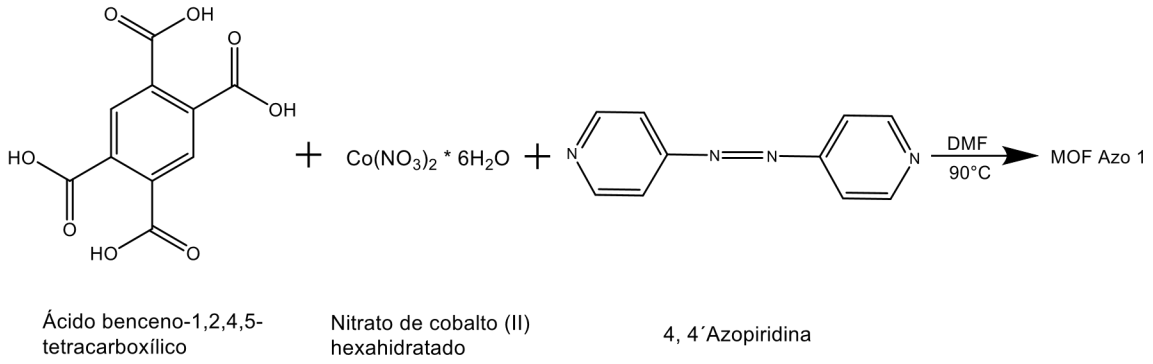


Figura 1. Síntesis solvotérmica de MOF Azo 1

Pruebas de remoción

Esta prueba se realizó usando una solución de 100 mL a una concentración de 1000 ppm de la cual posteriormente se realizaron diferentes alícuotas para tener concentraciones finales de 300 a 800 ppm del colorante NM. Para determinar la capacidad de adsorción del MOF Azo 1 se tomaron 10 mL de la solución NM de las diferentes concentraciones previamente preparadas y se agregaron 10 mg del polímero, para después mantenerlo en agitación a una velocidad de 550 rpm durante 1 h.

Para el caso de las pruebas de contacto se realizó el mismo procedimiento, pero a concentración de 500 ppm y utilizando tiempos de contacto de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 min.

Después de haber obtenido las concentraciones de los sobrenadantes, los valores se incluyeron en una gráfica de tal manera que en el eje de las abscisas (X) se encuentren los valores de concentración (mg/L) y en el eje de las ordenadas (Y) la absorbancia obtenida, esto se logró con ayuda de la fórmula que se muestra a continuación:

$$X2 = \left(\frac{Y3-Y1)(X3-X1)}{(X3-X1)}\right) + X1$$

Y para conocer la capacidad que adsorbe el MOF y su eficacia en cuanto a la remoción del colorante se calculó con la fórmula que se muestra a continuación:

$$Eficacia\ \% = \frac{Co-Ct}{Co} * 100 \qquad Qt = \left(\frac{Co-Ct)V}{m}\right.$$

Donde:

Q_e es la capacidad de adsorción en relación con el tiempo (mg/g); Co es la concentración inicial de soluto en la solución (mg/L); C_t es la concentración de soluto en el de equilibrio (mg/L); V es el volumen de solución (L) y, m la masa de adsorbente (mg).

Esto se pudo confirmar con la prueba que se realizó del colorante naranja de metilo, ya que se hizo una curva de calibración donde se tuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9998

Resultados y discusión

MOF Azo 1

Se lograron obtener dos sólidos cristalinos que al ser observados al microscopio mostraron un color rojo y morado (**Figura 2**), siendo el material de color rojo el que se obtuvo en mayor cantidad, ambos materiales altamente cristalinos. La reacción solvotérmica dio lugar a la obtención de un rendimiento del 48%. Además, fue insoluble en H_2O y en la mayoría de los disolventes orgánicos como MeOH, EtOH, DMF.

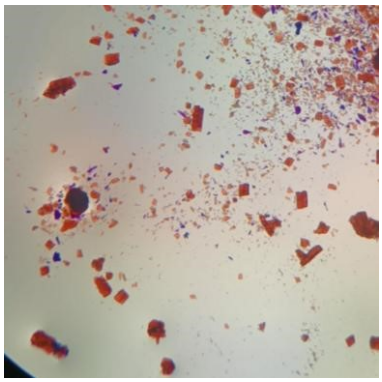
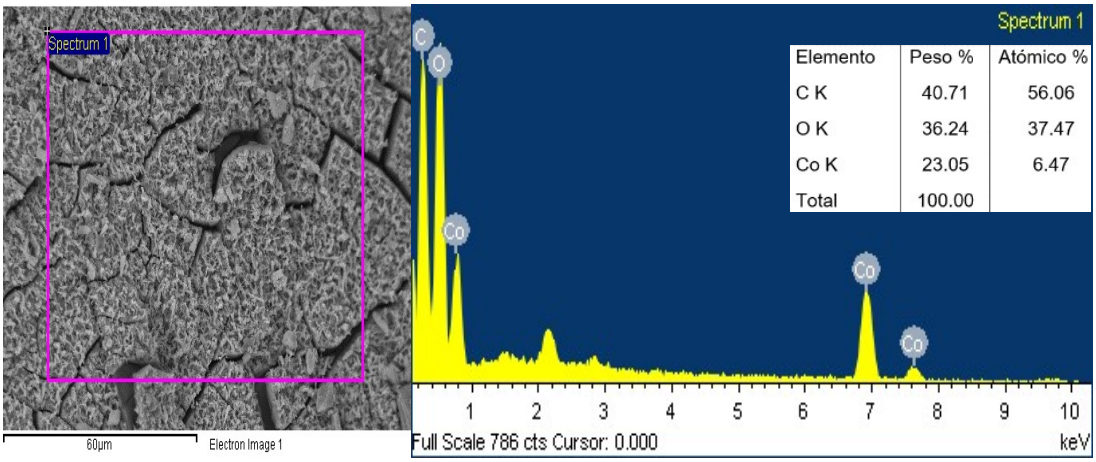


Figura 2. Cristales MOF Azo 1, observados a 30x

Microanálisis elemental por EDS

En la **Gráfica 1** se muestra la micrografía y el análisis elemental EDS de cristales del MOF Azo 1 con el cual se corroboraron los elementos precursores. Dichos que fueron cobalto (Co), oxígeno (O), carbono (C), en una relación de masa de 23.06%, 36.24% y 40.71% respectivamente.

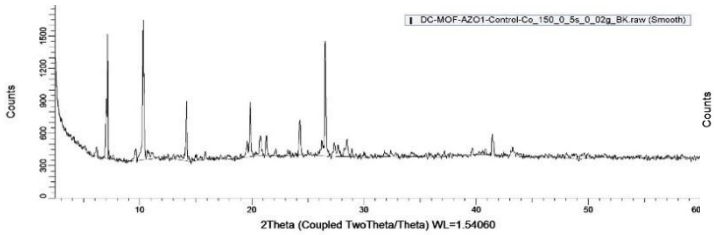


Gráfica 1. Microanálisis elemental EDS del MOF

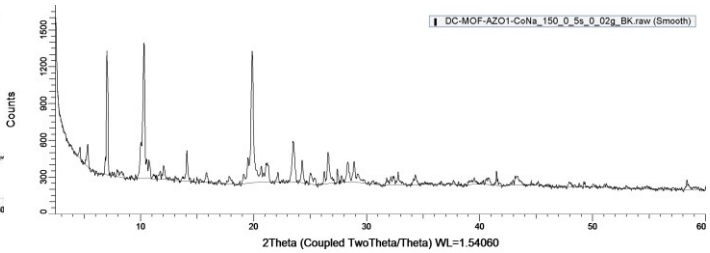
DRX de polvos del MOF Azo 1

En la **Gráfica 2** se muestra el difractograma del MOF Azo 1 el cual se realizó a partir de una muestra del polvo cristalino de este polímero, de manera que nos muestra en el eje de las abscisas (X) el ángulo de difracción y en el eje de las ordenadas (Y) la intensidad correspondiente y los datos de la muestra analizada. El pico más alto que se observó fue de 1650. En la **Gráfica 3** se demuestra como el MOF si pudo realizar y adsorber al colorante

NM, ya que se puede observar un cambio en la intensidad de las bandas, teniendo en cuenta que la más alta que se mostró fue alrededor de 1400.



Gráfica 2. Difractograma de polvos cristalinos



Gráfica 3. Difractograma de polvos cristalinos posterior a la remoción de NM

Al comparar los difractogramas del antes y después de la remoción del colorante con el MOF Azo 1, se observa que este sigue presentando una misma fase cristalina del MOF, sin embargo, se nota una disminución de su intensidad en la banda de 15 y 27 θ, a diferencia de la de 20 θ que su intensidad aumenta, lo cual indica que se ha perdido cristalinidad, pero que no afecta tanto a su estructura, por lo que se puede afirmar que el colorante azoico es adsorbido mediante fisisorción en el MOF. Comparándolo con el estudio del MOF UV-11 [7] se destacan bandas similares debido a la presencia del mismo ligante, además de observar que hay una ausencia de estos mismos, los cuales están observados en el estudio de la primera vez síntesis de nitrato de cobalto hexahidratado mediante condensación controlada por vaporización láser [8].

Micrografía SEM del MOF Azo 1 posterior a la remoción de NM

Esta técnica nos permitió visualizar la morfología y tamaño del MOF Azo 1, en la **Figura 3** se observan las micrografías SEM antes y después de la remoción de NM. Antes de la remoción, la superficie del MOF se ve definida y sin moléculas adheridas **Figura 3a**, pero posterior a la remoción, se observa una superficie rugosa y más opaca, que indica la porosidad del material además de presentar aglomeraciones de moléculas del colorante en la superficie, reafirmando así la adsorción del NM, **Figura 3b**.

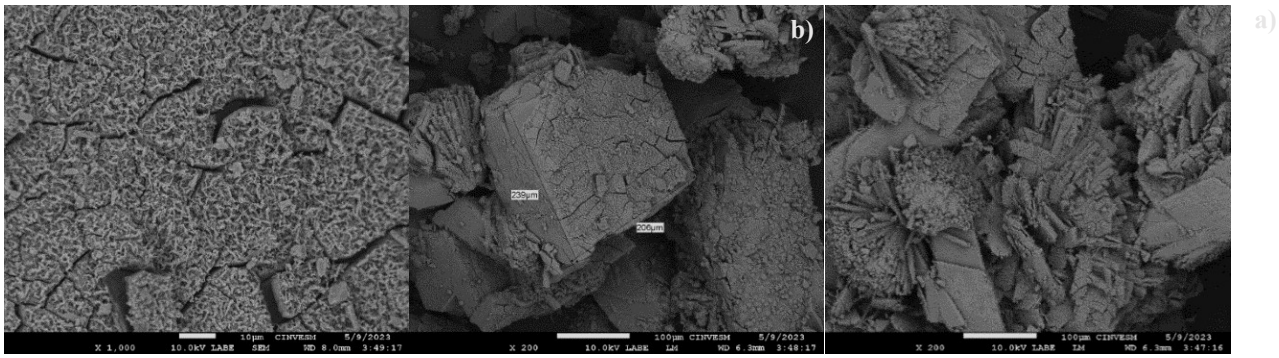
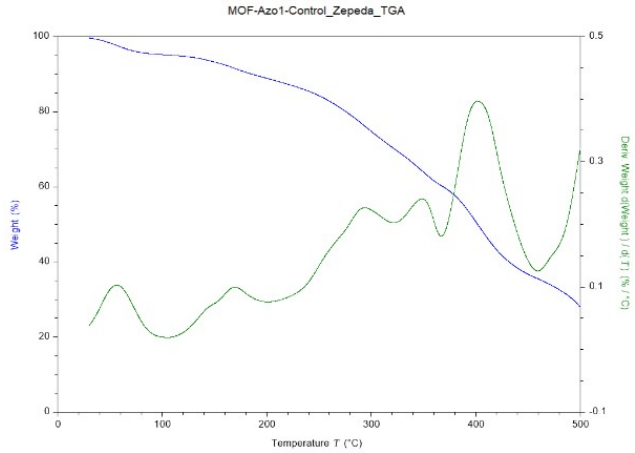


Figura 3. Micrografía SEM antes y después de la remoción

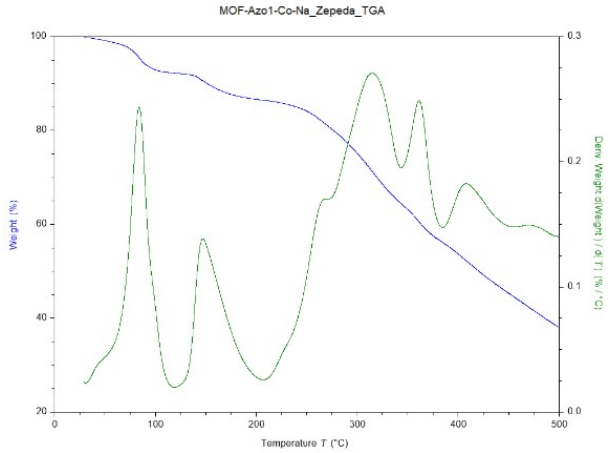
Análisis termogravimétrico

Con esta técnica se pudo determinar la estabilidad térmica que presenta el MOF, ya que se muestra cómo la muestra original comienza a perder peso conformo se incrementa la temperatura. En la **Gráfica 5** se puede observar una disminución inicial de la masa a una temperatura cerca a los 40 y 60ºC, que se debe a la pérdida

de componentes volátiles en el material, que probablemente quedaron del proceso de reacción. Por otro lado, es importante destacar que hasta este momento la salida de dichos componentes no involucra la degradación del MOF, por lo que no se podría considerar como una reducción en la estabilidad térmica del mismo. Otra pérdida menor fue del 4% que está relacionada a la pérdida del disolvente que fue DMF a una temperatura de 175ºC. Mientras que de las pérdidas mayores que se muestran son a 290ºC que se debe al ácido benceno-1,2,4,5tetracarboxílico y a una temperatura de aproximadamente 400ºC se tuvo una pérdida del 37% que se debe a la descarboxilación del MOF, lugar donde se da la descomposición de este polímero. Mientras que en la **Gráfica 6** se muestra el MOF con el NM adsorbido en su superficie mostrando que la pérdida de masa comienza a temperaturas de 80ºC, que corresponde a moléculas de agua adsorbidas en la superficie y en el interior de MOF. De la misma manera, a una temperatura de aproximadamente 120ºC se llevó a cabo la pérdida de un 30% perteneciente al DMF.



Gráfica 5. Curva TGA del MOF



Gráfica 6. Curva TGA después de la remoción

Eficacia de remoción de NM mediante el MOF Azo 1

Las soluciones que se emplearon para la remoción del colorante NM fueron de diferentes concentraciones 300, 400, 500, 600, 700 y 800 ppm. Para la eficiencia de remoción del MOF Azo 1 con el colorante NM se evaluaron 6 soluciones con una concentración de 500 ppm a diferentes tiempos de contacto: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos. En la **Figura 4** se puede apreciar la remoción del NM asociado a una pérdida de color en la solución que logra el MOF 01 para el colorante NM, donde el tubo que se muestra a la izquierda es la concentración máxima del colorante, mientras que el tubo de la derecha es posterior al procedimiento de la adsorción.

El coeficiente de determinación es un valor que nos permite saber y conocer que tan cercano estamos a los valores reales de acuerdo con la regresión lineal que se tiene, por lo que en la **Gráfica 7** se presentan los valores experimentales y se observa que se mantienen dentro del rango deseado ya que el valor de la R^2 es de 0.9696, además de que conforme aumenta la concentración del colorante la absorción también aumenta.



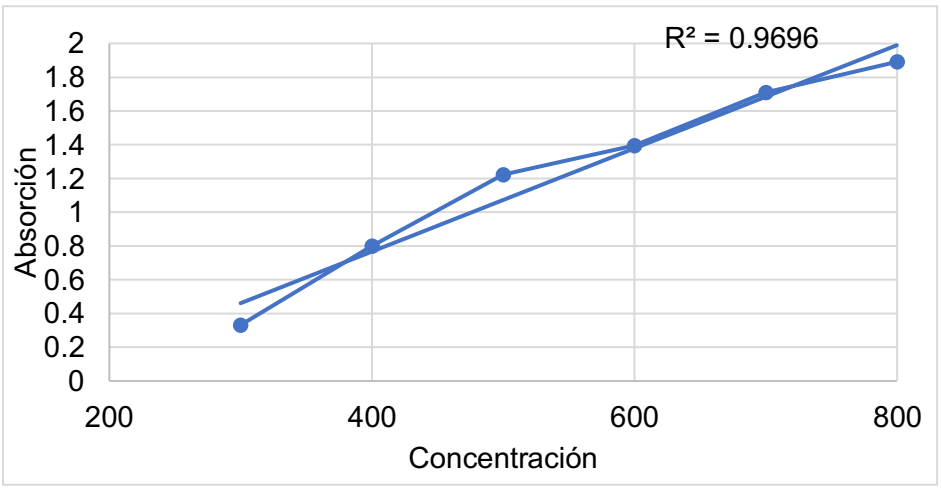


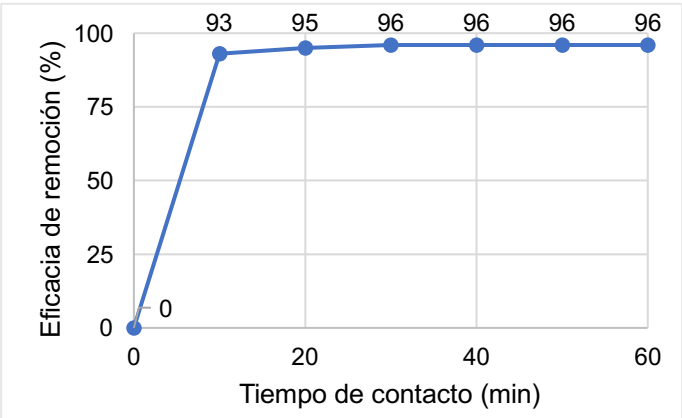
Figura 4. Remoción de colorante mediante el MOF Azo 1

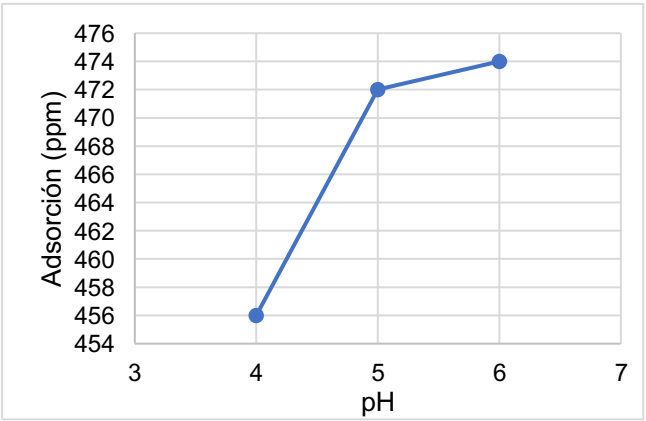
Gráfica 7. Absorción de NM a diferentes concentraciones NM

Capacidad de adsorción del MOF Azo 1 para NM

La capacidad máxima de adsorción (Q_{max}) del MOF para el colorante NM fue de 96%, y fue alcanzada a un tiempo de contacto a partir de los 10 min. lo cual nos indica que a este tiempo de contacto la adsorción del colorante ya se ha llevado a cabo con una eficacia del 93%, por lo que se dice que a una concentración alta del NM este puede remover gran cantidad de colorante en cuestión de minutos. El comportamiento Q_t del MOF Azo 1 para el colorante NM se observa en la **Gráfica 8.** El MOF UV-11 siendo un polímero ya reportado y que se sintetizó por el mismo método se puede comparar con este, además de ser también de cobalto y fue usado para la remoción del colorante naranja de metilo, obteniendo una Q_{max} de 1649 mg/g [9].

En la **Gráfica 9** se muestra el comportamiento que tiene el colorante NM en cuanto a la adsorción con el MOF Azo 1 a diferentes pHs, esto se evaluó teniendo una concentración de 500 ppm de la solución, donde se tuvo una adsorción 456 ppm en pH de 4 y mientras este estaba en aumento la absorbancia igual aumentaba, en el caso de pH 6 se tuvo una adsorción de 474 ppm. El pH es un parámetro importante que ayuda a controlar los procesos de adsorción de metales en diferentes adsorbentes. Con esta gráfica se puede decir que el pH óptimo es de 6, y se deduce que la capacidad de adsorción del NM aumenta cuando el pH es más ácido, lo que significa que el MOF se encuentra con carga positiva permite que se adhiera con la carga negativa del ion NM.





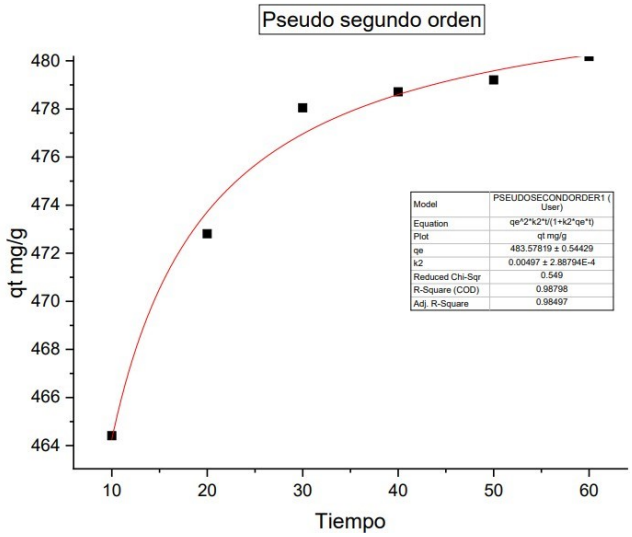
Gráfica 8. Tiempo de contacto eficacia de remoción

Gráfica 9. Efecto del pH en la adsorción de NM

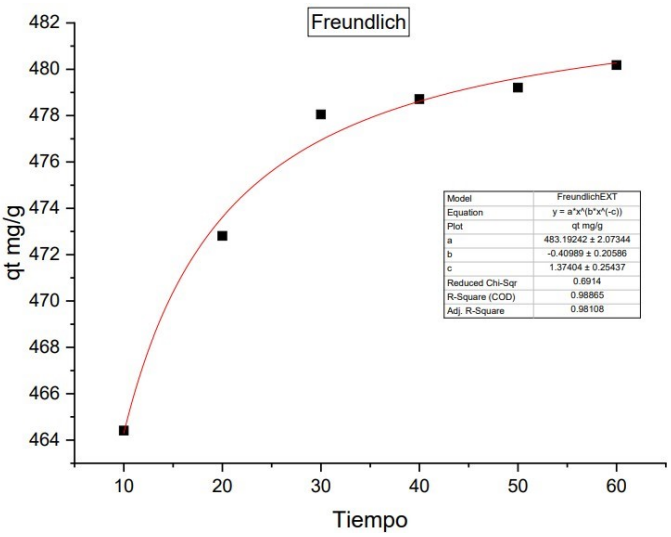
Velocidad de la reacción e isoterma de la reacción

Para poder entender el mecanismo de reacción y saber el proceso de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente se llevó a cabo la adsorción del colorante NM utilizando una concentración de 500 mg/g a diferentes tiempos de contacto que fueron desde los 10 min hasta los 60 min., de tal manera que al ajustar los datos para la ecuación de pseudo segundo orden se encontró que la capacidad de adsorción en el equilibrio fue de 483 mg/g, por lo que este modelo junto con la R^2 que fue de 0.987 nos indicó que la velocidad de adsorción depende tanto del adsorbato que es el colorante NM como del adsorbente que es el MOF Azo 1, **Gráfica 10**.

Por otro lado, tambien se realizaron los cálculos para determinar la isoterma de adsorción que se pudo ajustar al modelo de Freundlich. El proceso de adsorción sigue una relación no lineal entre la cantidad adsorbida en el adsorbente y la concentración del adsorbato, ver **Gráfica 11**. El modelo de Freundlich es utilizado para describir la adsorción en sistemas heterogéneos, donde la superficie del adsorbente puede tener diferentes sitios de adsorción con diferentes afinidades. Los datos experimentales de adsorción obtenidos en este trabajo se ajustaron bien al modelo de Freundlich y esto nos indica que la cantidad de adsorbato NM adsorbido aumenta y no linealmente, sino que incrementa con el aumento de la concentración del NM. Por lo que la superficie del MOF es heterogénea y hay diversos tipos de sitios activos sobre la superficie, dando una adsorción en multicapa.



Gráfica 10. Pseudo segundo orden



Gráfica 11. Modelo de Freundlich

Trabajo a futuro

Siguiendo con la investigación y desarrollo de este nuevo MOF que fue denominado como Azo 1, se pretende que la síntesis pueda ser realizada por métodos ultrasónicos donde se puedan obtener nanopartículas de este material, de tal manera que se pueda lograr la obtención de un mejor rendimiento de la reacción así como un aumento en la eficacia de la adsorción por la disminución del tamaño de partícula, no solo de contaminantes del tipo azoicos sino también será probado este material en la adsorción de otras moléculas de gran importancia como son

los fármacos, área importante en donde los MOFs están teniendo un gran auge en el acarreamiento y liberación prolongada de fármacos.

Conclusiones

1. Se logró sintetizar un MOF mediante condiciones solvotérmicas, el cual fue denominado Azo 1.
2. Mediante la DRX de polvos se pudo evaluar y confirmar la fase cristalina del MOF Azo 1, la cual no tuvo cambios significativos que perjudicaran su estructura después de las pruebas de la remoción.
3. Con las micrografías SEM se demostró que el colorante azoico es adsorbido por el MOF mediante un mecanismo de fisisorción ya que se observaba en la superficie de este, de tal manera que se forman multicapas, confirmándose además con el modelo de Freundlich.
4. El MOF Azo 1 resultó ser un material cristalino el cual permite una remoción eficiente desde el minuto 10 del colorante azoico, naranja de metilo, esto es debido a las propiedades porosas que presenta, por lo que cada 10 mg de este nuevo polímero logró adsorber hasta 8 mg/L de NM.

Referencias

[1] E. M. Castillo Silva, M. A. Morales Rodríguez y G. Cervantes Zubirias, “Degradación del colorante naranja de metilo utilizando compositos de tio2/quitosano.”, Revista Multidisciplinas de la Ingeniería, n.º 5, pp. 86–91, 2017.

[2] M. H. Villegas-Fernández, M. Carpio-Granillo, E. Vargas-Hernández, F. J. Zuno-Cruz y G. SánchezCabrera, “Una revisión general de las estructuras metal-orgánicas (MOF) dentro de la química inorgánica”, Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, vol. 8, n.º 16, pp. 18–29, enero de 2021. doi: 10.29057/icbi.v8i16.5775.

[3] P. Zaruma, J. Proal, I. Chaires Hernández y H. I. Salas, “Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: Una breve revisión”, Facultad de Ciencias Químicas, 2018, art. n.º 19.

[4] M. Safaei, M. M. Foroughi, N. Ebrahimpoor, S. Jahani, A. Omidi y M. Khatami, “A review on metal-organic frameworks: Synthesis and applications”, TrAC Trends Analytical Chemistry, vol. 118, pp. 401–425, septiembre de 2019. doi: 10.1016/j.trac.2019.06.007.

[5] A. A. Paneque Quevedo, “Mecanoquímica: Una visión general más allá de la química inorgánica.”, Revista Cubana de Química, vol. 31, pp. 71–86, 2019.

[6] J. A. Claudio-Rizo, L. F. Cano Salazar, T. E. Flores-Guia y D. A. Cabrera-Munguia, “Estructuras metalorgánicas (MOFs) nanoestructuradas para la liberación controlada de fármacos”, Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, vol. 14, n.º 26, pp. 1e—29e, septiembre de 2020. doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69634.

[7] I. G. Meza-Pardo et al., “Síntesis de MOF UV-11 y su caracterización mediante voltamperometría cíclica”, Frontiers Chemistry, vol. 8, agosto de 2020. doi: 10.3389/fchem.2020.00617.

[8] G. P. Glaspell, P. W. Jagodzinski y A. Manivannan, “Formation of Cobalt Nitrate Hydrate, Cobalt Oxide, and Cobalt Nanoparticles Using Laser Vaporization Controlled Condensation”, J. Physical Chemistry B, vol. 108, n.º 28, pp. 9604–9607, 2004.

[9] J. S. Rodríguez Girón, “Aplicación de polímeros metal-orgánicos para la remoción de colorantes azoicos en soluciones acuosas”, Maestría, Universidad Veracruzana, Orizaba, 2019.

Detección de depresión mediante procesamiento de fotogramas

Rodolfo Romero-Herrera[1], Odan Ricardo García Mosqueda.[2], Cecilio Rivero García[3]*
rromeroh@ipn.mx[1], Odan9354@gmail.com[2], crivero8100@egresado.ipn.mx[3]

***Área de participación**: Sistemas Computacionales*

Resumen

La depresión es un desorden mental que causa un alto costo. Por lo que es útil diseñar una herramienta de apoyo para su diagnóstico. Este proyecto propone medir el trastorno mental de la depresión en un individuo mediante el análisis de expresiones faciales donde se detecta la tristeza reiterativa como factor relacionado con la depresión; y una segunda técnica auxiliar mediante la prueba Montgomery aplicada por expertos en Piscología para verificar los resultados obtenidos. Se procesan fotogramas tomados de un video, donde se localiza la cara mediante Viola & Jones y puntos característicos BRISK relacionados con la tristeza. Para el reconocimiento de la expresión facial se usa FACS (Facial Action Units System); ya que se toma en cuenta el movimiento de los músculos atreves los puntos clave localizados, de los cuales mediante estadística se reconoce si hubo un cambio provocado por el movimiento. Como resultado el sistema permite la detección de la depresión mediante graficas. La detección de la depresión es importante si se considera pérdidas sobre todo después del periodo de pandemia.

***Palabras clave**: Depresión, expresiones faciales, tristeza*

Abstract

Depression is a mental disorder that exacts a high cost. Therefore, it is useful to design a support tool for its diagnosis. This project proposes to measure the mental disorder of depression in an individual by analysing facial expressions where repetitive sadness is detected as a factor related to depression; and a second auxiliary technique through the Montgomery test applied by experts in Psychology to verify the results obtained. Frames taken from a video are processed, where the face is located using Viola & Jones and characteristic BRISK points related to sadness. For facial expression recognition, FACS (Facial Action Units System) is used; since the movement of the muscles is taken into account through the localized key points, of which through statistics it is recognized if there was a change caused by the movement. As a result, the system allows the detection of depression through graphs. Detection of depression is important when considering losses, especially after the pandemic period.

***Keywords**: Depression, facial expressions, sadness.*

Introducción

La depresión es una enfermedad crónica para la cual solo un pequeño porcentaje pide ayuda de profesionales [1]. La depresión tiene varias etapas y múltiples perspectivas, por lo que es necesario detectar la intensidad que manifiesta el sujeto. Este estado de ánimo es un proceso biosociológico que en ciertos casos se prolonga hasta ser permanente [2] La depresión causa en las personas muchos sentimientos dominados por ideas negativas. Las personas tienden a pensar que los problemas no podrán resolverse rápidamente o que el problema no tiene solución, por lo que se rinden. Lo que conduce a una autocrítica muy dura hasta el punto de tener patrones suicidas [3]. La situación confunde y da la impresión de que la persona tiene una mala actitud lo que lleva a la falta de motivación, concentración y energía [4].

Existen herramientas que ayudan al diagnóstico de la depresión muchas de ellas multimodales [5]; tales como, las inclinaciones de la cabeza, las señas de la parte superior del cuerpo, la voz, etc [6]. Un enfoque particular es el enfoque audiovisual, con atención a las medidas de expresividad emocional, para lo cual es indispensable tomar en cuenta los parámetros estadísticos para la depresión y la no depresión [7]. En este trastorno la expresión facial es diferente a los estados normales por lo que es factible mediante una escala detectar la depresión [8], y su relación con la tristeza; se realiza mediante un análisis emocional tomando en cuenta la correlación entre el estado del paciente y el resultado de la detección de la depresión [9].

El objetivo del proyecto fue reconocer la tristeza en la expresión facial y con ello relacionarla con la depresión al prolongarse dicho estado emocional. Para confirmar el estado se empleó un cuestionario que es evaluado por un experto junto con el resultado del reconocimiento de imágenes.

Trabajos relacionados

Prasetio et al. [10] desarrollaron un sistema de reconocimiento de estrés con tres clases (neutral, bajo, alto) basado en redes neuronales. Pediaditis et al. [11] encontraron una forma de utilizar los rasgos faciales para la detección del estrés y la ansiedad. Los signos faciales consisten en actividad de la boca, frecuencia cardíaca, frecuencia y movimiento de parpadeo y movimiento de la cabeza. Giannakakis et al. [12] desarrollaron un marco para el estrés y la detección mediante señales faciales de los ojos, boca, movimiento de la cabeza y frecuencia cardíaca. Las Unidades de Acción Facial (AU) del Sistema de Codificación de Unidades de Acción Facial (FACS) [13] son una forma alternativa de extraer rasgos del rostro. Los patrones musculares de la cara se dividen en 46 AU primarias donde el análisis de las AU determina diferentes emociones. Viegas et al. [14] desarrollaron un modelo de detección de estrés utilizando 17 AU, como apretar el párpado, levantar las mejillas, levantar la ceja exterior y parpadear. Los FACS también se utiliza en una arquitectura no intrusiva para determinar los niveles de estrés por profesionales de la salud. Gavrilescu et al. [15] utilizaron 31 AU para determinar diferentes niveles de la Escala de estrés, ansiedad y depresión. La arquitectura está compuesta de tres capas. Las primeras capas toman las secuencias de video y aplican detección de rostros, encontrando bloqueos de ojos y boca. La segunda capa es una matriz construida sobre los niveles de AU en el fotograma actual y los fotogramas subsiguientes. La tercera capa utiliza una red neuronal, incluidos cinco estados, desde normal hasta extremadamente grave. Además de la detección de estrés mediante vídeos de espectros visibles, también se implementan estudios de reconocimiento de estrés mediante datos faciales en los espectros térmicos (TS) [16].

Metodología

Para la metodología se empleó DoE (Diseño orientado a Experimentos), ya que: permite volver a hacer tantos intentos como se requieran [17], Plantea el objetivo, Identifica las variables con relación a la respuesta. Diseña los experimentos, realiza pruebas y mejoras planificadas; entonces revisa los resultados obtenidos, asegura que las medidas adoptadas permanezcan en el tiempo, y repite un ensayo con los datos recabados para obtener los mejores resultados posibles.

Detección del rostro

Para la localización del rostro se usó el método de Viola & Jones. El algoritmo hace uso de clasificadores que se entrenan con miles de imágenes. Este método consiste en la localización de objetivos mediante el uso de un grupo de características rectangulares (CR) de partes claras y obscuras, distribuidas de forma rectangular dentro del objetivo [18]. Ver figura 3. Se usan tres clases de características las de dos, tres y cuatro rectángulos de 10 tipos diferentes. Se colocan dentro de la imagen y se obtiene la substracción entre la suma de los píxeles dentro de la parte clara y la parte obscura de la CR, obteniendo un valor entero que debe superar un umbral determinado dependiendo de la característica buscada. Esta CR es un clasificador. Ver figura 1:

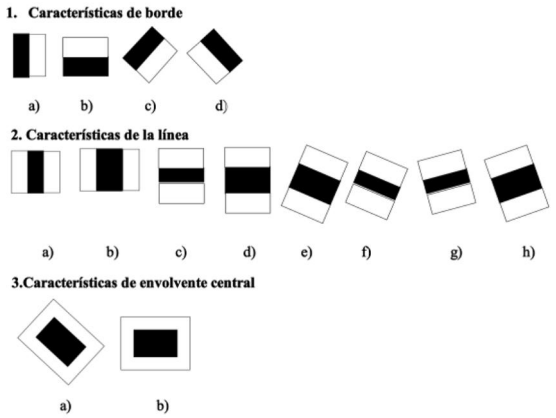


Figura 1: Características en componentes rectangulares CR [11].

Una imagen integral es usada para calcular los Crs donde el punto (x, y) es el resultado de la suma de píxeles superiores y a la izquierda de la posición (x, y). Ver Ec (1).

$$ii(x,y) = \sum_{x' \le x, y' \le y} i(x', y') \qquad (1)$$

Donde ii(x, y) es la imagen integral e i(x, y) es la imagen original (figura 2) [18]. Las ecuaciones (2) y (3) determinan la programación del método.

$$s(x,y) = s(x,y-1) + i(x,y) \qquad (2)$$

$$ii(x,y) = ii(x-1,y) + s((x,y) \qquad (3)$$

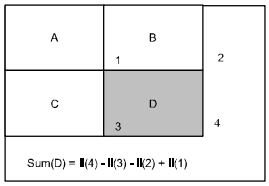


Figura 2. Cálculo de la suma de intensidad de píxeles en una región rectangular.

También se usa el aprendizaje AdaBoost para aumentar el rendimiento de la detección de regiones. Los clasificadores se colocan en cascada lo que mejora el procesamiento.

Músculos faciales

Para seleccionar los puntos relevantes se tomó en cuenta el movimiento de cuatro músculos de la cara: El musculo piramidal o prócer que se sitúa en el envés de la nariz. Inicia del borde inferior del hueso y recorre la piel en la región superciliar. Su función es desplazar la piel frontal hacia abajo especialmente el área de las cejas. El músculo risorio el cual es un músculo incluido dentro de los músculos de los labios y la boca [19]; El músculo depresor ubicado dentro del área de los labios y la boca [20]; este músculo se ubica en la parte oblicua de la mandíbula, de forma ancha y delgada, desplaza hacia abajo las comisuras de los labios, lo cual permite mostrar en el rostro la tristeza; por último, el Músculo occipitofrontal el cual corresponde a los músculos cutáneos del cráneo, tiene una forma cuadrilátera, esto quiere decir que presenta 2 vientres musculares los cuales son el occipital y el frontal; a pesar de estar separados realizan el movimiento de las cejas y los parpados [21].

Recepción de emociones

Se uso el sistema FACS (Facial Action Units System) es cual clasifica los movimientos faciales humanos; subdivide casi todas las expresiones faciales en un conjunto de unidades conocidas como AU (Action Units) [22]. Las AU son acciones fundamentales de los músculos, los cuales tienen diferentes intensidades que se representan con las letras A (Rastro), B (Leve), C (Pronunciado), D (Severo o extremo) y E (máximo).
Los micros expresiones son de vital importancia ya que con ellas una persona deprimida muestra su estado de ánimo con el lenguaje corporal, como son el cambio en los parpados, la boca o los ojos. En el diagrama de la figura 3, se ve como llevar a cabo el reconocimiento de las FACS.

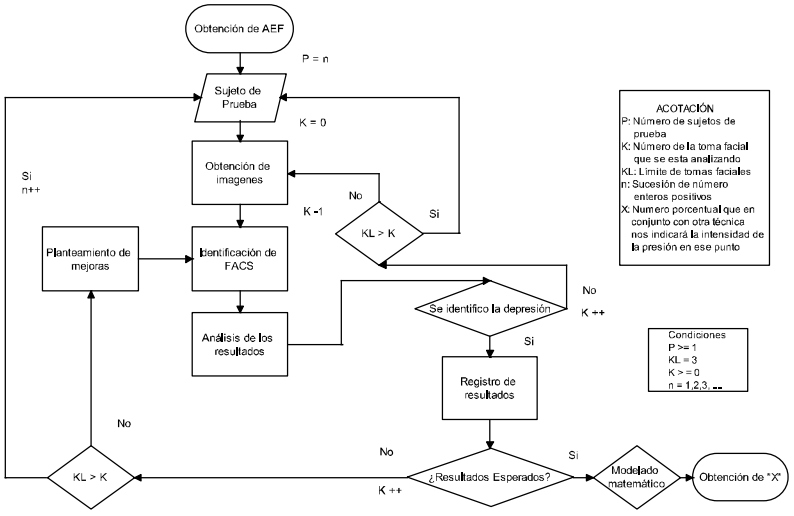


Figura 3. Diagrama de flujo para el reconocimiento de FACS

Las expresiones faciales son el resultado del movimiento de los músculos del rostro. El análisis consiste en identificar la correspondencia de las emociones con las expresiones faciales [23]. Existen las expresiones faciales

involuntarias y las voluntarias, las primeras se controlan desde el tallo cerebral, ya que son emociones inconscientes o espontaneas mientras que las voluntarias son procesadas por la corteza motora por esto mismo es factible reconocer los patrones en micro expresiones cuándo una persona sonríe falsamente [23].

Detector de equinas Brisk (puntos clave escalables invariables robustos binarios)

Se recaban los datos a partir de una serie de imágenes proporcionada por un dispositivo (cámara de alta definición), y se analiza mediante procesamiento digital de imágenes para identificar en el individuo expresiones que nos indiquen si padece de depresión. Mediante una serie de puntos faciales; se comparan sus distancias entre puntos para saber qué músculos se están moviendo. No se toman de los puntos clave las coordenadas debido a que son relativas a factores externos como la distancia del rostro a la cámara o el movimiento constante de la cara; es decir, la distancia entre los puntos no dependen del lugar o posición donde se encuentra la persona dentro de un espacio geográfico, sino más bien esa distancia es la separación entre puntos que finalmente son pixeles característicos de una imagen, entonces al variar esa distancia significa que hubo movimiento ya que la cámara esta fija.
El detector BRISK se usa para localizar los puntos clave. El objetivo es dividir una imagen en regiones locales de interés; lo que reduce la complejidad y se aprovechan las características de apariencia. El detector de puntos clave encuentra zonas en la imagen que se destacan incluso cuando cambia el punto de vista. BRISK tiene tres fases, la detección de características, la composición del descriptor y el empate de los puntos clave [24].
Para evitar los efectos del aliasing se emplea en el muestreo la intensidad de la imagen en el punto pi estándar, un suavizado gaussiano con desviación estándar *σi* acorde a la distancia entre los puntos del círculo respectivo [25]. Se posiciona y escala el patrón de acuerdo con el punto clave k, en uno de los *(N(N-1))/2* pares de puntos muestreados *pi, pj*. Los valores de intensidad suavizados son *I (pi, σi)* e *I (pj, σj)*, y se emplean para estimar el gradiente *g (pi, pj)*. Ver ecuación 4.

$$g(p_i, p_j) = (p_j, p_i)\frac{I(p_i\sigma_i) - I(p_j, \sigma_j)}{\|p_j - p_i\|^2} \qquad (4)$$

Los umbrales de distancia propuestos son *δmax = 9.75t* y *δmin = 13.67t* con una escala t de k. Repitiendo a través de los puntos pares en L, se predice la dirección sobre todos los rasgos del patrón del punto clave k, mediante la ecuación 5.

$$g = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} = \frac{1}{L}\sum_{(p_i, p_j)\epsilon\mathcal{L}} g(p_i, p_j) \qquad (5)$$

Una vez obtenido los datos del rostro se obtiene la media, varianza, desviación estándar, valor máximo, y el valor mínimo para el análisis. Considerando condiciones iniciales (cara neutra).

Implementación

Después de la localización del rostro con el método de Viola & Jones y la detección de los puntos clave se reconoce el movimiento de los músculos faciales; se captura la distancia de los puntos clave dentro de la imagen donde se observa el movimiento de los músculos previamente mencionados. Cada fotograma nos da información de estos puntos y posteriormente se almacenan. Se procesan los datos para clasificar las FACS y distinguir la tristeza en una persona; al ser un mapa de puntos la opción para determinar esos patrones es calcular distancia euclidiana mediante (6), para cada sección que se desea analizar [26]. Esto con la finalidad de precisar el movimiento en los ejes (x, y). En el eje “x” basta con obtener la distancia entre los puntos, pero en el eje “y” necesitamos un punto de intersección ya que de otra forma tendríamos que analizar el movimiento en “y” de ambos puntos, por los que se optó por determinar la intersección entre rectas y sacar su distancia de un punto hacia la intersección. Recordemos que los ejes “x”, “y” nos da la posición de un pixel.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad (6)$$

Como se muestra en la figura 4, se trazaron líneas perpendiculares, una representa el movimiento en “X” y la otra en “Y”; en el caso de la boca, se analizó el cambio que se realiza específicamente en los puntos 49 y 55 ya que el movimiento de estos puntos es producido por el musculo risorio o depresor. Se consideraron los puntos relevantes del movimiento de 4 músculos de la cara siendo estos el depresor de la boca, el risorio, prócer y occipitofrontal. Para el caso de las cejas se tomaron en cuenta 4 puntos el punto 22 y 23 para detectar un

acercamiento entre cejas y los puntos 19 y 26 para observar su elevación. También se tomó en cuenta el parpado caído ya que este es un indicativo de tristeza y la ausencia o escases de puntos en el ojo determina que este se cerró. La fisionomía de cada individuo es exclusiva, por lo que no se pude comparar con otras para reconocer la tristeza; así, se establecen condiciones iniciales con una primera muestra del individuo con el que se va a comparar las subsecuentes, por lo que se pide al usuario que muestre una cara neutral hacia la cámara para la primera toma.

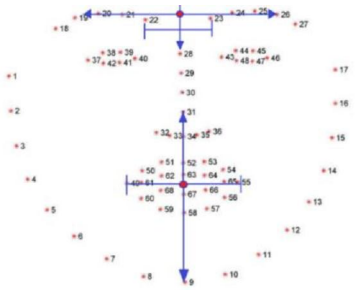


Figura 4. Puntos faciales [27].

MADRS (Montgomery Asberg Depression Rating Scale)

La Montgomery Asberg Depression Rating Scale (MADRS) es una escala hetero aplicada por medio de una entrevista que tiene de 10 puntos que evalúan las señales de depresión. La prueba es aplicada por un experto, aunque existen versiones auto aplicadas [28]. En el presente trabajo el sistema aplica la escala mediante una página web, cuyos resultados posteriormente son evaluados por psicólogos con experiencia en el ramo por más de 10 años, quienes propusieron dicha prueba; aunque existen otras como la PHQ-9. Los puntos para calificar que se toman permiten medir parámetros para la tristeza aparente, tristeza referida, tensión interna, disminución de sueño, disminución de apetito, dificultades de concentración, laxitud, incapacidad para sentir, pensamientos pesimistas y pensamientos suicidas. La evaluación para una persona sin depresión está entre 0 y 6, donde para asignar la calificación, el experto maneja información de fuentes distintas. La puntuación global es la suma de la calificación en cada uno de los puntos, ubicados de 0 a 60. Los puntos recomendados son los de la tabla 1.

Tabla 1. Puntos de corte recomendados y descriptores de la escala.

	Sin depresión	Leve	Moderado	Serio
Puntos de corte recomendados	0-6	7-19	20-24	35-60
Otros puntos de corte en ensayos clínicos	0-12	13-26	27-36	37-60

Aunado al análisis por procesamiento de fotogramas se consideró muestras la prueba de Montgomery-Asberg Depression Rating Scale (MADRS), dicha prueba es evaluado por psicólogos expertos en el área, a los cuales se les proporciono la página web del test. Esta prueba servirá para dar el veredicto de depresión, en vista de que la prueba de AF (análisis de cara por fotogramas) solo detecta tristeza. Con esta prueba se agrega el factor tiempo ya que la tristeza en ciertas ocasiones es pasajera y la depresión es un estado de ánimo a largo plazo.

Resultados y discusión

El programa de análisis facial identifica expresiones de tristeza, alegría, sorpresas y enojo. Nos enfocamos en la depresión reflejada en tristeza en el rostro. Ver figura 5(a).



a) b) c) d)

Figura 5. Expresiones faciales identificadas a) tristeza, b) Felicidad, c) enojo, d) sorpresa e) Mapa de puntos

El AF y MADRS debe ser aplicado por personal calificado y certificado. Así, el análisis de imágenes y el cuestionario MADRS permiten un dictamen más certero. El resultado se verá reflejado en un arreglo de tamaño 5. Donde 1 es positivo para la tristeza, y cero para negativo. Con base a las estadísticas se generan las gráficas para una mayor comprensión de la muestra. Ver tabla 2.

Tabla 2. Distribución del arreglo por sectores

Musculo depresor	Musculo Risorio	Musculo Occipitofrontal	Musculo Prócer	Ptosis palpebral
0	1	2	3	4

Se tomaron muestras de un sujeto con cara neutra, y se continuó con la prueba (segunda muestra) donde comenzó a sonreír:

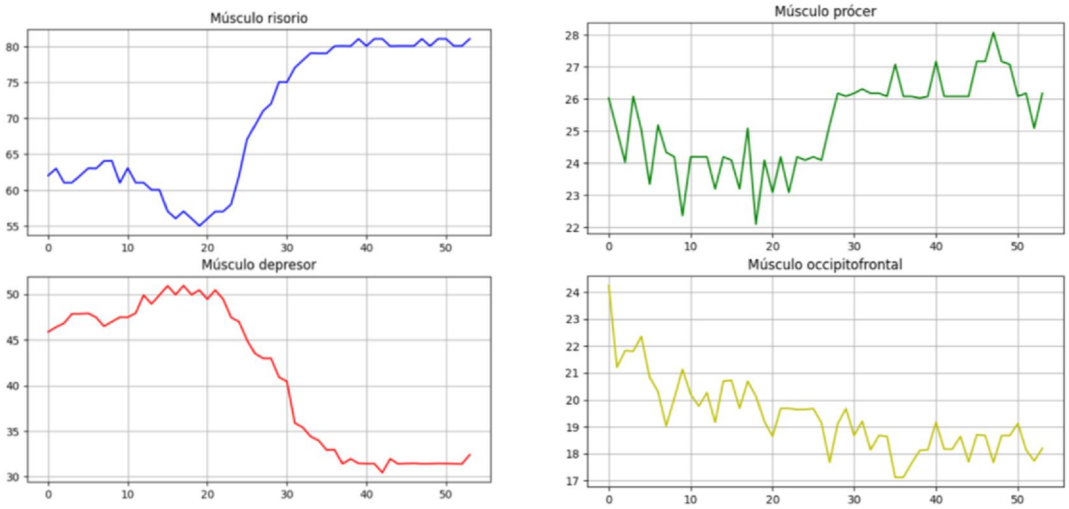
El resultado fue Boca=01, cejas= 00 Ojos= 01. Es decir, el primer digito es cero ya que está en estado neutro, al comenzar a reír la mayoría de los sectores están 0 a excepción del músculo risorio que se encuentra en el sector 1 afectando boca y ojos.

Boca

En la gráfica de la figura 6(a) se observa el movimiento del músculo risorio. La grafica indica que a mayor distancia se pronuncia más la sonrisa, ya que al tensarse el músculo la distancia entre esos puntos aumenta; lo que provoca un incremento bruco en la distancia; que significa una sonrisa pronunciada. Caso contrario para el músculo depresor donde a mayor distancia el sujeto tendrá una cara seria o triste. Se observa en las gráficas una rotación de π radianes.

Cejas

En el músculo prócer, a menor distancia, las cejas se juntan más y viceversa. En la gráfica de la figura 6(b) hay poco movimiento y por lo tanto no hay cambio significativo. Para el músculo occipitofrontal, a menor distancia, bajan más las cejas y viceversa. Se observa en la gráfica una caída lenta de la señal; tampoco hay un cambio brusco en las cejas, pero existe un descenso.



a) b)

Figura 6. a) Grafica lineal para los músculos risorio y depresor b) Gráfica lineal para los músculos prócer y occipitofrontal.

Dispersión

En la figura 7 se observar la dispersión de los datos con respecto a la media. Se ve cuán explícita fue la expresión, lo que significa que mientras más dispersos de la media estén, el sujeto es más expresivo y mientras más cercanos a la media, el sujeto tiene poco movimiento facial o no tuvo muchas expresiones; una persona que se mantiene todo el tiempo con una cara constante da un indicio de tristeza, desinterés o depresión.

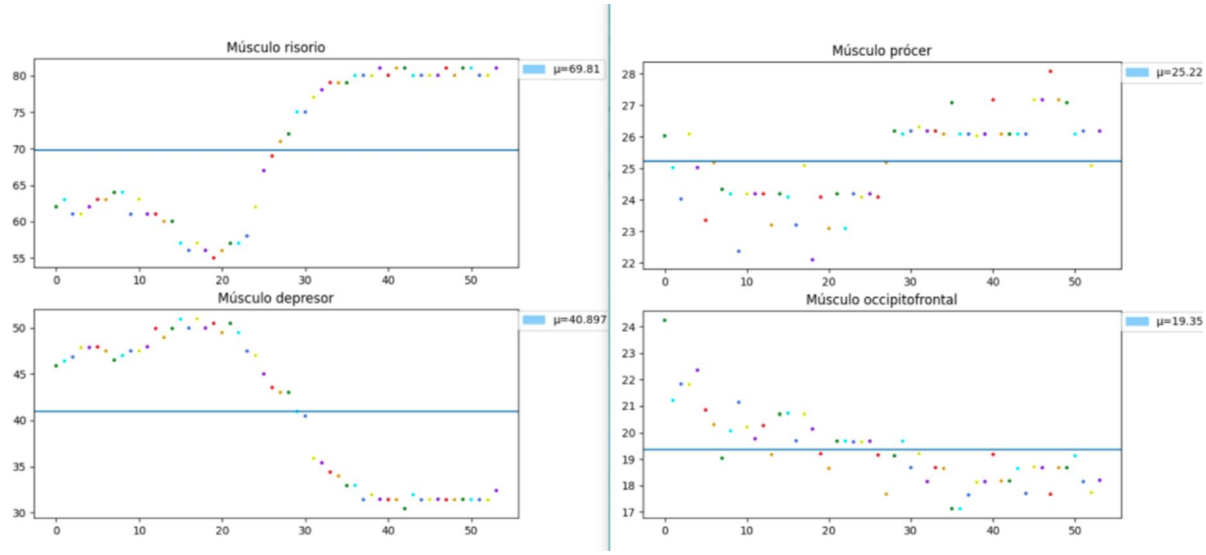


Figura 7. Dispersión de datos con respecto a la media.

En la figura 8 se muestra una gráfica de barras de la varianza. Cuando esta tiende a cero significa que los datos están muy pegados a la media, esto quiere decir que no se obtuvo gran movimiento en ese sector. Se interpreta que no hubo mucho movimiento en la sección de las cejas, pero si en parte de la boca.

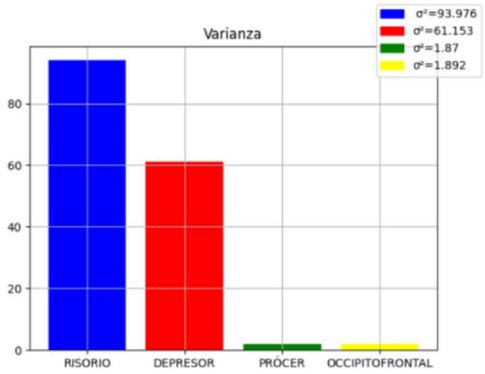


Figura 8. Gráfica de barras de la varianza

Comparamos los datos de la primera muestra con la segunda, para ver con más a detalle en que sectores se tiene un caso positivo o negativo.
Finalmente se consigue una gráfica araña y circular con los resultados obtenidos de la prueba; para el caso de ejemplo, se obtuvo un 80% de resultados negativos por lo que no se detectó tristeza en la prueba. Ver figura 9.

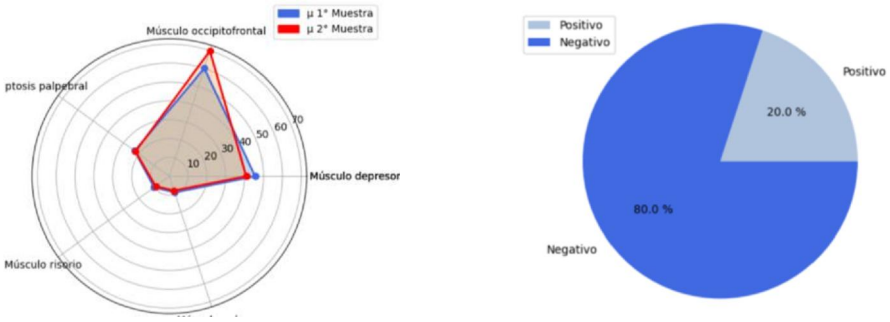


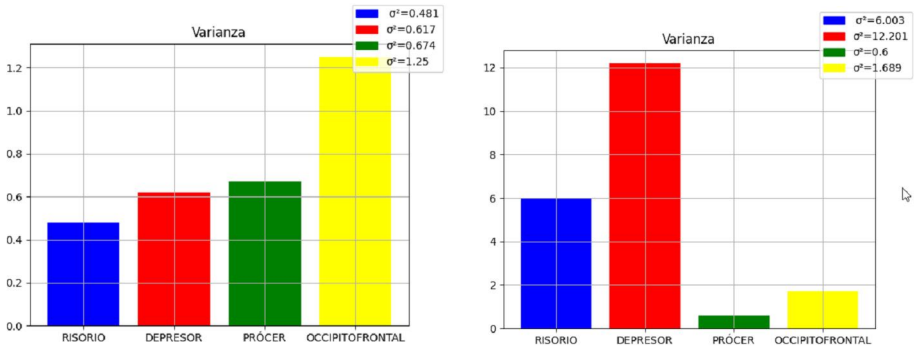
Figura 9. Grafica de araña comparando las medias.

Pruebas en personas con tristeza

Para las pruebas se buscó personas que se encontraban en estado de tristeza. Así que se les realizo una prueba diferente para cada uno. Se presentan algunos ejemplos:

Para la primera prueba se grabó al sujeto y se le cuestiono con respecto a cosas muy triviales por lo que no se esperaba que diera algún indicio de tristeza. Como se observa en la figura 10(a) las varianzas, tienden a cero, lo que refleja poca movilidad de los músculos; es decir que el sujeto se mantuvo serio toda la sesión. No se tuvo muchas expresiones relevantes que pudieran indicar tristeza. Entonces se observa un 80% negativo para tristeza.

Para la segunda prueba, se les cuestionó sobre su vida y cómo se sentía, lo que reflejo la tristeza en su cara, dando así datos más certeros de su estado emocional. Se observa en la figura 10(b) que el sujeto fue más expresivo con la boca que con los otros sectores de la cara, específicamente en el músculo depresor, dando positivo a tristeza.



(a) (b)

Figura 11. Sujeto 1. Gráfica de varianza.

Claramente se pudo detectar la tristeza en la segunda prueba. En este caso para detectar la depresión, la persona tuvo que ser estimulada con algunas preguntas personales. Lo que se corrobora en la figura11 circular.

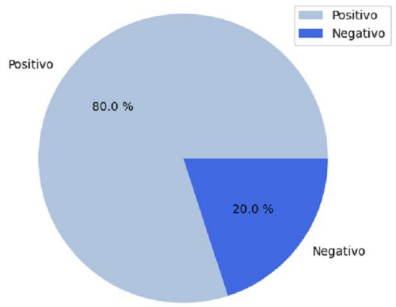


Figura 11. Prueba 2. Gráfica de circular

Por lo que se concluye con estas dos pruebas que no basta con solo observar al individuo, sino que también se tiene que tratar con algunas preguntas para realizar una predicción de la depresión con más certeza. Tal es el caso del proyecto de Jan [5], donde se desarrolló un sistema similar, pero que no cuenta con el apoyo de una prueba psicológica. Aquí se usó Montgomery-Asberg Depression Rating Scale, y el reconocimiento de expresiones faciales en intervalos de tiempo para poder analizar el estado del paciente.

El sistema cuenta con una página web para realizar el formulario de la métrica MADRS.

Se diseñó un estudio de cohortes, observacional, prospectivo y multicéntrico en pacientes clínicamente estables o inestables. Las escalas se administraron en la vista de inclusión en el estudio y en una segunda vista realizada a la semana, en el caso de pacientes estables o dos meses después en pacientes inestables. Se evaluaron la estructura factorial, la validez (convergente y discriminante), la fiabilidad (consistencia interna, estabilidad temporal y entre observadores

Se probó el sistema con 106 pacientes en centros de asistencia psiquiátrica. Se presentó una adecuada:

Validez discriminante (MADRS: Impresión Clínica Global de Gravedad: $p < 0,001$)

Validez convergente (MADRS: $p < 0,05$)
Consistencia interna (α de Cronbach: MADRS = 0,88);
La versión de esta métrica tiene las mejores propiedades psicométricas por lo que es apropiada para nuestro proyecto.
Al igual que en [10] se realizó la localización del stress, pero en el movimiento de los músculos, lo que permite no depender de la distancia a la cámara; y solo se reconoce si existe o no mientras que en [11] se realiza por niveles, lo que evita tener varios umbrales. Tampoco se usa la frecuencia cardiaca lo que permite mayor movilidad evitando stress provocado por el uso de artefactos. Usamos los FACS al igual que los artículos [13] [14] [15] al extraes los patrones musculares, pero nos valemos de puntos de interés que se puede obtener con diferentes técnicas, aquí se usó BRISK. Esto permite realizar un análisis con menor información que si se analiza toda la imagen.
Por último, se debe considerar que en este sistema se tomaron en cuenta movimientos de puntos, por lo que no es necesario una calibración previa de la cámara, además de que el análisis está en función del tiempo, lo que da un mejor diagnóstico.

Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se usará una diadema para medir ondas cerebrales y realizar la detección de la depresión. También resultaría de interés utilizar medir el stress mediante espectros no visibles como en [16].

Conclusiones

Se considerar a la depresión como un problema psicológico que impide a los individuos mantener una vida sana, así como hacer un uso pleno de las facultades y habilidades personales entre las relaciones sociales. Es relevante señalar que, cualquier persona puede padecerla sin saberlo. Por lo es necesario detectar a tiempo la enfermedad y llevar un seguimiento para mejorar su calidad de vida.
Utilizar esta herramienta (prototipo) para detectar el nivel de depresión permite al personal clínico realizar las pruebas necesarias y suficientes sin ser invasivo, para obtener un diagnóstico rápido y preciso; de manera que, facilite establecer un seguimiento por parte del especialista, incluso si no está presente, pero no debe olvidarse que para complementar la prueba es necesario dar un seguimiento.
Se debe aclarar que la aportación del trabajo es en la detección de la tristeza como factor que influye en la depresión, así como el implementar el fromualrio MADRS en una página web, como herramienta auxiliar, ya que el diagnóstico de la depresión debe dejarse a un psicólogo experto en el tema.
Las gráficas obtenidas permiten una visualización del estado emocional de la tristeza sobre todo en aquellas personas que han sufrido una perdida, ya sea material o sentimental como la muerte. Aquí se debe considerar los tiempos actuales donde ha habido una pandemia.

Agradecimientos

Los autores agradecen y reconocen el apoyo recibido por el IPN (Instituto Politécnico Nacional) para la realización del presente proyecto.

Referencias

[1] Botto, A., Acuña, J. E. C., & Jiménez, J. E. La depresión como un diagnóstico complejo: Implicancias para el desarrollo de recomendaciones clínicas. *Revista Médica De Chile*, *142*(10), 1297-1305, 2014.
[2] Thayer, R. E. The biopsychology of mood and arousal. *Choice Reviews Online*, *28*(03), 28-1830. Velayos, J.L. *Anatomía de la cabeza*. Ed. Médica Panamericana, 2014
[3] Ibor, M. I. L. Ansiedad y depresión, reacciones emocionales frente a la enfermedad. *Anales de medicina interna*, *24*(5), 2007.
[4] Agudelo, D., Buela-Casal, G., & Spielberger, C. D. Ansiedad y depresión: el problema de la diferenciación a través de los síntomas. *Salud Mental*, *30*(2), 33-41, 2007.
[5] Jan, A., Meng, H., Gaus, Y. F. A., Zhang, F., & Turabzadeh, S. *Automatic Depression Scale Prediction using Facial Expression Dynamics and Regression*, 2014.
[6] Nasir, Jati, A., Shivakumar, P. G., Chakravarthula, S. N., & Georgiou, P. G. (2016). *Multimodal and Multiresolution Depression Detection from Speech and Facial Landmark Features, 2016*.

[7] Yin, S., Liang, C., Ding, H., & Wang, S. *A Multi-Modal Hierarchical Recurrent Neural Network for Depression Detection*. 2019.
[8] Scherer, S., Stratou, G., & Morency, L. *Audiovisual behavior descriptors for depression assessment*, 2013
[9] Francese, R., & Attanasio, P. (2021). *Supporting Depression Screening with Multimodal Emotion Detection*, 2021.
[10] B. H. Prasetio, H. Tamura and K. Tanno, "The facial stress recognition based on multi-histogram features and convolutional neural network",*2018 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, pp. 881-887, 2018.
[11] M. Pediaditis, G. Giannakakis, F. Chiarugi, D. Manousos, A. Pampouch-idou, E. Christinaki, G. Iatraki, E. Kazantzaki, P. G. Simos, K. Marias et al., "Extraction of facial features as indicators of stress and anxiety",*2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 3711-3714, 2015.
[12] G. Giannakakis, M. Pediaditis, D. Manousos, E. Kazantzaki, F. Chiarugi, P. G. Simos, et al., "Stress and anxiety detection using facial cues from videos",*Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 31, pp. 89-101, 2017.
[13] P.A Friesen Ekman and W.V.,*The facial action coding system (book review)*, pp. 251, Jan 1979.
[14] C. Viegas, S.-H. Lau, R. Maxion and A. Hauptmann, "Towards indepen-dent stress detection: A dependent model using facial action units",*2018 International Conference on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI)*, pp. 1-6, 2018.
[15] M. Gavrilescu and N. Vizireanu, "Predicting depression anxiety and stress levels from videos using the facial action coding system",*Sensors*, vol. 19, no. 17, pp. 3693, 2019.
[16] P. Yuen, K. Hong, T. Chen, A. Tsitiridis, F. Kam, J. Jackman, D. James, M. Richardson, L. Williams, W. Oxford et al.,*Emotional & physical stress detection and classification using thermal imaging technique*, 2009.
[17] Pons, C., Giandini, R. S., & Pérez, G. T. Desarrollo de software dirigido por modelos. En *Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP) / McGraw-Hill Educación eBooks*, 2010.
[18] Agrawal, S., & Khatri, P. (2015). *Facial Expression Detection Techniques: Based on Viola and Jones Algorithm and Principal Component Analysis*, 2015.
[19] Velayos, J.L. *Anatomía de la cabeza*. Ed. Médica Panamericana, 2014
[20] Jaramillo, Q (2017). Músculos mímicos. *Repositorio Institucional. Universidad Inca Garcilaso de la Vega. http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/1925*
[21] Rodríguez, J. M., & Noda, I. M. Técnica de fijación frontal en cirugía de ptosis palpebral mediante banda de silicona. *Revista Médica Electrónica*, *40*(6), 2140-2155, 2018.
[22] Corneanu, C. A., Madadi, M., & Escalera, S. Deep Structure Inference Network for Facial Action Unit Recognition. En *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 309-324). Springer Science+Business Media, 2018.
[23] Guédat, C., Stergiopulos, O., Kiliaridis, S., & Antonarakis, G. S. (2021). Association of masseter muscles thickness and facial morphology with facial expressions in children. *Clinical and experimental dental research*, 2021.
[24] Leutenegger, S., Chli, M., & Siegwart, R. *BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints*, 2011.
[25] Romero, R; Gallegos, F, Romero, J. Video Analysis with Faces using Harris Detector. Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Volume 10 Issue 8, 2019
[26] Chen, T. Pythagorean fuzzy linear programming technique for multidimensional analysis of preference using a squared-distance-based approach for multiple criteria decision analysis. *Expert Systems With Applications*, *164*, 2021.
[27] Salem, E. A., Hassaballah, M., Mahmoud, M. M., & Ali, A. E. A. Facial Features Detection: A Comparative Study. En *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 402-412). Springer Nature, 2021
[28] Hengartner, M. P., Jakobsen, J. C., Sørensen, A., & Plöderl, M. Efficacy of new-generation antidepressants assessed with the Montgomery-Asberg Depression Rating Scale, the gold standard clinician rating scale: A meta-analysis of randomised placebo-controlled trials. *PLOS ONE*, *15*(2), e0229381, 2020.

Índices factoriales de competitividad, mercadeo y capital humano de las prácticas administrativas en mype suburbanas

Luis Carlos Ortuño-Barba[*]*, Armando Heredia-González, Renato E. Ortiz-Saucedo, Ninivet S. Chiñas-Álvarez*
Departamento de Ciencias Económico-Administrativas
Tecnológico Nacional de México / IT Tehuacán
[*]*luiscarlos.ob@tehuacan.tecnm.mx*

***Área de participación**: Ingeniería Administrativa*

Resumen

Este artículo ofrece indicadores de adopción a prácticas administrativas generalmente aceptadas por micro y pequeñas empresas de municipios suburbanos selectos del Valle de Tehuacán que permiten monitorear la operación de este tipo de entidades. Se emplea Análisis de Componentes Principales y Análisis Factorial exploratorio para obtener indicadores estadísticamente sólidos. Se extraen once factores compuestos, no correlacionados entre sí, que miden el grado de adopción de prácticas administrativas de mercadotecnia, dirección, recursos humanos e innovación; estos factores muestran la posición relativa de cada empresa, de los sectores económicos involucrados y de los municipios. Los indicadores propuestos permiten al investigador determinar el grado de adopción y plantear correlaciones con otras métricas de desempeño y de operación.

***Palabras clave**: Competitividad, índice, mype, prácticas administrativas,*

Abstract

This article offers indicators of adoption of administrative practices generally accepted by micro and small businesses in selected suburban municipalities of the Tehuacan Valley that allow monitoring the operation of this type of entity. Principal Components Analysis and Exploratory Factor Analysis are used to obtain statistically sound indicators. Eleven composite factors are extracted, not correlated with each other, which measure the degree of adoption of administrative practices of marketing, management, human resources and innovation; These factors show the relative position of each company, of the economic sectors involved and of the municipalities. The proposed indicators allow the researcher to determine the degree of adoption and establish correlations with other performance and operation metrics.

***Key words**: Administrative practices, Competitiveness, Index, Mype*

Introducción

Las micro y pequeñas empresas típicamente muestran un desconocimiento de la importancia de la administración formal para llevar a cabo sus operaciones, ya que solo se basan en el hecho de que esta funcione y les dé ganancias, pero parecen soslayar el impacto de estas herramientas para que su empresa funcione de una manera más coordinada y eficiente.

Lo anterior genera el cuestionamiento ¿cuáles son las prácticas administrativas generalmente aceptadas que pueden incluirse en un índice que refleje de manera estadística el mejor comportamiento posible en las áreas de competitividad, mercadeo y capitla humano?

Las micro y pequeñas empresas, también conocidas como Mype, son empresas compuestas por un número reducido de trabajadores y con un moderado volumen de facturación, cumplen un importante papel en la economía de todos los países y México no es la excepción, no sólo por sus aportaciones a la producción y distribución de bienes y servicios, sino también por su capacidad de cambiar rápidamente su estructura productiva.

Todo tipo de empresas requiere obtener beneficios del entorno y de sus propios componentes, distintos autores utilizan el término de ventaja competitiva relacionado generalmente con Porter [1]. La ventaja competitiva resulta principalmente del valor que una empresa es capaz de crear para sus compradores o clientes.

La gestión del talento humano, administración del recurso humano o manejo del talento humano es considerada una unidad estratégica dentro de las organizaciones y es un elemento a considerar en la generación de ventaja competitiva al reconocer la importancia de sus componentes como reclutamiento, selección, contratación, capacitación, desarrollo y evaluación, así como las prácticas emergentes: liderazgo, motivación, trabajo en equipo, conocimiento y emprendimiento, entre otras.

Las empresas se enfocan primordialmente en la importancia que tiene el cliente para la proyección de su negocio, por lo que guían su atención hacia la satisfacción de las necesidades y expectativas de los clientes, de esta manera los consumidores dan mayor importancia a algunos atributos intangibles de los productos que consumen: los servicios y el contexto en el que se prestan, así, la mercadotecnia y las prácticas relacionadas con la promoción, el producto y el precio, entre otras, resultan muy importantes para las mype.

Las actividades de innovación constituyen, junto con el capital humano, uno de los principales factores que determinan las ventajas competitivas de las economías industriales avanzadas y emergentes como la mexicana. En palabras de Porter, la única ventaja competitiva sostenible es la innovación permanente, por eso resulta esencial fijar la atención en la forma en que los procesos de innovación son gestionados en el seno de la organización. La innovación en procesos, productos y empaques constituyen un área de oportunidad para las mype, sobre todo en aquellas de municipios suburbanos.

El objetivo del presente manuscrito es mostrar la metodología y resultados en la construcción de índices y subíndices que concentran las prácticas administrativas generalmente aceptadas por las micro y pequeñas empresas de municipios suburbanos selectos del Valle de Tehuacán, en el estado mexicano de Puebla, de acuerdo con información recabada *in situ*.

Metodología

Población, muestra y datos

De acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [2], el número de micro y pequeñas empresas en los municipios suburbanos seleccionados del Valle de Tehuacán: Chilac (1,406), Zinacatepec (1,575) y Zapotitlán (422) es de 3,403 unidades económicas, considerando un margen de error del 5%, el tamaño mínimo muestral, que es de 346 negocios, fue calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N}{1 + \frac{e^2\,(N-1)}{z^2\,(pq)}}$$

Donde:

n = es el tamaño mínimo muestral
N = es el tamaño conocido de la población
pq = es la varianza de la población (0.25)
Z = es el nivel de confianza al 95% (1.96)
e = error tolerable (5%)

Sustitución:

$$n = \frac{3{,}403}{1 + \frac{(0.05)^2\,(3{,}403-1)}{(1.96)^2\,(0.25)}} = 346$$

El estudio utiliza información de corte transversal obtenida de la aplicación de un cuestionario a una muestra de 443 micro y pequeñas empresas (mype), los ítems que miden las prácticas administrativas se presentan en escala de Likert por lo que dichas variables son cualitativas ordinales ya que, aunque están codificadas con valores

numéricos, no son números verdaderos; de igual manera el instrumento incluye variables cuantitativas discretas particularmente para los datos relacionados con las cantidades de trabajadores, antigüedad de la empresa y edades de los directores. Del cuestionario se emplean 51 variables distribuidas en secciones identificadas con distintos grupos de prácticas administrativas, a saber: recursos humanos (9 ítems), mercadotecnia (11), ventaja competitiva (6), administración estratégica (6) e innovación (8); incluye también 11 ítems relacionados con la identificación y características de las empresas. La aplicación de los cuestionarios en los municipios suburbanos se realizó de manera presencial a los directores -mujeres y hombres- de las unidades económicas, se considera que el director es la persona que toma las principales decisiones para la marcha del negocio. Las respuestas fueron capturadas por los encuestadores en formularios de Google y los datos transferidos a hoja de cálculo se revisaron y validaron, los cuestionarios con cinco o más ítems inválidos fueron eliminados. Las preguntas fueron formuladas para conocer la operación de la mype durante el último año hasta la fecha de aplicación de la encuesta, es decir, los datos son relativos al periodo transcurrido entre abril de 2021 y marzo de 2022.

Se llevó a cabo al análisis de fiabilidad que permite estudiar las propiedades de las escalas de medición y de los elementos que las componen mediante el estadístico Alfa (Cronbach) y se muestran en la Tabla 1, lo que permite verificar la consistencia interna con base en la correlación entre elementos promedio [3].

Tabla 1. Resumen de estadísticas de fiabilidad a ítems del cuestionario aplicado

Componente	Alfa de Cronbach	Número de ítems
Cuestionario completo	0.822	51
Recursos humanos	0.852	9
innovación	0.793	8
Mercadotecnia	0.697	11
Dirección	0.687	6
Ventaja competitiva	0.732	6

Elaboración propia. Datos recolectados y analizados en IBM SPSS

Se considera que los valores obtenidos para el estadístico Alfa de Cronbach denotan una adecuada consistencia interna de la escala utilizada ya que los mínimos obtenidos son muy cercanos a 0.700 y, los máximos, no sobrepasan 0.900 por lo que se considera que no hay redundancia o duplicación [4].

Estadística descriptiva

Micro y pequeñas empresas estudiadas

Las micro y pequeñas empresas estudiadas muestran un comportamiento similar en todos los municipios, de acuerdo con la Tabla 2, el 59.2% de las unidades económicas realiza actividades de comercio y solo alrededor del 5% actividades agropecuarias, la segunda actividad en importancia son los servicios. Como puede apreciarse, la vocación hacia la manufactura no tiene un impacto significativo. El sector primario emplea a 148 trabajadores (48.6% mujeres), las empresas de manufactura a 569 (43.8% mujeres). El sector comercio genera 906 plazas laborales (52.1% mujeres), y los servicios emplean a 341 personas de las cuales el 57.2% son mujeres. De los negocios de la muestra el 16.2% tienen hasta dos años de antigüedad, el 36.5% de tres a siete años, 20.5% de 8 a 14 años y el 26.8% de 15 años en adelante; el municipio de Chilac es el que presenta mayor proporción de empresas de creación recientes y Zinacatepec es el que concentra mayor proporción de empresas consolidadas en el tiempo.

La mayoría de las empresas no están registradas ante el Servicio de Administración Tributaria y se identifican en segunda sección de la Tabla 2 con los conceptos PF sin RFC y Unión, de aquellas empresas que si cuentan con Registro Federal de Contribuyentes, la mayoría tributa bajo el esquema de Persona Física con Actividades Empresariales

Tabla 2. Estadísticos descriptivos selectos relacionados a la micro y pequeña empresa estudiada

		Casos y (%) por municipio									
		Chilac		Zinacatepec		Zapotitlán		Otros		Total	
Variable	**Dimensión**	**n**	**%**	**n**	**%**	**n**	**%**	**n**	**%**	**n**	**%**
Sector	Primario	6	3.5%	13	9.9%	3	2.2%	0	0.0%	22	4.9%
	Manufactura	25	14.7%	24	18.3%	18	13.4%	3	33.3%	70	15.8%
	Comercio	110	64.7%	70	53.4%	78	58.2%	5	55.6%	263	59.2%
	Servicios	29	17.1%	24	18.3%	35	26.1%	1	11.1%	89	20.1%
	Totales	170	100%	131	100%	134	100%	9	100%	444	100%
Personalidad	PM	11	6.5%	15	11.5%	10	7.5%	0	0.0%	36	8.1%
jurídico - fiscal	PF sin RFC	115	67.6%	89	68.5%	78	58.2%	5	55.6%	287	64.6%
	Unión	4	2.4%	6	4.6%	6	4.5%	0	0.0%	16	3.6%
	PF empresa	29	17.1%	15	11.5%	29	21.6%	4	44.4%	78	17.6%
	RIF	9	5.3%	4	3.1%	11	8.2%	0	0.0%	24	5.4%
	PF profesional	2	1.2%	1	0.8%	0	0.0%	0	0.0%	3	0.7%
	Totales	170	100%	130	100%	134	100%	9	100%	444	100%

Notas. PM.- Persona Moral; PF sin RFC.- Un propietario sin registro fiscal; Unión.- Varios dueños sin registro fiscal; PF empresa.- Persona Física del régimen de actividades empresariales; RIF.- Régimen de Incorporación Fiscal; PF profesional.- Persona Física del régimen de actividades profesionales

Elaboración propia. Datos recolectados y analizados en IBM SPSS

Perfil sociodemográfico del director de la mype

El 29.7% de los directores no cuentan con educación básica concluida, el 27% terminaron hasta la educación secundaria, el 29.3% concluyó la educación media superior, el 13.5% de los directores concluyó estudios de técnico superior universitario, licenciatura o ingeniería y solo el 5% manifiestan haber terminado estudios de posgrado. Los datos de la edad de los directores muestran una distribución normal: 8.1% tiene entre 17 y 24 años, 19.4% entre 25 y 34, 25.7% manifestó tener entre 35 y 44 años, el mayor porcentaje (29.1%) está representado por el rango de entre 45 y 54 años, 63 directores tienen de 55 a 64 años y el 4.6% es mayor de 65, la edad máxima encontrada es de 80 años.

El 44.8% de las personas que toman la mayor parte de las decisiones en las empresas estudiadas son del sexo femenino y el resto masculino. El 58.6% de los directores están casados, el 12.2% se encuentran en unión libre, el 17.6% son solteros y el resto se distribuye entre distintas formas de personas solas o sin relación manifiesta.

Extracción de componentes de prácticas administrativas

El objetivo de este artículo es proponer indicadores de prácticas administrativas llevadas a cabo por micro y pequeñas empresas de municipios suburbanos, los indicadores son intuitivos y sólidos a partir de datos obtenidos de la aplicación de un instrumento de recolección de datos válido y confiable. Aunque el análisis de las variables contenidas en los ítems del cuestionario puede ser útil para describir empíricamente los usos administrativos empresariales, es importante considerar métodos estadísticos que coadyuven a compactar los atributos agregados de las prácticas administrativas identificadas en la literatura. Muchas de las variables pueden incluir características similares, de modo que es prudente utilizar un método que agrupe naturalmente estas variables en conjuntos de atributos más reducidos sin perder la representatividad de los ítems del instrumento de recolección.

Análisis multivariado

El análisis de componentes principales (ACP) y el análisis factorial (AF) son aplicados en este estudio como método de extracción de datos para generar índices compuestos con la finalidad de evaluar el grado de aplicación de las prácticas administrativas generalmente aceptadas.

El ACP es un método geométrico de carácter descriptivo que busca encontrar la estructura que subyace en un conjunto de individuos estudiados (*n*), en este caso micro y pequeñas empresas bajo un conjunto de variables cuantitativas (*p*). El comportamiento estadístico de los datos, la correlación entre variables y la distancia de cada una de ellas respecto a las medias nos permitirán encontrar la estructura subyacente de las prácticas administrativas generalmente aceptadas en las mype estudiadas.

Considerando la estructura subyacente de los datos de prácticas administrativas, se emplea un procedimiento matemático (AF) que reduce sustancialmente la dimensión de *p* con lo que se genera un nuevo conjunto de variables denominados factores y que, a pesar de ser un número pequeño, permite explicar la variabilidad común encontrada en un grupo de empresas en las que se observaron las *p* variables originales. El ACP y AF son procedimientos complementarios, ya que el ACP se utiliza en la obtención de factores comunes, etapa del AF [5].

De acuerdo con lo anterior, un objetivo del ACP es minimizar la información multivariada original a unos cuantos factores para determinar asociaciones entre variables y observaciones y, de esa manera, revelar grupos específicos de prácticas administrativas (factores) con comportamiento similar, independiente de la variabilidad de los datos que los explican, de esta manera, los factores se utilizarán como insumo en el AF para generar los índices [6].

Análisis exploratorio de factores

El método de AF puede ser exploratorio o confirmatorio, en este artículo, el AF se emplea como herramienta exploratoria para mostrar la relación entre las variables y los factores resultantes. Los resultados del método manifiestan un conjunto de factores comunes, su significado emana de las cargas o saturaciones factoriales que constituyen correlaciones de Pearson entre los ítems y los factores resultantes, esta carga informa cuál es la relación que cada ítem sostiene con cada uno de los factores extraídos [7].

En la solución final para la propuesta de factores se utiliza un proceso de rotación en la búsqueda de soluciones interpretables sin cambiar las propiedades matemáticas. En este procedimiento las variables integran subconjuntos asociados cada uno a un factor único. El método de rotación ortogonal empleado fue Varimax lo que permite hallar factores que puedan generalizarse. Para una interpretación intuitiva de este método de rotación, así como Quartimax y métodos oblicuos, se puede acudir a [8].

Resultados y discusión

Extracción de factores

La Tabla 3 muestra los valores propios de los componentes encontrados y la proporción de la varianza explicada. El criterio de Kaiser sugiere elegir el número de componentes con valores propios mayores a uno, de esta manera se eligieron 11 factores que en conjunto explican 62.09% de la varianza de los datos de las prácticas administrativas empleadas por las micro y pequeñas empresas.

Una vez identificados estos indicadores compuestos, se utiliza el método de AF para calcular las cargas individuales para cada uno de los 11 factores que componen el estudio. Las cargas máximas se determinan mediante el método de rotación Varimax y se arreglan conforme con su importancia relativa.

Se observa que las variables que dominan al primer factor se relacionan con las características de los empleados y de su relación con el propietario del negocio incluyendo el hecho de que se compartan de manera grupal la visión y misión de la organización, debido a lo anterior a este factor se le denominará capital humano (CAPHUM).

El segundo factor está integrado por variables asociadas al desarrollo de nuevos productos, procesos y empaques entre otros, así como el hecho de que la dirección de la empresa considera necesario elaborar un plan estratégico, por lo que a este factor se le denomina desarrollo (DESARR).

Tabla 3. Componentes principales de las prácticas administrativas de las micro y pequeñas empresas

Componente	Valor propio	Varianza	Varianza acumulada
1	4.433	0.11083	0.11083
2	4.121	0.10302	0.21385
3	3.192	0.07980	0.29365
4	2.167	0.05417	0.34783
5	1.970	0.04924	0.39707
6	1.631	0.04077	0.43784
7	1.604	0.04010	0.47794
8	1.545	0.03863	0.51657
9	1.434	0.03586	0.55243
10	1.413	0.03532	0.58775
11	1.327	0.0317	0.62091

Elaboración propia. Datos recolectados y analizados en IBM SPSS

El tercer factor está compuesto por variables relacionadas a la manera en la que los directores consideran que su negocio obtiene ventaja competitiva al incluir variables como precio, calidad y trato entre otros además de un componente relacionado con el enfoque en el servicio como refuerzo. A este factor se le denomina ventaja competitiva (VENCOM).

El cuarto factor denominado mercadotecnia (MERCAD) incluye aspectos como la asistencia a congresos relacionados con el giro del negocio, prácticas de publicidad, inclusión de marca propia y aspectos de fidelización de la clientela.

El quinto factor se denomina adecuación al entorno (ADENTO) debido a que incluye variables como el análisis del entorno de la empresa, la determinación de la ubicación de los salarios ofrecidos y la práctica empírica antes de la implantación de estrategias.

La innovación al considerar la participación de empleados y de clientes, así como el reconocimiento de un enfoque en la busca de nuevas prácticas marca al sexto factor (INNOVA).

El séptimo factor incluye variables relacionadas con la tarea de ventas y su enfoque al mayoreo, al otorgamiento de crédito como herramienta de colocación de productos además del poder de negociación de los clientes, se denomina ventas (VENTAS).

La fuerza del mercado se valora en el factor denominado mercado (MERCAD) al detectar la percepción del impacto de los precios de mercado como referente para determinar los propios, así como la confianza en el mercado en lugar de realizar planeación estratégica.

La evaluación del desempeño de los empleados y la definición de objetivos estratégicos dan lugar al noveno factor (EVALUA), el décimo factor cuantifica el impacto del enfoque detallista (DETALL) en el negocio y el último factoriza la percepción de la fortaleza de la competencia (COMPET).

Obtención de factores de adopción de prácticas administrativas

El puntaje relativo por empresa para cada uno de los once indicadores de adopción de las prácticas administrativas generalmente aceptadas se obtiene al aplicar la suma producto entre las cargas factoriales y el

valor específico de cada variable reportado en el cuestionario de cada empresa, de esta manera se obtiene el puntaje anual para cada unidad económica que es multiplicado por el factor de 3.4582 para generar una valoración con base 10 en la que es el máximo puntaje posible en el caso de adoptar satisfactoriamente todas las prácticas administrativas generalmente aceptadas.

Indicador de adopción de prácticas administrativas generalmente aceptadas

El ejercicio anterior desemboca en indicadores individuales de adopción a las prácticas administrativas generalmente aceptadas. El puntaje que obtiene cada empresa y cada sector en promedio al considerar el promedio ponderado por la contribución de la varianza individual de cada factor.

Los factores extraídos pueden agruparse, de manera natural, para examinar atributos de adopción particulares a la dinámica de los negocios como el Capital humano, la Competitividad y el Mercadeo, de acuerdo con la integración que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Integración de indicadores de adopción de prácticas administrativas generalmente aceptadas

Subíndice		
Capital humano	**Competitividad**	**Mercadeo**
Talento humano	Desarrollo	Mercadotecnia
Evaluación	Ventaja competitiva	Ventas
	Adecuación al entorno	Mercado
	Innovación	Enfoque detallista
	Competencia	

Elaboración propia

Tabla 5. Índices promedio por sector

		Subíndices		
Sector	**Índice global**	**Capital Humano**	**Competitividad**	**Mercadeo**
Máximo alcanzable	*10.00*	*3.12*	*5.41*	*1.46*
Primario				
Promedio del sector	7.01	2.73	3.43	0.85
Máximo de la muestra	*10.00*	*3.12*	*5.41*	*1.46*
Mínimo de la muestra	*3.68*	*1.49*	*0.95*	*0.50*
Desviación estándar	*1.87*	*0.50*	*1.38*	*0.30*
Manufactura				
Promedio del sector	6.79	2.62	3.30	0.87
Máximo de la muestra	*10.00*	*3.12*	*5.41*	*1.46*
Mínimo de la muestra	*2.27*	*0.35*	*0.00*	*0.00*
Desviación estándar	*1.80*	*0.58*	*1.30*	*0.38*
Comercio				
Promedio del sector	5.95	2.41	2.78	0.75
Máximo de la muestra	*10.00*	*3.12*	*5.41*	*1.46*
Mínimo de la muestra	*0.28*	*0.00*	*0.22*	*0.00*
Desviación estándar	*2.00*	*0.96*	*1.14*	*0.35*
Servicios				
Promedio del sector	6.34	2.53	3.06	0.75
Máximo de la muestra	*9.84*	*3.12*	*5.26*	*1.46*
Mínimo de la muestra	*1.51*	*0.00*	*1.19*	*0.00*
Desviación estándar	*1.91*	*0.88*	*1.16*	*0.30*

Elaboración propia. Datos recolectados y analizados en IBM SPSS

La Tabla 5 muestra los promedios por cada uno de los sectores económicos considerados en el estudio, el número de empresas incluidas en cada sector es como sigue: primario 23, manufactura 72, comercio 264 y sector

de servicios 94. Se aprecia que el sector que genera un conjunto de índices promedio más robusto es el primario, seguido por el de manufactura, es relevante que el promedio del sector que más refleja la vocación económica de los municipios suburbanos muestreados, el sector comercial, sea el que obtiene los índices más bajos. Se aprecia una desviación estándar similar en los sectores lo que indica coherencia en la dispersión de los datos obtenidos mediante la aplicación de los cuestionarios y manejados tanto en hoja de cálculo como en el programa estadístico.

Los datos recolectados permiten hacer comparaciones por municipios, al considerar cada uno de los 11 factores generados, así como de los subíndices y el índice global. La Tabla 6 muestra la intensidad con la que las micro y pequeñas empresas locales, desarrollan las diferentes dimensiones de las prácticas administrativas generalmente aceptadas. Para determinar los promedios, la cantidad de empresas consideradas por municipio son como sigue: Zapotitlán 138, Chilac 171 y Zinacatepec 135; de igual manera se aplicaron 9 encuestas en municipios diferentes. Impulsado por el subíndice de Competitividad, el municipio de Zinacatepec, destaca en el índice global.

Tabla 6. Índices promedio por municipio

		Subíndices		
Municipio	**Índice global**	**Capital Humano**	**Competitividad**	**Mercadeo**
Máximo alcanzable	*10.00*	*3.12*	*5.41*	*1.46*
Zapotitlán				
Promedio del municipio	6.05	2.47	2.78	0.80
Máximo de la muestra	10.00	3.12	5.41	1.46
Mínimo de la muestra	0.28	0.00	0.28	0.00
Desviación estándar	1.86	0.82	1.12	0.34
Chilac				
Promedio del municipio	5.91	2.44	2.74	0.73
Máximo de la muestra	10.00	3.12	5.41	1.46
Mínimo de la muestra	1.08	0.00	0.00	0.00
Desviación estándar	1.93	0.92	1.15	0.34
Zinacatepec				
Promedio del municipio	6.73	2.55	3.38	0.80
Máximo de la muestra	10.00	3.12	5.41	1.46
Mínimo de la muestra	1.50	0.00	1.07	0.00
Desviación estándar	[9]2.05	0.88	1.24	0.35
Otros municipios				
Promedio de los municipios	6.66	2.53	3.26	0.87
Máximo de la muestra	8.57	3.12	4.59	1.46
Mínimo de la muestra	2.60	0.00	1.83	0.32
Desviación estándar	1.81	1.04	1.00	0.40

Elaboración propia. Datos recolectados y analizados en IBM SPSS

Un índice que concentra información múltiple puede construirse de manera simple al cuantificar las unidades empleadas en el instrumento de recolección de datos, o de modo ponderado al evaluar el impacto relativo o importancia de cada medida, algunos investigadores afirman que lo índices no ponderados reducen la subjetividad [9] y que para generar un índice ponderado se requiere una evaluación subjetiva del peso de cada elemento [10], el índice presentado en este manuscrito fue desarrollado de manera objetiva siguiendo métodos estadísticos reconocidos.

La metodología utilizada que incluye ACP y AF ha sido empleada con éxito en la medición de variables relacionadas con las ciencias sociales, por ejemplo, para la medición de componentes de las finanzas públicas en México [6]. La asignación de la carga factorial y ponderación ha sido utilizada con éxito en la construcción de índices de gobierno corporativo como lo demuestran [11] y empleado para la correlación y causalidad en [12].

La medición de prácticas y habilidades administrativas, así como la construcción de índices relacionados es una práctica común en distintos niveles de empresas de acuerdo con lo señalado por Ryan [13] que han sido utilizados en la búsqueda de asociaciones con distintos temas como el éxito administrativo, opciones de remuneraciones a directivos [14] y de retorno a los accionistas [15].

Trabajo a futuro

Para fortalecer esta línea de investigación es importante buscar la asociación o correlación entre variables relacionadas con la empresa como nivel de ventas, contratación de nuevos empleados o colaboradores, antigüedad y el nivel de utilidades, así como con aquellas relacionadas con las características de los directores como edad y formación escolar y académica entre otras. Para determinar la correlación es posible utilizar el procedimiento estadístico propuesto por Pearson así como, de manera alternativa, emplear el procedimiento de autoregresión de vector de panel (PVAR); de forma complementaria se sugiere aplicar pruebas de causalidad de Granger u otras pertinentes.

De igual manera es recomendable asociar las prácticas administrativas concentradas en los factores e índices del presente estudio con prácticas identificadas como financieras que son orientadas y desarrolladas por los mismos directores de las micro y pequeñas empresas.

Conclusiones

Este artículo parte del concepto de prácticas administrativas y de la necesidad de generar herramientas que permitan monitorear y medir de manera coherente el desempeño de las micro y pequeñas empresas en general y de municipios suburbanos, en particular. La evaluación del grado de adopción de las mype a las prácticas administrativas generalmente aceptadas pudiera ser una práctica común que oriente la actuación y operación de los directores de empresas, de tal manera que permita la comparabilidad entre empresas y sectores económicos.

Empleando técnicas de análisis multivariado, en este trabajo se generan once factores que explican el 62% de la variabilidad estadística observada en la adopción de prácticas administrativas seleccionadas. Este método de extracción de factores permite establecer una clasificación de mype por sector económico y municipio mostrando la posición relativa en un año calendario.

El resultado final es el índice de Adopción a las Prácticas Administrativas Generalmente Aceptadas (ADOPRAC) el cual, al emplear la aportación de varianza individual, pondera los indicadores particulares de adopción.

Además de los once componentes señalados, es evidente que los factores pueden agruparse a su vez para integrar indicadores temáticos de rasgos importantes de la administración moderna como lo son el Capital Humano, la Competitividad y el Mercadeo.

Este artículo propone a la literatura una cartera de indicadores extremadamente útil para el análisis de las prácticas administrativas de las mype.

Agradecimientos

Es importante agradecer a la estudiante Teresita de Jesús Sánchez López por sus comentarios a la propuesta del presente estudio.

Referencias

[1] I. Fernández, «Enfoque de Porter y de la teoría basada en los recursos en la identificación de la ventaja competitiva ¿contraposición o conciliación?,» *Revista Economía y Desarrollo,* vol. 144, nº 1, pp. 101-114, 2018.

[2] INEGI, «Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas,» 2019. [En línea]. Available: https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx..

[3] IBM, «SPSS Statistics 25.0.0,» 22 arzo 2021. [En línea]. Available: https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/25.0.0?topic=features-reliability-analysis. [Último acceso: 08 agosto 2022].

[4] H. Celina y A. Campos, «Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach,» *Revista Colombiana de Psiquiatría,* vol. XXXIV, nº 4, pp. 572-580, 2005.

[5] M. De Vicente y J. Manera, «El análisis factorial y por componentes factoriales,» de *Análisis multivariable para las ciencias sociales*, Madrid, Pearson, 2008, pp. 327-360.

[6] A. Mendoza, «Indicadores de desempeño, presión y vulnerabilidad de las finanzas públicas estatales en México,» *El Trimestre Económico,* vol. LXXVII, nº 307, pp. 605-649, 2010.

[7] R. Prat y E. Doval, «Construcción y análisis de escalas,» de *Análisis multivariable para las ciencias sociales*, Madrid, Pearson, 2008, pp. 43-89.

[8] B. Everitt, An R and S-Plus (R) Companion to Multivariate Analysys, London: Springer-Verlag London, 2005.

[9] M. Hossain y H. Hammami, «Voluntary disclosure in the annual reports of an emerging country: The case of Qatar,» *Advances in Accounting,* vol. 25, nº 2, pp. 255-265, 2009.

[10] G. Briano, «Factores institucionales que inciden en la Transparencia del Gobierno Corporativo. Un estudio en empresas cotizadas en latinoamérica.,» Universidad de Cantabria, Santander, 2012.

[11] A. Mendoza y L. Ortuño, «Indicador global de adhesión a las mejores prácticas de gobierno corporativo: sociedades anónimas bursátiles mexicanas,» *Contaduría y Administración,* vol. 64, nº 8, pp. 1-18, 2019.

[12] A. Mendoza, L. Ortuño y L. Conde, «Corporate governance and firm performance in hybrid model countries,» *Review of Accounting and Finance,* vol. 21, nº 1, pp. 32-58, 2022.

[13] E. Ryan, «The Relationship Between Managerial Values and Managerial Success of Female and Male Managers,» *The Journal of Psychology: Interdisciplinary and Applied,* vol. 108, nº 1, pp. 67-72, 1981.

[14] D. Egginton, J. Forker y M. Tippett, «Share Option Rewards and Managerial Performance: an Abnormal Performance Index Model,» *Accounting and Business Research,* vol. 19, nº 75, pp. 255-266, 1989.

[15] B. Matemilola, A. Bany-Ariffin y W. Azman-Saini, «Impact of Leverage and Managerial Skills on Shareholders' Return,» *Procedia Economics and Finance,* vol. 7, nº 1, pp. 103-115, 2013.

[16] J. Hernández, F. Espinoza, J. Rodríguez, J. Chacón, C. Tolosa, M. Arenas, S. Carrillo y V. Bermúdez, «Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones,» *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapeútica,* vol. 37, nº 5, pp. 588-601, 2018.

Potencial de aplicación de biomasa de residuo forestal como fuente de energía renovable

Jorge Bedolla-Hernández[1], Vicente Flores-Lara[2], Marcos Bedolla-Hernández[3], José Michael Cruz-García[4], Efrén Sánchez-Flores[5]*
[1]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, jorge.bh@apizaco.tecnm.mx, [2]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, vicente.fl@apizaco.tecnm.mx, [3]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, marcos.bh@apizaco.tecnm.mx, [4]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, psp.3030@apizaco.tecnm.mx, [5]Tecnológico Nacional de México / IT de Apizaco, efren.sf@apizaco.tecnm.mx

***Área de participación**: Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*

Resumen

Se presenta el análisis de residuos forestales de tres tipos de árbol, pino, encino y oyamel, como alternativa de fuente de energía. Se consideran residuos de la madera fragmentados y en tiras, típicos resultantes de actividades forestales. Se analiza la disponibilidad de tales residuos para una región boscosa del estado de Puebla. Se toman en cuenta esos tipos de árbol ya que en México los encinos se considera el segundo recurso forestal maderable más importante después del pino. Se analizan los componentes principales de esa biomasa a través de pruebas experimentales, y se determinan valores de presión y temperatura en la generación de vapor por combustión de esa biomasa. El análisis se realiza sobre residuos prácticamente sin procesar, para limitar la cantidad de energía aplicada en el preproceso. Los resultados muestran que los residuos forestales analizados son viables para la generación de vapor de agua, lo que permite considerarlos para accionamiento de sistemas de generación eléctrica.

***Palabras clave**: Biomasa, energía, fuente de energía alternativa, residuo forestal.*

Abstract

The analysis of forest residues from three types of trees (pine, oak and oyamel) as an alternative energy source is presented. Fragmented and shredded wood residues, typically resulting from forestry activities, are considered. The availability of these residues in Mexico, particularly in a forested region of Puebla, is analyzed. In Mexico, oak is considered the second most important timber resource after pine. The main components of biomass are analyzed through experimental tests and pressure and temperature values are determined for steam generation by biomass combustion. The analysis is performed on practically unprocessed biomass to limit the amount of energy applied in the preprocessing. The results show that the analyzed forest residues are viable for steam generation, which allows them to be considered for power generation systems.

***Key words**: Alternative energy source, biomass, energy, forest residues.*

Introducción

La aplicación de la biomasa forestal y de residuo forestal, como una fuente alterna de energía renovable ha adquirido especial interés en la actualidad [1]. Este tipo de biomasa incluye residuos forestales que se generan por las diversas actividades primarias extractivas propias de los productos forestales, y que, junto con actividades estacionales del cultivo de árboles, producen residuos forestales. También, como parte de las actividades extractivas de productos forestales se considera que en la cosecha integrada de esos recursos se obtienen principalmente dos familias de productos: (1) productos para uso estructural e industrial y (2) nuevos productos que se generan para uso energético o bio-refinamiento a partir de la recolección de biomasa de los residuos forestales del primer grupo [2]. La biomasa sólida de residuos forestales como materia prima presenta diversas configuraciones, y entre otras consiste en ramas, opas, serrín o materiales no maderables. El reciente interés en reconsiderar residuos forestales dentro de las alternativas para su uso posterior como fuente alterna de energía, se deriva principalmente de la consideración que la energía obtenida de ese tipo de biomasa es “neutra en carbono” [3]. Lo cual resulta de interés para las políticas actuales de combustibles que sean amigables con em ambiente. Al respecto se han reportado diversos estudios para la aplicación de la biomasa forestal y sus residuos como fuente de energía alterna renovable, por ejemplo, en la región que se denomina BRICS (que la componen

Brazil, Rusia, India, China y Sudáfrica) se realizan análisis para intentar establecer la relación que existe entre el uso de la energía de biomasa y el desarrollo humano [4].

Para el aspecto bioenergético de los productos forestales resulta común que en muchas situaciones solo se consideren los residuos que se producen de otras actividades, que se establecen como más rentables que los combustibles. Donde en principio, se considera que se obtiene productos más valiosos que los biocombustibles, ejemplo de estos productos son elementos maderables, la celulosa para papel, postes de madera, entre otros [5]. Sin embargo, aún si se consideran que solo los residuos forestales y/o agrícolas pueden constituirse como fuente alterna de energía, se ha establecido que ese tipo de residuos disponibles en México representaron una producción potencial de energía estimada en 87.94 millones de toneladas de materia seca por año en 2019 [6]. Donde se ha comprobado a través de la experiencia, que es claro que la fuente de biomasa más comúnmente usada en forma tradicional como fuente de energía son los residuos de madera, los cuales tiene aplicación tanto en forma directa en diferentes condiciones como para la producción de electricidad, calentamiento, transporte y cocina [7]. Es inevitable dentro del proceso de producción de madera y derivados de la misma que invariablemente resulte la generación de residuos de esos productos; donde se ha establecido que los mismos pueden dividirse principalmente en dos clases dependiendo del proceso del que se derivan: (1) de operaciones de recolección y extracción y (2) de proceso de fabricación de madera. Donde también se establece que dentro de esos procesos solo el 28 % del total de un árbol se usa como madera [8] y el resto se constituye en residuos, los cuales que pueden tener un valor agregado al aprovecharse como fuente de energía renovable. Entonces, se han planteado estudios que indican que es posible establecer de forma local el tamaño de una planta generadora de potencia eléctrica [9], esto basado en la cantidad disponible de residuos forestales para la generación de electricidad y considerando todos los factores que intervienen en el proceso de conversión para la generación de electricidad.

México tiene recurso forestal considerable, donde el aprovechamiento de la biomasa forestal para energía tiene un potencial estimado de entre 1,923 y 1,135 PJ/año [10]. Esto se hace más evidente en determinadas regiones, donde este estudio en particular considera una región en el estado de Puebla, donde predominan los bosques de coníferas, encinos. Esto además de regiones de selvas de diferentes tipos de biomasa como son matorrales, pastizales, así como, bosques de montaña y bosques templados. Para la cual la superficie con potencial para aprovechar recursos forestales, principalmente maderables, es la que está cubierta por vegetación arbórea de bosque, correspondiendo a bosque de clima templado frío, básicamente bosque de pino, pino-encino, encino, encino-otras hojosas, y bosque de oyamel. Del cual se estima que se tendría una superficie aprovechable de aproximadamente 76,114 hectáreas [11]. Junto con el residuo forestal, es necesario al considerarlo como combustible, que la combustión de este tipo de biomasa se beneficia con una adecuada preparación del combustible. Por lo cual combustibles de ese tipo por encima del 60 % de humedad pueden ser difíciles de quemar y por lo que se requiere de establecer procesos adicionales de secado [12], que pueden ser parcialmente pasivos para limitar el consumo de energía en el preproceso y que contribuyan a la mejora en el proceso de aprovechamiento del residuo forestal.

De acuerdo con lo anterior, para el presente estudio se considera analizar el potencial de aprovechamiento de la biomasa de residuos forestal de una de las regiones con recurso maderable del estado de Puebla; en específico que la conforman los municipios que presentaron más producción forestal, entre los cuales se encuentran Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Zacatlán. El estudio se centra en el análisis de alternativa del residuo de biomasa forestal de encino, pino y oyamel como potencial de fuente de energía a partir de recurso renovable. Ya que en México los encinos son considerados como el segundo recurso forestal maderable más importante después del género pino. Para el estudio se analizan los componentes principales que conforman la biomasa de interés a través de pruebas experimentales y se determinan los valores de presión y temperatura que se obtiene de esos residuos por fracción de masa del residuo forestal. Lo anterior se basa en que la biomasa como residuo forestal típicamente tiene dos roles como fuente de energía, a) combustibles procesados y b) combustibles no procesados; donde este estudio se enfoca en el aprovechamiento de los residuos prácticamente sin procesar, salvo el proceso de secado natural. Esto con el objeto de limitar la cantidad de energía aplicada en el preproceso del combustible y explorar las características viables de aplicación de los residuos como fuente de energía renovable alterna.

Metodología

Los materiales analizados como combustible a partir de la biomasa sólida, para el estudio proceden de residuos forestales, los cuales se recolectan después de que se han realizado las actividades primarias con ese recurso

forestal y se considera de más valía. Entonces, la biomasa de residuo forestal así obtenida se clasificó como parte de la recolección por tamaño y por el árbol del que procede. Por el tipo de árbol se consideraron tres tipos: a) encino, b) pino y c) oyamel. Por el tamaño se consideraron dos grupos principales: (1) bimasa fragmentada, que consistió en trozos de 2 cm a 8 cm de longitud y de 2 cm (aproximadamente) de espesor; y (2) biomasa en tiras que consistió en trozos de 17 cm a 25 cm de longitud y de 2 cm (aproximadamente) de espesor. Una imagen representativa (sin escala) de los tipos de biomasa considerada para el estudio se muestra en la Figura 1.

Para la clasificación e identificación de las pruebas realizadas y sus correspondientes resultados, se establece la siguiente nomenclatura que relaciona los diferentes tipos de biomasa en análisis: BFP: Biomasa fragmentada de pino, BFE: Biomasa fragmentada de encino, BFO: Biomasa fragmentada de oyamel, BTP: Biomasa en tiras de pino, BTE: Biomasa en tiras de encino, BTO: Biomasa en tiras de oyamel. Posterior a la clasificación del tipo de combustibles, la biomasa se coloca al sol para propiciar el secado y mejorar el proceso de combustión.

Dado que se considera a la biomasa como combustible, en este caso la forma de relacionar su potencial se establece a partir de la generación de vapor por unidad de biomasa. Para generar vapor y establecer las características del combustible de cada uno de los tipos de biomasa incluidos en el análisis, se realizarán una serie de 3 pruebas en cada caso, para definir la referencia del combustible. En estas pruebas de referencia para cada una de las pruebas se considera 1 kg de combustible inicialmente, con lo cual, de acuerdo los tipos de árbol y formas de la biomasa (fragmentada o en tiras) se conforma un conjunto 18 pruebas.

Posterior a las pruebas con 1 kg de biomasa para la referencia, se plantea la realización de otras series de pruebas para cantidades de 0.5 kg, 1.5 kg, 2 kg y 2.5 kg de cada forma y tipo de biomasa en análisis. En función de la prueba en algunas de estas se incluye un catalizador (50 ml de thinner) al inicio del proceso de combustión para reducir el tiempo de ignición.

Para al inicio de la combustión, se realizan dos configuraciones iniciales diferentes de la distribución de la biomasa en el hogar de combustión, esto dependiendo del tipo de biomasa que se introduce en la cámara de combustión. Para la biomasa fragmentada, por las condiciones propias de sus dimensiones se usa un acomodo piramidal inicial antes de la combustión, para la biomasa en tiras se realiza el acomodo de esta en forma vertical configurando rejillas en la cámara de combustión.

Posterior al acomodo de la biomasa, se realiza el proceso de combustión con la quema de misma. Para lo cual, en la generación de vapor se usa un tanque cerrado sobre la cámara de combustión que contiene agua al inicio del proceso, que con los gases de la combustión se convierte en vapor. Este tanque tiene capacidad para 26.5 litros y su presión interna segura de diseño se establece de 862 kPa. Para realizar las pruebas, al inicio de cada una de éstas el tanque contendrá una cantidad de 10 litros de agua. Las pruebas por realizar con esa caldera para la generación de vapor, tienen el objetivo determinar el comportamiento de la temperatura y la presión máxima alcanzada por una unidad de masa del combustible. Esto además, del tiempo que dura la combustión, tiempo de ignición y tiempo que tarda en alcanzar la temperatura máxima, para así poder establecer una relación con esos parámetros y con los diferentes tipos de biomasa analizados.



a) b)

Figura 1. Tamaños de biomasa sólida, donde: a) biomasa fragmentada y b) biomasa en tiras.

Materiales y equipo

Caldeara de pruebas (ver sección de preparación)
Válvula de alivio de la caldera a 862 kPa
Termómetro analógico de 0-300 °C
Agua a temperatura ambiente
Recipiente graduado de 2 litros
Báscula para 10 kg
Madera seca fragmentada de encino, pino y oyamel
Madera seca en tiras de encino, pino y oyamel

Preparación y desarrollo

Para los diferentes tipos de la biomasa usada (tipo de árbol y forma), ya sea fragmenta o en tiras, para la obtención de vapor se sigue prácticamente el mismo proceso, solo se modifica la configuración inicial que la biomasa adopta antes de la ignición en la cámara de combustión. El procedimiento general consiste en lo siguiente:

1.- Se inicia con el llenado del tanque cerrado con 10 litros de agua. El agua se introduce por un embudo y una vez que se tiene la cantidad se cierran las válvulas del tanque, para que posteriormente se genera la presión interna al calentar el tanque con la combustión de la biomasa. En la Figura 2 se muestra la representación del sistema de combustión y la instrumentación en el tanque.



Figura 2. Sistema de generación de vapor que incluye cámara de combustión, válvulas e instrumentos de medición para las pruebas.

2.- Se pesa la cantidad (y tipo) de biomasa a usar en la correspondiente prueba. La figura 3 muestra un esquema representativo de la cuantificación de la biomasa para la prueba, la cual tuvo un proceso pasivo de secado para retirar humedad. La diferencia entre la biomasa húmeda y la biomasa seca se presenta en la sección de resultados.



Figura 3. Cuantificación de la biomasa para las pruebas para las pruebas de combustión.

3.- Se registran las lecturas iniciales de los instrumentos de medición del recipiente cerrado antes del inicio del proceso de combustión.

4.- Para la primera serie de pruebas se introduce 1 kg de biomasa en la cámara de combustión. Para la biomasa fragmentada se forma una configuración de pirámide y se agrega 50 ml de (thinner en estas pruebas) catalizador esparciendo en toda la pirámide de combustible. Si se trata de biomasa en tira se realizan paquetes de 0.2 kg que se mantiene unidos con un alambre y se acomodan verticalmente en la cámara de combustión.

5.- Se procede al inicio del proceso de combustión de la biomasa, para posteriormente tomar lecturas a intervalos de 3 minutos de los parámetros a medir en el tanque cerrado.

Dado que la humedad, las cenizas, la materia volátil y el carbón fijo que forman parte del combustible o del proceso de combustión, pueden influir en las propiedades, se realiza un análisis de estos parámetros para una cantidad 1 kg de biomasa en cada caso. Para cuantificar y aproximar esos parámetros se realiza un análisis aproximado y un análisis definitivo como se indica a continuación.

Análisis aproximado

1.- El contenido de humada (CH) se establece como la cantidad de agua presente en la biomasa y se obtiene una vez que el material pasa por el proceso de secado como porcentaje de pérdida de peso, de acuerdo como se indica en la ec. (1).

$$CH = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100 \quad (1)$$

2.- El contenido de cenizas (CC) se establece como el residuo que permanece después del tiempo de combustión total de la biomasa. El porcentaje se calcula pesando el residuo después de la quema, y se establece de acuerdo con la ec. (2).

$$CC = \frac{m_{cen}}{m_s} * 100 \quad (2)$$

3.- El material volátil (MV) se establece calentando la biomasa en un horno cerrado durante 10 minutos y enfriando a temperatura ambiente. La pérdida de peso da como resultado el porcentaje de material volátil, como se indica por la ec. (3).

$$MV = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} * 100 \quad (3)$$

4.- El carbón fijo (CF) se obtienen restando el conjunto de CH, CC y MV de la masa de no volátiles, como se indica en la ec. (4).

$$CF = \frac{m_{nv} - m_{cen}}{m_s} * 100 \quad (4)$$

Donde para las ecs (1)-(4) se tiene que: m_h y m_s son las masas en g del sólido húmedo y seco, respectivamente, m_{cen} es la masa de las cenizas, m_{nv} es la masa de no volátiles obtenidos después de realizar la prueba de volátiles.

Análisis de elementos

Los valores de carbón, hidrógeno y nitrógeno en el proceso de combustión se calculan a partir de los valores aproximados previos y usando las ecuaciones (5)-(7).

$$\%C \text{ (carbón)} = 0.97CF+0.7(MV+0.1CC)-M^* (0.6-0.01CH) \quad (5)$$

$$\%H_2 \text{ (hidrogeno)} = 0.036CF+0.086(MV-0.1CC)-0.0035CH^2(1-0.02CH) \quad (6)$$

$$\%N_2 \text{ (nitrógeno)} = 2.10 - 0.020MV \quad (7)$$

Para analizar el proceso de combustión de la biomasa y su relación con los parámetros obtenidos del proceso en las pruebas realizadas con 10 litros de agua, se consideran los siguientes parámetros: tiempo de ignición de combustión (Ti) que se refiere al tiempo que en el que se introduce la flama de ignición hasta que se mantiene la llama encendida en la biomasa; temperatura máxima alcanzada en el tanque (Q) durante todo el proceso de combustión y se considera una vez que el termómetro no presenta cambios durante más de 4 minutos; aumento de la temperatura por la biomasa (ΔQ) que corresponde a la temperatura máxima menos la temperatura inicial;

Tiempo de temperatura máxima (Ttm) que es el tiempo posterior a la ignición y hasta que se alcanza la temperatura máxima; presión máxima (Pm) durante todo el proceso de combustión, tiempo de presión máxima (Tpm) que es el tiempo desde la ignición hasta que se alcanza la presión máxima; velocidad de combustión (V) que es la relación de masa consumida entre el tiempo total; tiempo de flama (Tf) que es el tiempo que se mantiene la flama encendida, tiempo de carbón encendido (Tc) que es el tiempo posterior a la flama visible pero con temperatura mayor a la del ambiente; tiempo total de combustión (Tt) que es la suma de los tiempos Tf y Tc. Estos parámetros obtenidos para las pruebas con la biomasa se presentan en la sección de resultados.

Resultados y discusión

Análisis aproximado

Como se indicó previamente, se considera la biomasa sólida de cada uno de los tipos y tamaños analizados y se establece su masa en condiciones seca y húmeda para estimar sus componentes aproximados, para el proceso de combustión. También, en el análisis aproximado propuesto en las ecs. (1)-(4), para determinar los valores CC y MV se realizaron 3 pruebas bajo las mismas condiciones para 1 kg de residuo forestal seco de biomasa sólida. Los resultados promediados de las tres pruebas para cada uno de los tipos de biomasa analizados se presentan en la Tabla 1, donde para el caso del parámetro MV se determinó a través de un horno con temperatura constante a 250 °C.

Tabla 1. Resultados de análisis aproximado.

Clasificación de biomasa	Húmeda [kg]	Seca [kg]	CH	CC	MV	CF
BFP	14.09	11.59	21.62	12.4	1.7	85.9
BFO	15.41	14.23	8.25	9.0	1.3	89.7
BFE	11.36	10.77	5.66	12.2	1.4	86.4
BTP	13.60	11.45	18.82	9.4	2.2	88.4
BTO	14.34	9.67	48.37	9.0	1.4	89.6
BTE	11.62	11.10	4.68	6.5	1.1	92.4

Análisis de elementos

A partir de los valores de la Tala 1 y de acuerdo con las ecs. (5)-(7), en la Tabla 2 se presentan los resultados para el carbono, el hidrogeno y el nitrógeno que se calculan presentes en el proceso de combustión para cada uno de los tipos de biomasa analizados.

Tabla 2. Composición calculada a partir de los datos de la tabla 1.

Clasificación de biomasa	Carbón	Hidrógeno	Nitrógeno
BFP	77.08	2.20	2.066
BFO	84.24	3.06	2.074
BFE	82.56	3.02	2.072
BTP	80.19	2.51	2.056
BTO	82.89	3.00	2.072
BTE	88.26	3.29	2.078

Parámetros de la combustión

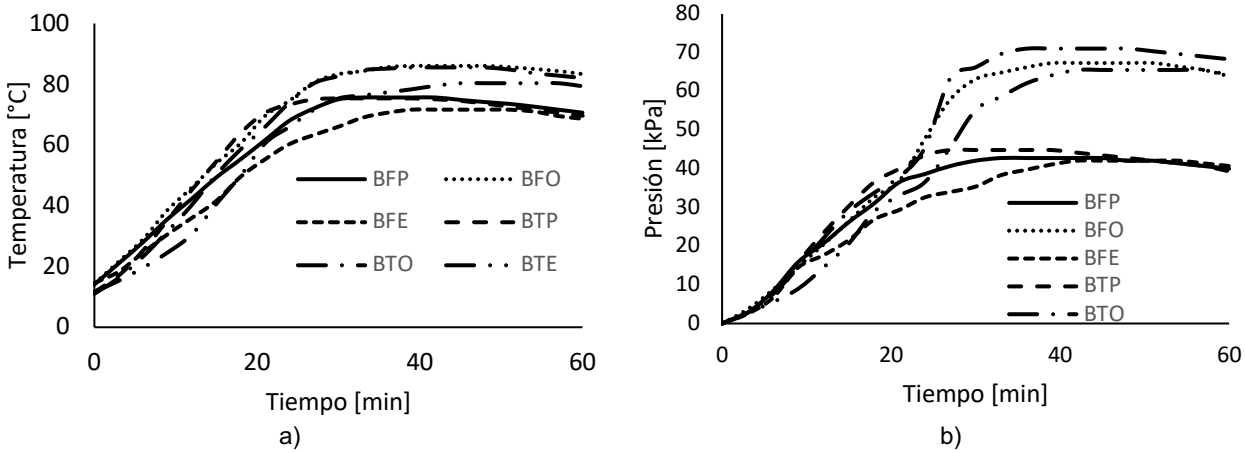
De acuerdo con el procedimiento para analizar los resultados de la combustión de los tipos de biomasa considerados con referencia a 1 kg de biomasa, y con tres repeticiones de cada una de las pruebas, en la Tabla 3 se presentan los resultados de las variables cuantificadas. De los resultados que se presentan en la Tabla 3 se obtiene que el mayor incremento de temperatura corresponde al tipo de biomasa de oyamel, tanto para su forma en tiras como en fragmentos. Lo que en consecuencia se relaciona de forma proporcional para las máximas presiones obtenidas de las pruebas. Los datos obtenidos de la Tabla 3 proporcionan la información solo la

información de los parámetros de la combustión, pero sin considerar la evolución en el tiempo de estos. Para ampliar esa información, en la Figura 4 se muestra de forma representativa la evolución en el tiempo de la presión y temperatura para los diferentes tipos de biomasa para 1 kg de combustible.

Tabla 3. Resultados de análisis de los parámetros de la combustión para 1 kg de biomasa sólida de residuo forestal.

Clasificación de biomasa	No. de prueba	Ti [s]	Q [°C]	ΔQ [°C]	Ttm [min]	Pm [kPa]	Tpm [min]	V [g/min]	Tf [min]	Tc [min]	Tt [min]
BFP	1	13	75	60	30	42.05	30	16.35	29	32	61.13
	2	14	76	64	33	44.12	33	16.09	31	31	62.14
	3	13	76	61	33	42.74	30	16.63	29	31	60.13
BFO	1	15	85	70	36	65.50	39	17.49	27	30	57.15
	2	15	87	73	36	68.94	39	16.35	29	32	61.15
	3	16	86	72	39	67.56	39	16.62	28	32	60.16
BFE	1	18	71	57	39	42.74	42	16.08	32	30	62.18
	2	18	72	57	39	41.36	42	15.82	33	30	63.18
	3	18	72	57	39	42.05	42	15.82	34	29	63.18
BTP	1	27	75	64	27	44.81	27	19.13	22	29	52.27
	2	28	76	63	27	45.50	27	19.50	21	30	51.28
	3	29	75	64	30	44.81	30	19.40	21	30	51.29
BTO	1	35	86	74	36	72.39	36	16.57	27	33	60.35
	2	35	85	75	39	71.01	39	17.43	27	30	57.35
	3	40	85	74	39	71.01	36	16.83	28	31	59.40
BTE	1	50	81	70	45	66.87	45	17.69	23	33	56.50
	2	50	80	69	45	65.50	42	17.69	24	32	56.50
	3	50	80	67	45	65.50	45	17.39	24	33	57.50

Como se aprecia de la Figura 4a), la temperatura obtenida en el recipiente cerrado no es suficiente para alcanza el punto de ebullición del agua, por lo que se realizan pruebas con diferentes cantidades de biomasa que permitan observa el comportamiento para temperaturas superiores. Por lo que de manera análoga a la Tabla 3, en la Tabla 4 se presentan los resultados promediados de tres pruebas cada uno, del proceso de combustión de los diferentes tipos de biomasa sólida con diferentes cantidades de biomasa en el proceso de combustión que van de 1 kg a 2.5 kg. A partir de los datos de la Tabla 4, se puede observar en la Figura 4 las temperaturas máximas alcanzadas por cada uno de los tipos de biomasa y para cada una de las cantidades consideradas en el análisis.



a) b)

Figura 4. Evolución de la presión y temperatura para 1 kg de biomasa, donde: a) temperatura y b) presión.

Tabla 4. Resultados de análisis aproximado.

Clasificación de biomasa	Masa [kg]	Ti [s]	Q [°C]	ΔQ [°C]	Ttm [min]	Pm [kPa]	Tpm [min]	V [g/min]	Tf [min]	Tc [min]	Tt [min]
BFP	1	13.3	75.6	61.6	33	42.7	33	16.38	29.6	31	61.03
	1.5	14	104	93	42	151.7	45	22.67	42	24	66.14
	2	15	130	116	51	303.4	54	22.18	50	40	90.15
	2.5	14	145	135	57	399.9	57	28.36	58	30	88.14
BFO	1	15.3	86	71.7	39	66.9	39	16.82	28	31	59.45
	1.5	16	116	82	39	193.1	39	22.33	37	30	67.16
	2	16	132	122	51	248.2	54	21.93	46	45	91.16
	2.5	20	136	124	57	344.7	57	23.36	57	50	107.20
BFE	1	18	71.6	57	39	42.1	42	15.82	33	30	63.18
	1.5	18	100	88	42	127.6	42	21.07	38	33	71.18
	2	20	125	110	54	262.0	57	22.1	55	35	90.20
	2.5	35	146	135	63	441.3	63	23.5	61	45	106.35
BTP	1	28	75.3	63.7	30	44.8	27	19.5	21	30	51.28
	1.5	30	110	99	42	162.0	42	24.4	36	25	61.3
	2	30	138	123	51	358.5	51	21.20	49	45	94.30
	2.5	35	148	134.5	63	468.8	66	20.94	63	56	119.35
BTO	1	36.6	85.5	74.5	39	71.0	36	16.94	27.3	31	59.03
	1.5	40	99.5	88.5	51	117.2	51	15.06	33	33	66.4
	2	45	122	111	57	244.8	60	20.52	47	50	97.45
BTE	1	50	80.3	68.7	45	65.5	42	17.39	24	33	57.50
	1.5	50	100	90	51	120.7	51	19.1	33	45	78.50
	2	50	114	104	51	192.4	54	23.12	36	50	86.50
	2.5	55	130	120	57	299.9	60	24.37	48	54	102.55

La Figura 5 muestra las temperaturas máximas alcanzadas para los diferentes tipos de la biomasa usada y para las diferentes cantidades de esta, donde se aprecia que, en todos esos los casos, con cantidades de combustible de biomasa sólida mayor a 1 kg se alcanza o se supera la temperatura de ebullición del agua, para las condiciones de prueba analizada. De donde, se corrobora que los residuos forestales de los tipos de árbol analizados en el presente estudio son viables para aplicarse en la generación de vapor que sirva como fuente alternativa de energía.

De manera representativa en la Figura 6 se presenta la evolución en el tiempo de la temperatura para la biomasa de pino en configuración tanto en tiras como fragmentada, y para las diferentes cantidades analizadas. Se incluye en las curvas de la Figura 6 la curva de la cantidad de 1 kg que se presenta en la Figura 4. Lo anterior para que sirva de referencia en la comparación con respecto al resto de cantidades de biomasa usadas. Como se observa para cantidades superiores a 1 kg se obtiene temperaturas de ebullición del agua, lo que permite considerar esa biomasa como fuente de energía alternativa.

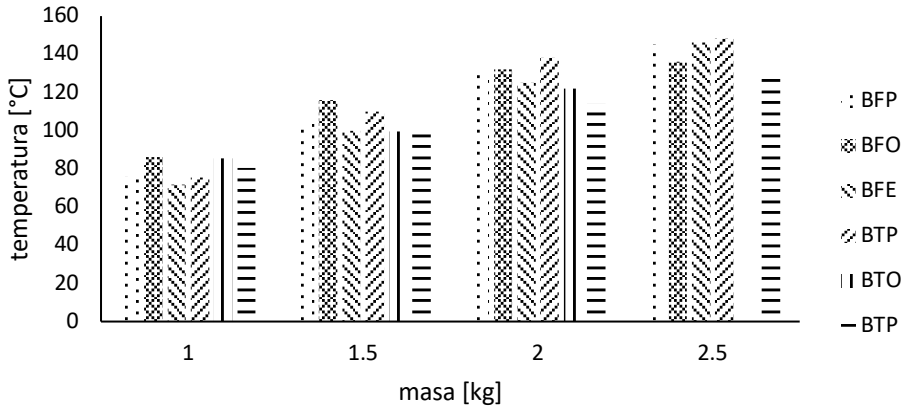


Figura 5. Temperaturas máximas alcanzadas para los diferentes tipos y cantidades de biomasa.

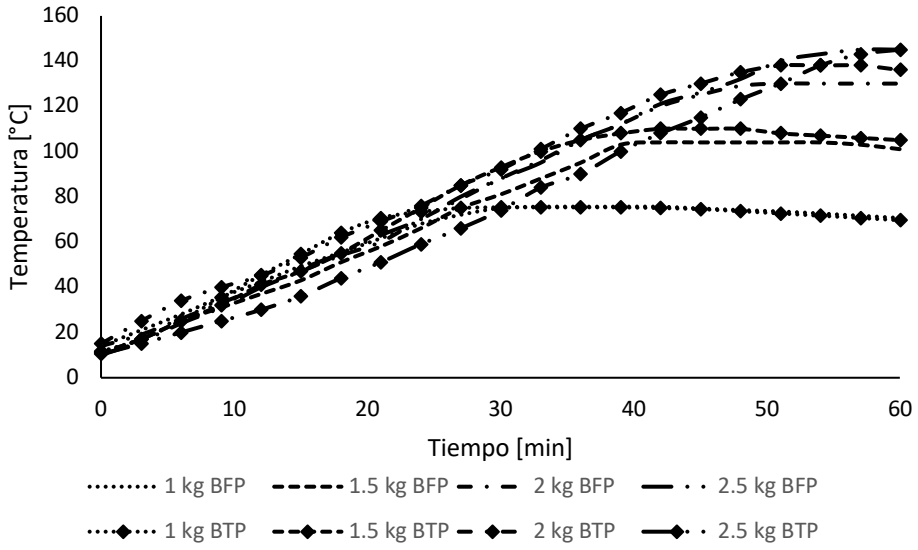


Figura 6. Evolución de la temperatura para diferentes cantidades y formas de biomasa proveniente de residuos de pino.

Por condiciones prácticas de espacio, no se incluyen los resultados de las curvas que corresponde a los tipos de árbol de encino y oyamel. Sin embargo, el comportamiento de esas curvas es análogo al presentado por el pino (Figura 6), donde además los valores máximos para esos tipos de árboles pueden revisarse en los datos de la Tabla 4, para estas pruebas. A partir de los resultados de la Tabla 4 se corrobora que los residuos forestales de pino, oyamel y encino que se ubican en una de las regiones boscosas del estado de Puebla son viables para considerarse en dentro de las fuentes potenciales alternativas como fuente de energía renovable. Además, dado que el volumen de residuos que se producen por la actividad forestal propia de la región es considerable, entonces estos residuos se proyectan para constituirse como una fuente alternativa de energía.

Trabajo a futuro

La verificación del potencial de residuos forestal como fuente alternativa de energía, junto con el interés actual de voltear hacia ese tipo de fuentes de biomasa para darles un valor agregado, y el enfoque de [9] que permite establecer plantas de generación a partir de residuos disponible, hacen necesario el avanzar en investigaciones de configuración de sistemas completos para la generación eléctrica. En ese sentido se plantean como trabajos futuros la investigación en el tipo de expansores que sean capaces de acoplarse a sistemas de bajo grado de calor, para las variantes de combustibles como los analizados en el presente estudio, para complementar los sistemas de generación.

Conclusiones

Se realizó el análisis del potencial de aplicación de residuos forestales de árbol de pino, oyamel y encino como fuentes alternativas de energía. Se revisó la disponibilidad y porcentajes de aprovechamiento de recurso maderables, enfocados en una de las regiones boscosas del estado de Puebla. Se realizó el análisis para el aprovechamiento de residuos forestales de configuraciones en tiras y fragmentada, que son casos típicos de residuos forestales. A partir de la implementación de un sistema de pruebas experimentales se cuantificó las características del uso de los residuos forestales como fuente de energía alterna. Obteniendo como conclusión que los residuos analizados pueden usarse en la generación de vapor que forme parte de un sistema de generación. Con lo que se corrobora el potencial de aplicación de esa biomasa forestal como parte de los combustibles alternativos en los procesos de producción de energía eléctrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo otorgado para el desarrollo del presente trabajo dentro del proyecto clave 13250.21-P.

Referencias

[1] A. Favero, A.Daigneault, B. Sohngen, “Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?”, *Science Advances 2020*, vol 6, eaay6792, pp. 1-13, 2020.

[2] R. Spinelli, R. Visser, R. Björheden, D. Röser, “Recovering Energy Biomass in Conventional Forest Operations: a Review of Integrated Harvesting Systems”, *Curr Forestry Rep* 5, 90–100 (2019). https://oi.org/10.1007/s40725-019-00089-0

[3] United States Environmental Protection Agency (USEPA), EPA’s Treatment of Biogenic Carbon Dioxide (CO2) Emissions from Stationary Sources that Use Forest Biomass for Energy Production (2018); https://epa.gov/sites/production/files/2018-04/documents/biomass_policy_statement_2018_04_23.pdf.

[4] Z. Wang, Q. Bui, B. Zhang, “The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries”, Energy, vol 194 (2020), 116906-10, 2020.

[5] M. Acuna, J. Sessions, R. Zamora,K. Boston, M. Brown, M.R. Ghaffariyan, “Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review”. *Current Forestry Reports*. doi:10.1007/s40725-019-00093-4, 2019.

[6] J. A. Honorato-Salazar, J. Sadhukhan, “Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico*”, Food and Bioproducts Processing,* Vol. 119, pp. 1-19. January 2020.

[7] E.J.Ordoñez-Frías, J.A.Azamar-Barrios, E.Mata-Zayas, O.Silván-Hernández, L.Pampillón-González, “Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 142, 105668-12, November 2020.

[8] N. Ayala-Mendivil, G. Sandoval, “Residuos forestales y de madera”, *Madera y Bosques*, vol. 24 (Núm. esp.), e2401877. doi: 10.21829/myb.2018.2401877, 2018.

[9] H. Nandimandalam, V. G. Gude, M. Marufuzzaman, “Environmental impact assessment of biomass supported electricity generation for sustainable rural energy systems - A case study of Grenada County, Mississippi, USA”, *Science of the Total Environment*, vol. 802, 149716-12, 2022, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149716.

[10] C.A. García, O. Masera, “ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO”, Imagia Comunicación S. de RL. de CV. ISBN: 978-607-8389-11-7.

[11] CONAFOR, “ESTUDIO DE CUENCA DE ABASTO FORESTAL REGIÓN TEZIUTLÁN, PUEBLA, MEXICO”, 2015, recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/254070/Estudio_de_cuenca_de_abasto_-_Teziutlan_Puebla.pdf.

[12] COWI (Coordinación General de Mitigación del Cambio Climático), “Catálogo de Tecnología de biomasa a Energía”, recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/434197/Cat_logo_de_Biomasa_-_Espa_ol_Modelo_05.pdf.

Aplicación del modelo de pensamiento Effectuation, para el emprendimiento docente: Proyecto Forest-Acción

J. Contreras Ruiz[1], M. R. Méndez Pérez[2], A. L., Cruz González.[3]*, I. P. Rodríguez Mendoza[4], E. M. Meza Rosas.[5]

[1]Tecnológico Nacional de México, campus Orizaba y Facultad de Negocios y Tecnología de la Universidad Veracruzana, campus Ixtaczoquitlán
[2,3,4] Facultad de Humanidades de la Universidad de San Carlos
[5] Tecnológico Nacional de México, campus Orizaba y Universidad del Golfo de México, campus Orizaba, Ver.

**jcruiz11@hotmail.com*

***Área de participación**: Investigación educativa*

Resumen

En este periodo de contingencia causado por la *Covid-19*, se han suspendido múltiples actividades presenciales; como las docentes que, en el corto y mediano plazo, han dejado ver sus serias repercusiones en múltiples áreas. Ante esta situación, los *laboratorios de innovación,* mediados por la tecnología, se han constituido en generadores de *recursos educativos abiertos*, que aportan soluciones a problemáticas concretas. En dichos laboratorios no existe autoridad preestablecida; operan con la participación altruista de profesionales de distintos sitios geográficos, organizados en equipos multidisciplinarios que conforman redes de colaboración. Considerando lo anterior, se requiere de habilidades de gestión y de la aplicación innovadora de metodologías, que aprovechen las condiciones de incertidumbre presentes, en los emprendimientos a desarrollar. Aquí se describe cómo se aplicó *Effectuation, en la gestión del proyecto Forest-Acción, desarrollado durante el Quinto Laboratorio de Innovación Social "Emprendimiento Docente" y cuyo enfoque principal es desarrollar la conciencia ambiental en infantes.*

***Palabras clave**: Covid-19, Emprendimiento, Innovación, Effectuation*

Abstract

In this contingency period caused by Covid-19, multiple face-to-face activities have been suspended; like the teachers who, in the short and medium term, have shown their serious repercussions in multiple areas. Faced with this situation, the innovation laboratories, mediated by technology, have become generators of open educational resources, which provide solutions to specific problems. In these laboratories there is no pre-established authority; They operate with the altruistic participation of professionals from different geographic locations, organized in multidisciplinary teams that make up collaborative networks. Considering the above, management skills and the innovative application of methodologies are required, which take advantage of the present conditions of uncertainty in the undertakings to be developed. Here it is described how Effectuation was applied, in the management of the Forest-Acción project, developed into *Quinto Laboratorio de Innovación Social "Emprendimiento Docente"* and whose main focus is to develop environmental awareness in infants.

Keywords: *Covid-19, Entrepreneurship, Innovation, Effectuation*

Introducción

La actual pandemia por Covid-19, está considerada como la mayor crisis después de la Segunda Guerra Mundial [1]. Las estrategias (ST#) que han adoptado los gobiernos para contener los contagios [2], se presentan en la Figura 1; sin embargo, es recomendable que sean priorizadas para su aplicación, ya que pueden presentarse desacuerdos entre los distintos grupos involucrados en la toma de decisiones, respecto a la mayor o menor relevancia de algunas de las estrategias; por lo que, ante este panorama, cada gobierno deberá considerar objetivamente su propio contexto para plantear las estrategias más efectivas y no sólo copiar las que en otros países han resultado positivas.

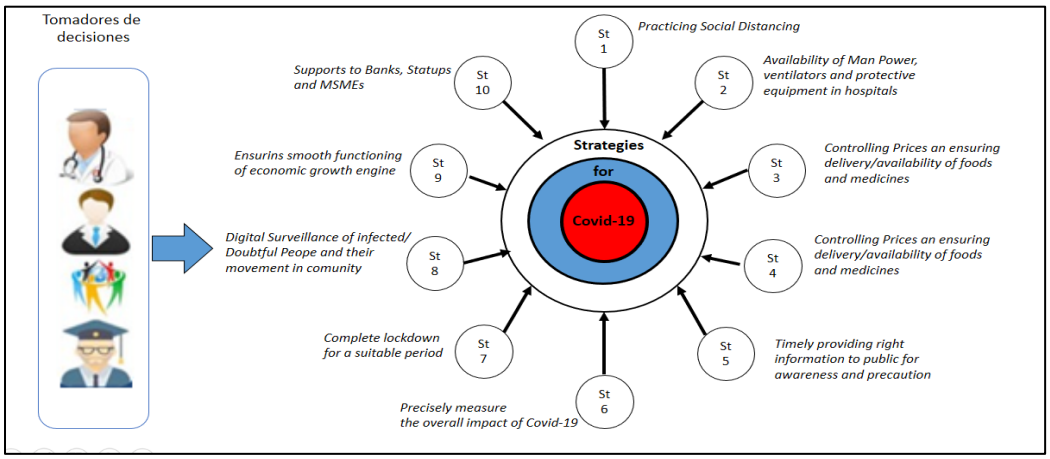


Figura 1. Criterios para hacer frente al brote de Covid-19

La pandemia de la Covid-19 ha tenido un gran impacto [3] en la sociedad en su conjunto y ha perjudicado la economía mundial, afectando el turismo, la recreación, los viajes internacionales, e incluso la educación, entre otros; sin embargo, la población debe prepararse para lidiar con nuevas mutaciones en la cepa del virus del Covid-19, pues la rapidez e intensidad de su propagación, se relacionan más que por sus diferencias genéticas, por los hábitos de la población y la eficacia de las políticas de vigilancia epidemiológica [4]; en tal sentido; aunque los cierres de fronteras internacionales han dificultado la diseminación global de algunas variantes, también han permitido que aparezcan variantes locales en cada país.

Como lo menciona Stefania Giannini, Subdirectora General de Educación de la UNESCO [5], el mundo no estaba preparado para una disrupción educativa, que llevó a cerrar las aulas a nivel global, afectando inicialmente a 1,570 millones de estudiantes en 191 países; dicha medida, también provocó la acelerada improvisación y adopción de soluciones de educación a distancia para mantener en operación el sector; sin embargo, los múltiples obstáculos existentes, como la mala calidad de la conectividad, la falta de contenidos en línea acordes a los planes de estudio y la poca o nula formación del profesorado para atender la llamada *"nueva normalidad*", han provocado desigualdades en el aprendizaje en todos los niveles educativos, incrementando la marginación [6] de los estudiantes menos favorecidos y que a futuro puede redundar en mayor abandono escolar; esto, sin mencionar los efectos sistémicos colaterales en otros sectores relacionados.

En este trabajo, se describe la aplicación del modelo de pensamiento *Effectuation [7]* en la gestión del proyecto *Forest-Acción*; que representa el interés de un pequeño colectivo académico de Guatemala y México, por atender a los estudiantes más jóvenes, mediante el desarrollo del recurso educativo abierto "*Semillas de Vida"*, orientado a fortalecer la conciencia medio ambiental a través de un enfoque principalmente emocional y permite además, combatir algunos de los efectos psicológicos [8] y sociales provocados por el prolongado confinamiento. "*Semillas de Vida*", representa una estrategia lúdica para mitigar la degradación del medio ambiente a través de la Innovación social [9].

Marco referencial

Este trabajo presenta la aplicación del modelo de pensamiento *Effectuation* en la gestión del proyecto Forest-Acción, llevado a cabo por un pequeño colectivo de estudiantes y profesores de Guatemala y México, y que fue una de las diez iniciativas aceptadas en el Quinto Laboratorio de Innovación Social, *"Emprendimiento Docente", realizado del 24 de mayo al 4 de junio del año 2021, en formato virtual a través de redes sociales y plataformas digitales y cuya convocatoria fue emitida* por La Cátedra UNESCO-ICDE en Movimiento Educativo Abierto para América Latina, liderado por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM); El Cuerpo Académico de Tecnologías de Información y Comunicación en la Educación, del Instituto de Investigación y Desarrollo Educativo de la Universidad Autónoma de Baja California y la Junta Directiva de La Facultad de Humanidades de la Universidad de San Carlos (USAC), en Guatemala.

El sitio oficial del Quinto Laboratorio, donde residen los proyectos participantes en la referida convocatoria, es accesible desde el portal de la Facultad de Humanidades de la Universidad de San Carlos de Guatemala, desde la dirección *electrónica (URL)*: *http://humanidades.usac.edu.gt/ldis/*

Laboratorios de Innovación

A lo largo de la historia, se han dado diversos nombres a los encuentros multidisciplinarios tendientes a resolver problemáticas relevantes para algún sector de la sociedad; se les ha conocido como laboratorios ciudadanos [10], laboratorios abiertos, laboratorios vivos o laboratorios comunitarios; sin embargo, en tiempos más recientes, los laboratorios corresponden a iniciativas de participación ciudadana, que se han llevado a cabo empleando plataformas digitales y herramientas colaborativas.

En los actuales sistemas de innovación emergentes de cuádruple hélice, permea un creciente número de actores, comunidades de innovación y ciudadanos que conforman un sistema más complejo y abierto que los anteriores; en tal categoría, el proyecto finlandés Creating Local Innovation Through Quadruple Helix (CLIQ) [11], ha sido pionero en la socialización del término laboratorio ciudadano. En estudios recientes se expone que quienes participan en estas iniciativas, son gente joven y preparada que se conecta a la red de Internet, y que produce ciertos cambios culturales, tendientes a la colaboración y a la co-creación de contenidos desde el trabajo en red.

En los últimos cinco años, en la Sociedad del Conocimiento, surgen los llamados Laboratorio de Innovación Social [12] (SIL, por sus siglas en inglés: Social Innovation Labs), que se destacan porque el objetivo de la colaboración y co-creación de nuevas soluciones, se orienta a atender problemas comunes de los participantes [13] que se organizan en modelos de redes -de colaboración- horizontales, donde está presente la interdisciplinariedad y el uso colaborativo de la tecnología [14] [13] buscando escalar los resultados locales a ámbitos globales.

Recursos educativos abiertos

Los Recursos educativos abiertos (REAs), se entienden como aquellos recursos destinados para la enseñanza y el aprendizaje bajo dominio y licencia pública [15]; permitiendo a otras personas hacer uso de éstos para generar nuevos recursos u obras derivadas. Dentro de los REAs se incluyen cursos completos, materiales de cursos, libros, videos, software, o cualquier otro material o herramienta que ayude o propicie el conocimiento; sin embargo, debe tomarse en cuenta que para que la tecnología sea relevante, es necesario contar con estrategias de acompañamiento y asesoramiento, que permitan llevar a cabo la articulación de estas propuestas educativas en el aula. Cacheiro clasifica los REAs en función de su utilización; proponiendo recursos para la información, el aprendizaje y la colaboración [16].

Effectuation

Es un modelo de pensamiento propuesto por Saras Sarasvathy, después de sus investigaciones que originaron el libro *Effectuation: Elements of Entrepreneurial Expertise*; este modelo de pensamiento, ha sido aplicado en muy diversos emprendimientos que se han documentado a lo largo de la historia;

sin embargo, no se tiene referencia de su aplicación en ningún Laboratorio de Innovación Social (LIS). *Effectuation* se basa en cinco principios fundamentales: pájaro en mano; pérdida asequible; la colcha loca; la limonada y el piloto en el avión [17]. Effectuation se entiende como un proceso de ciclos cortos, en el que un emprendedor identifica, define y crea un mercado para su idea, llegando a conformar una base de recursos y una red de partes interesadas. En la Figura 2, se presentan los ciclos del modelo Effectuation.

Metodología

Dadas las características particulares del trabajo de los Laboratorios de Innovación Social y la incertidumbre propia del trabajo colaborativo, cuyos integrantes inicialmente ni siquiera se conocen, alejan la posibilidad de establecer objetivos de la manera tradicional; por lo tanto, se recurrió a la aplicación del modelo de pensamiento Effectuation, conocido también como *teoría efectual* [17];

Como resultado final de la aplicación del modelo Effectuation, se construyeron colaborativamente tres REAs para la Educación Ambiental.



Figura 2. Los ciclos de Effectuation

Resultados y discusión

Los primeros resultados de acuerdo con el ciclo de Effectuation que se presenta en la Figura 2, fue la conformación de un grupo inicial de trabajo; con integrantes que, en su mayoría, no se conocían y cuyas ubicaciones geográficas distaban miles de kilómetros y tenían husos horarios diferentes.

La información de cada uno de los primeros integrantes del grupo, se plasmó en el documento denominado cuaderno de laboratorio; que fue creado por los organizadores del Laboratorio de Innovación Social, previo al inicio de las actividades del mismo. La Tabla 1, presenta los resultados de la ***primera etapa*** del ciclo de Effectuation, ***recursos***.

Tabla 1. Diagnóstico inicial (Fortalezas)

¿Quién soy?	*¿Qué sé?*	*¿Qué medios se tienen disponibles?*
Mentor	Gestión de proyectos, solución de conflictos y planeación estratégica; con experiencia en tres Laboratorios previos y profesional en TICs.	Conectividad a Internet y manejo de TICs; un horario dispuesto para realizar el trabajo propio del laboratorio, luego de cumplir con la jornada laboral.
Promotora	Experiencia como participante en proyectos de reforestación comunitarios, claridad en la propuesta a trabajar.	
Participantes	Profesionales con habilidades técnicas docentes, conocimiento profundo del medio educativo y relaciones con actores clave. Estudiantes con habilidades para el dibujo y la pintura, manejo de TICs	

Una vez que se tuvo disponible la información particular de cada integrante, se procedió a establecer conjuntamente una identidad, para que el grupo empezara a transformarse en el equipo de trabajo Forest-Acción; dando como resultado la Tabla 2:

Tabla 2. Identidad del Equipo Forest-Acción

Nosotros Somos un equipo de multidisciplinario de profesionales y estudiantes de Guatemala y México, que amamos la vida y tratamos de mejorar las condiciones que la favorecen; nos enfocamos en la creación de Recursos Educativos Abiertos, cuyo público objetivo son niños y jóvenes. Lo hacemos a través del proyecto **Forest-Acción**, que nació de la iniciativa "Forestación", presentada en el marco del 5to. Laboratorio de Innovación Social "Emprendimiento docente". **Visión** En el mediano plazo pretendemos fortalecer la conciencia Ambiental de nuestro público objetivo, niños y jóvenes; para incentivarlos a proteger los recursos naturales. **Misión** Desarrollamos colaborativamente Recursos Educativos Abiertos (REAs), enfocados al tema de protección y cuidado del medio ambiente como el factor que potencia la vida. **Valores** El amor a la vida; La protección del medio ambiente; El trabajo colaborativo; El respeto y la tolerancia **Política de calidad** Todos los Recursos Educativos que desarrollamos para los niños, son de acceso abierto; cada uno de ellos promueve la educación ambiental mediante historietas breves, que presentan hechos reales o deseables, y se presentan en diversos formatos; en texto, audios o a través de imágenes originales; principalmente sin diálogos, para eliminar las limitaciones posibles en cuanto a la lectura, escritura e idioma. Los Recursos Educativos para los jóvenes, también son de acceso abierto y contienen información técnica indicada como procesos, obtenidos de fuentes confiables; se presentan de manera atractiva y organizada para su fácil comprensión y aplicación en el campo.

En la ***segunda etapa*** del ciclo, se procedió a establecer los ***objetivos*** a alcanzar, ya como grupo que tiende a integrarse como equipo; de tal modo que se acordó un objetivo general y dos objetivos particulares, que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. "Objetivos del Equipo"

Objetivo General	*Difundir hacia los públicos objetivos, los productos obtenidos de nuestra participación en el 5to. Laboratorio de Innovación Social "Emprendimiento Docente", para obtener la retroalimentación correspondiente que nos permita aprender para mejorar los próximos Recursos Educativos Abiertos a desarrollar.*
Obj. Particular 1	*Difundir las historietas hacia los niños y las niñas, a través de los medios disponibles, para obtener sus opiniones*
Obj. Particular 2	*Difundir, en formato electrónico, la Infografía a los participantes del programa de Voluntariado para la Reforestación, de la Universidad de San Carlos, para que nos hagan las sugerencias de mejora pertinentes*

En la ***tercera etapa***, correspondiente a la ***interacción con otros***, se tuvo la oportunidad de socializar los objetivos y de acuerdo a ellos, organizar dos pequeños subgrupos de trabajo, cuyos integrantes fueron autoseleccionados; un subgrupo se encargó del desarrollo de la infografía para los estudiantes jóvenes, mientras que el otro grupo, se orientó al desarrollo de las historietas para los estudiantes de menor edad. Los integrantes de cada equipo, hicieron aportaciones voluntarias de acuerdo a sus habilidades individuales. En todo momento, la interacción se dio mediante el uso de plataforma Zoom ® y mediante el uso de la aplicación de WhatsApp ®; principalmente, aunque también se tuvo la oportunidad de comunicarse a través de Google Meet ® y de hacer llamadas telefónicas de manera esporádica. Las interacciones fueron principalmente entre los integrantes del grupo y también en una ocasión programada, con los mentores de los demás proyectos, en una presentación de avances de cada proyecto; dichas presentaciones se hicieron a través de Zoom ®.

Es necesario resaltar que, cuando empezaron los trabajos del proyecto Forestación, casi la mitad de los integrantes que inicialmente estaban adscritos al proyecto, no mostraron interés en participar, a pesar de las continuas invitaciones que se hicieron por parte del mentor y de la promotora. Ante esa

situación y el trabajo por hacer, se pidió apoyo a los organizadores, quienes invitaron, personalmente a otros integrantes, que se integraron a cada uno de los subgrupos ya formados.

En la ***cuarta etapa***, ***compromisos con otros***, se establecieron metas a corto plazo para cada uno de los subgrupos establecidos para el proyecto Forestación, que se fueron cumpliendo gracias a la colaboración participativa de los integrantes, dando la posibilidad de establecer nuevos objetivos a futuro. Si no se hubiera dado ese compromiso grupal, se habría cancelado la ejecución del proyecto. Durante esta etapa, se obtuvieron:

a) Una infografía (Figura 3), con la información del proceso para la reforestación, con enfoque a jóvenes de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que están en proceso de titulación; ya que cuenta con un programa de voluntariado para la reforestación, en el que participan todos sus estudiantes próximos a titularse.
b) Se crearon dos historietas cortas en texto; la primera llamada "*Mi vida está en tus manos*" y la segunda de ellas con el nombre "*Estoy enfermo*"



Contiene por escrito y apoyado con imágenes, un procedimiento paso a paso para llevar a cabo el proceso de reforestación por parte de los estudiantes de la Universidad de San Carlos, por lo que el lenguaje empleado es más técnico que el empleado en los otros materiales orientados a los niños.

En esta Figura, por razones de espacio, sólo se muestra una imagen reducida del principio de la citada infografía

Figura 3. Infografía

En la ***quinta etapa***, respecto al ***primer punto de bifurcación*** hacia ***nuevos recursos***, se contó con cuatro nuevos integrantes, dos de ellos con habilidades de cuentacuentos, un experto en edición de audio y video y otro más, con habilidades plásticas para la pintura y el dibujo, lo que permitió a su vez, proponer nuevos objetivos para los REAs a desarrollar, de tal modo que las historietas, ya no sólo serían en texto, sino que estarían grabadas como audio historietas y además contarían, para la versión digital, con imágenes originales, que narraran por sí mismas la historia a contar, lo que dio la gran oportunidad de eliminar las barreras del lenguaje y de lectura en los niños, ya que ellos pudieron construir sus propias historias a partir de los dibujos. Los nuevos integrantes que se incorporaron al trabajo, que aportaron ideas frescas y puntos de vista que ayudaron a visualizar de mejor manera los productos (REAs) a desarrollar.

Gracias a que se contaba ya con nuevas habilidades y recursos dentro del equipo; para el ***segundo punto de bifurcación*** de la quinta etapa, se establecieron en la Tabla 4 los *nuevos objetivos.*

Tabla 4. "Nuevos Objetivos del Equipo"

Nuevos objetivos	
Nuevo objetivo.# 3.	*Probar los REAs desarrollados con sus respectivos públicos objetivos para obtener su opinión*
Nuevo objetivo # 4	*Desarrollar, con base a las historietas en texto, nuevos materiales gráficos y en audio*
Nuevo objetivo # 5	*Crear una revista digital, con las historietas incorporadas como capítulos*
Nuevo objetivo # 6	*Proponer nombre y logo de la revista, para darle identidad*
Nuevo objetivo # 7	*Proponer las políticas básicas para la elaboración de los capítulos de la revista*

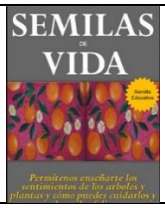
Los resultados de la colaboración, después del planteamiento de los nuevos objetivos y la ejecución de las fases de la segunda iteración del modelo como un nuevo ciclo efectual, se presentan en las siguientes figuras, iniciando con el logo del proyecto que aparece en la Figura 4



El nombre de la iniciativa ***Forestación***; derivó en las palabras ***FOREST*** (bosque) y ***ACCIÓN***, que denotan el movimiento a favor de los bosques, pulmones del planeta, que está representado por el círculo que encierra al árbol; del árbol se incluyen las ramas verdes que son fuente de alimento y refugio; el tronco, como las acciones que crean el alimento y dan los recursos para soportar la vida; y las raíces que significan el apego que debemos tener por el suelo que nos permite coexistir con los demás componentes del sistema global.

Figura 4. Logo del proyecto

La portada de la revista Semillas de Vida, se muestra en la Figura 5; mientras que, debido a la naturaleza digital de las versiones en audio, sólo se indica la dirección electrónica donde residen los archivos correspondientes (*http://humanidades.usac.edu.gt/ldis/#grupos*).



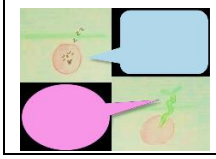
El tipo de público objetivo de la revista, que son los niños principalmente, es lo que originó el nombre de la revista, Semillas de Vida, dando la idea de que en esos niños hay que sembrar el amor por el medio ambiente, a través de cada una de las historietas que se vayan incluyendo en la misma; constituyendo cada capítulo una semilla de vida que debe cultivarse con esmero para que pueda germinar en la conciencia de esos pequeños; para cuidar y proteger a cada uno de los seres vivos con los que convive, principalmente los árboles y los animales silvestres. **DOI de la revista: (10.6084/m9.figshare.15121812)**

Figura 5. Portada de la revista Semillas de Vida

Las historietas con imágenes originales y libres de texto que se incluyeron como contenido inicial de la revista mencionada, se presentan en la Figura 6, donde sólo se incluye una porción de la misma y se indica la dirección electrónica donde se puede descargar el material que se tiene a la fecha.



El capítulo 1 de la revista Semillas de Vida, se titula "*mi vida está en tus manos*" y narra de manera gráfica la historia de una semilla que por alguna razón, cayó en un sitio inapropiado para su desarrollo y cómo la intervención de un niño, le permite quedar alojada en un buen sitio donde se desarrolla exitosamente y al cabo del tiempo, la semilla se convierte en un frondoso árbol, que ofrece sus frutos para alimentar a los animales y a quien en otro tiempo ya lejano, fuera su benefactor.



El capítulo 2, de la revista, se llama "Estoy enfermo" y corresponde a la narración de un árbol que es atacado por una plaga, que empieza a acabar con su saludo y se convierte en una seria amenaza para su existencia; ante este triste panorama, surge la figura de un pequeño héroe que hace lo necesario para erradicar esa plaga y salva la vida del árbol, que agradecido, se propone dar mayor cantidad de frutos, para recompensar a su benefactor.

Figura 6. Capítulos actuales de la revista Semillas de Vida

Finalmente, el objetivo 7, dio como resultado las guías para el desarrollo de los REAs de la Tabla 5

Tabla 5. Guías de desarrollo de REAs

1. Para el caso de los REAs basados en historietas, se incluyen los siguientes componentes:
    a. Un conjunto no mayor de 15 fotogramas o ilustraciones originales.
    b. Que los fotogramas no requieran de un orden prestablecido, para que puedan ser empleados en distintas secuencias de acuerdo a la percepción e interés de las niñas y niños que los empleen.
    c. Que los fotogramas presenten cuadros de diálogo vacíos, para ser ocupados a criterio de los usuarios, para tener la capacidad de representar historias individuales.
    d. Audios con dos versiones de voz; ya sea masculina o femenina; voz infantil o voz adulta.
2. Los audios deben tener una duración máxima de 5 minutos
3. Los videos deben tener una duración máxima de 5 minutos (*investigar*) y contener sonidos ambientales de acuerdo a la imagen que se presenta.

Trabajo a futuro

En el corto plazo, se requiere fortalecer la base de conocimiento teórico que sustente nuevas actividades a incluir en la plataforma para después proponer un programa de difusión que genere tendencias en beneficio de los niños; además requiere del soporte pedagógico y andragógico para apoyar a docentes y padres de familia. Finalmente se deberán evaluar los resultados en su población objetivo.

Conclusiones o reflexiones finales

Dados los resultados obtenidos, se demuestra que el trabajo interdisciplinario a distancia, es posible aplicando el modelo de pensamiento *Effectuation*; por lo que se vislumbra otro campo de aplicación para el mismo. Los tiempos de crisis, son una oportunidad para innovar en la solución de problemas globales; aún dentro de un reducido espectro de nuestras posibilidades de tiempo y recursos.

Referencias

[1] BBC News (2020,03,29). Coronavirus: 5 lugares que han aplicado estrategias exitosas contra la pandemia del covid-19. [On line] Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-52067658

[2] N. Ahmad; M. G. Hasan; R. K. Barbhuiya. "*Identification and prioritization of strategies to tackle Covid-19 outbreak: A group-BWM based MCDM approach*". Applied Soft Computing. Vol. 111, pp. 1-13, noviembre 2021

[3] N. Amin. "*Rápido arribo de las vacunas contra la Covid-19 a nivel mundial, algunos problemas éticos a considerar*". Vaccimonitor, vol. 30, núm. 2, pp. 47-50, junio 2021

[4] D. Enguix; J. Aguirre; M. Sánchez; A. Hidalgo. (2020). Mutaciones, variantes y cepas de SARS-CoV-2. [On line] Available: https://doi.org.10.1016/jsemerg.2020.12.001

[5] IEASALC UNESCO (2020,05,13). Covid-19 y educación superior: De los efectos inmediatos al día después. Análisis de impactos, respuestas políticas y recomendaciones. [On line] Available: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7502929.pdf

[6] F. Méndez; (2021,03,18). Inequities in the emergence, manifestations and consequences of Covid19. Colombia Médica. [On line] Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28366572001

[7] R. Hernández; M. Sánchez; A. Fernández; M. Almodóvar; R. Hernández. Consideraciones sobre la adecuación de la teoría efectual para la formación de experiencias sobre emprendimiento. VII Congreso Internacional de Emprendimiento, 2019, pp. 1-4.

[8] A. Da Luz.; M. Pazos; M. Tögel. "*Efectos del confinamiento social, preventivo y obligatorio sobre la salud física y psíquica de los comodorenses*". Pódium, Vol. 16, núm. 1; pp. 1-15, abril, 2021

[9] G. Mildenberger, G. Schimpf, and J. Streicher, "*Social Innovation Assessment? Reflections on the impacts of social innovation on society - Outcomes of a systematic literature review*", epsir, vol. 5, no. 2, pp. 1-13, Dec. 2020.

[10] F. Bordignon. (2017). "*Laboratorios de Innovación Ciudadana, espacios para el hacer digital crítico.*" Virtualidad Educación y ciencia. Vol. 8 núm. 14, pp. 165-181, mayo, 2017

[11] M. S. Ramírez-Montoya; A. Mendoza-Domínguez; I. Sáenz-Negrete; A. Molina-Gutiérrez. Innovación y sustentabilidad energética, Colaboración multidisciplinar, MOOC e Investigación Educativa. ITESM, México. 2018

[12] V. H. Guadarrama-Atrizco and A. Acosta-Long. Ecosistema de Innovación Social en México. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Conacyt. 2007

[13] C. Arboleda; J. Montes; C. Correa; C. Arias. "*Laboratorios de innovación social, como estrategia para el fortalecimiento de la participación ciudadana*". Revista de Ciencias Sociales, vol. XXV, núm. 3, pp. 130-137, julio 2019

[14] J. A. Yáñez-Figueroa.; M. S. Ramírez-Montoya; F. J. García-Peñalvo. "Open innovation laboratories for social modeling sustainable society sensitive to social needs". Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality – TEEM'16. Salamanca, España. 2016

[15] M. Prieto.; L. Bermón; L. Ramírez. "*Diseño, desarrollo y evaluación de un recurso educativo digital para la introducción a la Administración de Sistemas Informáticos".* Revista Virtual Universidad Católica del Norte, núm. 56, pp. 31-51, junio, 2019

[16] J. Recio; P. Gutiérrez y G. Suárez. (2021). "*Recursos Educativos Abiertos en Comunidades Virtuales Docentes*", Apertura, Vol. 13, Núm. 1, pp.101-117, marzo, 2021

[17] J. Campos-Stivalet. (2020, feb,28). "*Effectuation o la importancia de aventurase: apuntes sobre el paradigma emprendedor*". Entrepreneur. [On line] Available: https://www.entrepreneur.com/article/346947

Diseño de un guante recolector de chícharo con tecnología de impresión 3D

A.C. Valdés Álvarez[1], A. Calderón Jiménez [1], L. A. Hernández Sánchez[1], C. Méndez Rivera[1], R. Mora Guadalupe[1]*

[1]Tecnológico Nacional de México/ ITS de Ciudad Serdán, Av. Instituto, Av. Tecnológico S/N, Col la Gloria, Cd Serdán Puebla, México, C.P 75520,
**acalderon@cdserdan.tecnm.mx*

***Área de participación**: Ingeniería Industrial*

Resumen

En la agricultura actual, el esfuerzo físico requerido para la siembra y la cosecha representa un desafío significativo. Aunque existen tecnologías de recolección disponibles, su alto costo limita su adopción, lo que lleva a los agricultores a depender de métodos tradicionales. Esto implica trabajo manual extenuante para los agricultores, resultando en fatiga y dificultad para cumplir con las metas de producción. Los cultivos, como el chícharo, a menudo sufren pérdidas debido a la falta de cosecha, lo que afecta la economía de los agricultores. Para abordar este problema, se propone el diseño de un guante cortador fabricado con tecnología de impresión 3D. Los resultados mostraron una reducción del 21% en el tiempo de cosecha, una disminución del 15% en lesiones, y un 13% de mejora en la recolección de chícharo de alta calidad.

***Palabras clave**: Agricultores, fatiga, impresión 3D, guante.*

Abstract

In today's agriculture, the physical effort required for planting and harvesting represents a significant challenge. Although harvesting technologies are available, their high cost limits their adoption, leading farmers to rely on traditional methods. This involves strenuous manual labor for farmers, resulting in fatigue and difficulty meeting production goals. Crops, such as peas, often suffer losses due to lack of harvest, which affects the economy of farmers. To address this problem, the design of a cutter glove manufactured with 3D printing technology is proposed. The results showed a 21% reduction in harvest time, a 15% decrease in injuries, and a 13% improvement in harvesting high-quality peas.

***Key words**: Farmers, fatigue, 3D printing, glove*

Introducción

En la sociedad contemporánea, el sector agrícola desempeña un papel de vital importancia, ya que constituye una fuente fundamental de ingresos para diversos grupos de la población, desde los dedicados a la labranza de la tierra hasta los consumidores finales. Estos actores desempeñan un rol directo en el desarrollo económico del país, brindando alimentos y recursos básicos. La región enfrenta desafíos tanto de corto plazo, ligados a la desaceleración económica y sus impactos sobre el bienestar y la solidez de los presupuestos estatales, como de largo plazo, en cuanto a la necesidad de asegurar el desarrollo económico, aprovechando el potencial de la región como proveedora de alimentos, pero atendiendo la conservación de los recursos naturales [1].

La baja en la producción agrícola es consecuencia de múltiples factores, entre los que destacan, por su interés para investigación, los bajos rendimientos agrícolas promedio, la inadecuada asimilación de tecnologías, deficiencias en el proceso de difusión de innovaciones técnicas y una grave desarticulación del sector primario con respecto a la cadena agroindustrial [2]. Si bien existen tecnologías innovadoras disponibles para mejorar la eficiencia de la recolección de cultivos, su adquisición suele ser prohibitivamente costosa, lo que lleva a los agricultores a depender en gran medida de métodos tradicionales de recolección.

Esto implica que los agricultores deban realizar manualmente la ardua tarea de recolectar los cultivos, lo cual genera un agotamiento físico considerable y, lamentablemente, con frecuencia resulta en una incapacidad para alcanzar las metas de producción deseadas. Las consecuencias de no lograr cumplir con los objetivos de producción son significativas, ya que pueden traducirse en la pérdida de frutos no cosechados y en una

disminución generalizada de la productividad agrícola. Además, en muchas ocasiones, los agricultores se ven desfavorecidos al recibir bajos ingresos por su labor cuando no poseen las habilidades requeridas para la recolección eficiente. Un cultivo que ejemplifica claramente los desafíos mencionados es el chícharo, donde se han evidenciado dificultades en su recolección debido a los factores mencionados.

Las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) han permeado casi todos los procesos de la vida de las personas; por su parte, la agricultura ha experimentado de manera similar esta evolución. Las TIC se han convertido en un actor indispensable en los modelos de negocios de los agricultores y esto ha permitido el aumento de la inserción de desarrollos tecnológicos en los procesos de agricultura. Adicional, la globalización ha llevado a que los agricultores se vean obligados a utilizar tecnologías en sus cultivos para aumentar la eficiencia y poder disminuir costos de producción [3].

En vista de esta problemática, se ha planteado una solución innovadora: el diseño y la fabricación de un guante cortador utilizando tecnología de impresión 3D. Esta propuesta tiene como objetivo brindar apoyo a los agricultores encargados de recolectar los guisantes, permitiéndoles aumentar la eficiencia de sus operaciones de corte sin poner en riesgo su integridad física. Al implementar este guante cortador, se logró un impacto positivo en la economía de los agricultores, al permitirles alcanzar sus metas de producción de manera más efectiva y reducir las pérdidas causadas por la falta de cosecha.

Metodología

Estado del arte y tipo de investigación:

Se realizó una búsqueda minuciosa de los diseños, modelos, prototipos, herramientas y artilugios en general, asociados a la propuesta que se pretende desarrollar, contemplando el tipo de investigación, de esta forma, concientizar acerca de la originalidad y áreas de oportunidad para la puesta en marcha del proyecto, a continuación, se muestra en resumen lo encontrado relacionado con el tema.

- Cosechadora de chícharo: Son máquinas especializadas diseñadas para recolectar de manera eficiente los chícharos de los cultivos. Estas cosechadoras pueden realizar el corte de los tallos y separar los chícharos de las vainas de manera automática [4].
- Tijeras de cosecha: Son herramientas manuales que permiten cortar los tallos de los chícharos de forma precisa. Estas tijeras suelen tener cuchillas afiladas y mangos ergonómicos para facilitar el proceso de recolección [5].
- Cestas de recolección: Son recipientes utilizados para almacenar y transportar los chícharos recolectados. Estas cestas suelen ser de mimbre o plástico resistente, y están diseñadas para facilitar la ventilación y evitar daños en los chícharos durante el transporte, actualmente en la región de estudio utilizan botes de plásticos o cubetas para solventar la recolección [6].
- Máquinas de cribado: Una vez recolectados, los chícharos pueden pasar por máquinas de cribado para separar impurezas y clasificarlos según su tamaño. Estas máquinas utilizan tamices y sistemas de vibración para realizar el proceso de separación, cabe mencionar que la zona no utiliza máquinas de cribado [6].

Identificar las necesidades del cliente

El primer paso para detectar las necesidades del cliente fue la obtención de una muestra, con la cual, se obtuvo información relevante para el estudio. Para obtener el tamaño ideal de la muestra, se utilizó la siguiente formula [7]:

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2 N}{e^2 (N-1) + Z^2 \sigma^2}$$

Donde:

N = tamaño del universo a estudiar.
σ = desviación estándar de la población.
Z = valor que se obtiene a través de niveles de confianza.

e = es el límite de error muestral admisible.

Datos:

N = 2560 personas (según INEGI 2020)
σ = 122
Z = 1.96
e = 1.8

Al sustituir se obtiene:

$$n: \frac{1.96^2 * 122 * 2560}{1.8^2(2560-1) + 1.96^2 * 122} = \frac{3.84 * 122 * 2560}{3.24(2559) + 3.84 * 122} = \frac{1199308}{8759} = 136.92 = 136\ encuestas$$

Se realizaron encuestas a 136 personas productoras agrícolas, lo cual, permitió conocer las necesidades que se presentan en el momento de sembrar y cosechar dando como resultado lo siguiente tomando en cuenta las preguntas con mayor relevancia:

Se les preguntó ¿cuál era lo más importante para su siembra y su cosecha?, dando como resultado:

- Riego y gestión del agua 30%
- Semillas 20%
- Fertilizantes 10%
- Maquinaria 40 %

Se les preguntó de igual manera ¿Cuál era la parte más importante de toda su cadena de producción?

- Cosecha 60%
- Siembra 30%
- Control 10%

Se les preguntó abiertamente ¿Cuál es el problema en el momento de cosechar?

- Dando como resultado unánime de la existencia de problemas de recolección y complejidad de la tarea (Esta pregunta fue sintetizada), además, de que no llegan a cubrir la totalidad del cultivo por el tiempo y la velocidad del corte del agricultor, trayendo como consecuencias una reducción de la producción esperada con la real cortada.

Dado el resultado se puede inferir que la cosecha es el factor con mayor relevancia para los agricultores, es de aquí donde surge la idea de un guante recolector de chícharo.

Conocer el proceso de cosecha:

Se llevó a cabo una investigación de campo para identificar los diversos procesos de cosecha de chícharo, los cuales, se presentan a continuación [6].

- Determinación de la madurez: Antes de la cosecha, se realiza una inspección para determinar si los chícharos han alcanzado la madurez adecuada para su recolección. Esto se hace verificando el tamaño, el color y la consistencia de las vainas de chícharo.
- Preparación de equipos: Se preparan los equipos y las herramientas necesarias para la cosecha, como cestas, cajas o contenedores para recolectar los chícharos.
- Corte de las vainas: Se cortan las vainas de chícharo de las plantas utilizando las manos. Las vainas se cortan cerca de la planta para evitar dañar las semillas y asegurar una recolección eficiente.
- Recolección de las vainas: Las vainas de chícharo cortadas se recolectan y se depositan en los contenedores o cestas preparados. Es importante manipular las vainas con cuidado para evitar dañar las semillas y preservar su calidad.
- Venta: Los chícharos se venden con diversos clientes, según la conveniencia del recolector.

Diagnóstico:

De acuerdo a la información recabada tomando en cuenta la pregunta sintetizada de la entrevista anteriormente mencionada se puede considerar lo siguiente:

- Los agricultores están preocupados en el corte del chícharo debido a que no cumplen con sus expectativas de producción.
- El corte de chícharo actualmente se realiza de manera manual.
- Actualmente la ganancia de los agricultores se basa en la calidad del corte del chícharo.

Proponer alternativas de diseño:

Para la propuesta de alternativas, se tomaron en cuenta principios de ergonomía, la cual, se define como el estudio científico de las relaciones entre el hombre y su medio ambiente laboral" [8]. Mientras que David Oborne menciona: "La labor de la ergonomía es primero determinar las capacidades del operario y después intentar construir un sistema de trabajo en el que se basen estas capacidades".

En el diseño de las alternativas se proponen diferentes prototipos que cubren las necesidades que presentan los agricultores, dada la revisión previa de metodologías de diseño.

Para ello principalmente se realizó un muestreo de mediciones antropométricas de las manos de los cortadores y cortadoras tomando en cuenta los siguientes elementos de medición.

1. Tamaño de los dedos: el cual fue medido desde el término de la palma hasta el final de los dedos
2. Puño: Tomando en cuenta la medida con el puño cerrado.
3. Palma: tomando las medidas en la parte media, alta y baja de la palma.
4. Pulgar: tomando en cuenta el largo y el ancho del mismo.
5. Índice: tomando en cuenta el largo y el ancho del mismo.

Esto dio como resultado lo necesario para poder comenzar con los diseños preliminares, donde los factores que se evaluaron son los siguientes:

- **Durabilidad:** Debe ser resistente y duradero para soportar el uso repetido en el campo sin rasgarse ni desgarrarse fácilmente.
- **Agarre:** Debería proporcionar un buen agarre para que los recolectores puedan agarrar los chícharos con facilidad y precisión.
- **Flexibilidad:** Debe ser lo suficientemente flexible para permitir movimientos de la mano y los dedos con comodidad, lo que facilita la recolección.
- **Transpirabilidad:** Debe permitir la transpiración de la mano para evitar la acumulación de humedad y sudor, lo que podría ser incómodo durante jornadas largas en el campo.
- **Ajuste adecuado:** Debe estar diseñado para ajustarse de manera segura a la mano del recolector, evitando que se caiga o se deslice durante el trabajo.
- **Resistencia a los elementos:** Debería ser resistente al agua y a la humedad, ya que la recolección de chícharos puede realizarse en condiciones húmedas o después de la lluvia.
- **Facilidad de limpieza:** Debe ser fácil de limpiar, ya que los chícharos pueden dejar residuos en el guante después de la recolección.
- **Protección contra espinas o elementos afilados:** Debe ofrecer cierta protección contra espinas u objetos afilados que puedan estar en el campo y que podrían lastimar las manos del recolector.
- **Material adecuado:** El material del guante debe ser adecuado para la recolección de chícharos, generalmente un material resistente pero suave que no dañe los chícharos.
- **Facilidad de uso:** Debe ser fácil de poner y quitar, lo que ahorra tiempo al recolector.
- **Tamaño variado:** Debería estar disponible en diferentes tallas para adaptarse a las manos de distintos recolectores.
- **Ergonomía:** Debería estar diseñado ergonómicamente para minimizar la fatiga de la mano y mejorar la eficiencia en la recolección.

En resumen, la propuesta presentada tiene como objetivo abordar una serie de necesidades relacionadas con la recolección de chícharo. Al cumplir con estos puntos clave, se logrará un impacto positivo en diferentes niveles, desde el aumento de la producción hasta la protección de los recolectores y el impulso socioeconómico en general.

Tomando en cuenta lo anterior se sintetizó a dos propuestas, donde: un guante cubra por completo la mano y otro donde sólo involucre los dedos de acción de corte, ambos guantes con adaptación de plástico tipo PLA en con una uña sin agarre y otra con agarre adaptándolo al guante, como se muestra en la Figura 1, es importante mencionar que el diseño del guante se centró principalmente en el pulgar y es justamente donde entra la impresión 3D.

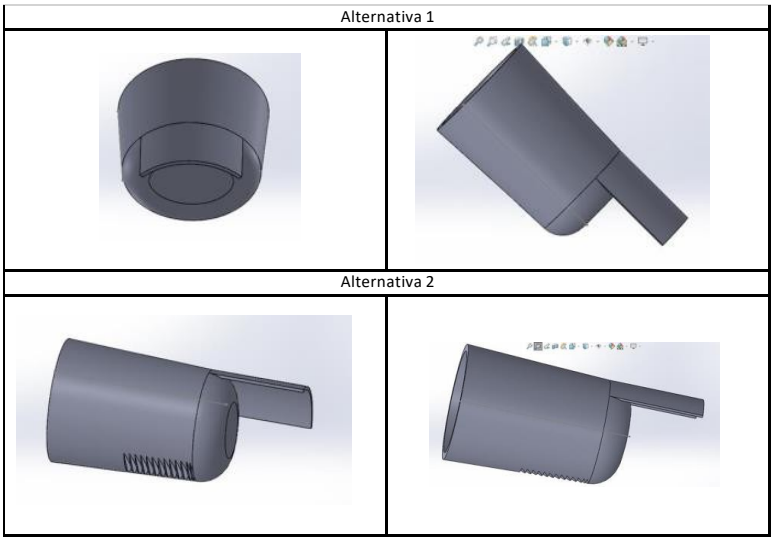


Figura 1. Alternativas

Seleccionar una de las alternativas de diseño:

Para selección de la alternativa se optó por realizar un método por puntos ponderando las características técnicas requeridas por el agricultor (mencionadas en el punto anterior).

Para ello las alternativas de selección fueron:

A. Un guante que cubra por completo la mano
B. Un guante que cubra la palma y los dedos: pulgar índice y medio.

Quedando como resultado por mayor puntaje la opción B.

Diseño de prototipo:

Se realizaron diferentes modelados del prototipo en un software CAD (SolidWorks), empleando diversas técnicas de diseño para materializar la propuesta seleccionada. Al analizar la Figura 2, se puede apreciar claramente la cuidadosa elección del cubrimiento de la mano. En esta etapa, se ha prestado especial atención a los detalles, considerando la ergonomía y la funcionalidad del producto, el diseño sólo cubre los dedos pulgar índice y medio.

Es importante mencionar que, durante el proceso de modelado en el software CAD, se han considerado diferentes variables, como las dimensiones adecuadas para adaptarse a la anatomía de la mano, la resistencia del material seleccionado y la viabilidad de fabricación del prototipo. Se ha buscado alcanzar un equilibrio óptimo entre diseño, funcionalidad y factibilidad técnica.

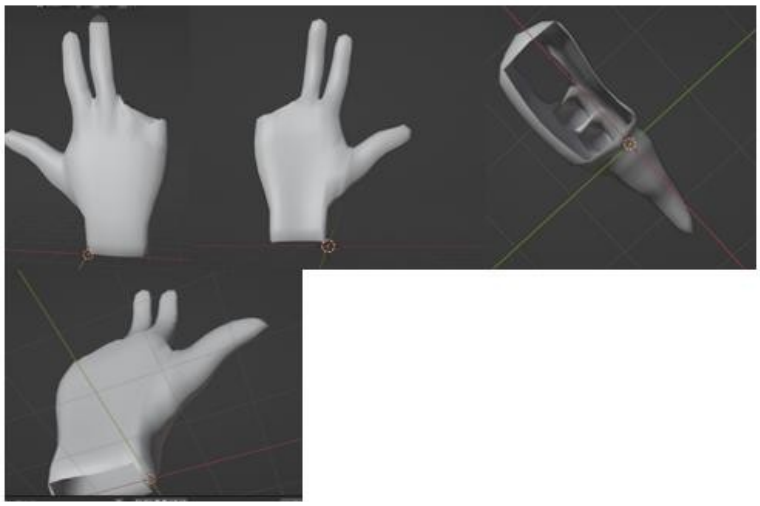


Figura 2. Diseño de guante seleccionado

En resumen, el diseño del guante combina características como las muescas de agarre en el dedo pulgar y la uña extendida, con el objetivo de optimizar el proceso de cosecha de chícharos como se muestra en la Figura 3. Con este enfoque ergonómico y versátil, se busca brindar a los agricultores una herramienta eficiente y cómoda para realizar su trabajo, mejorando así la productividad en el campo.

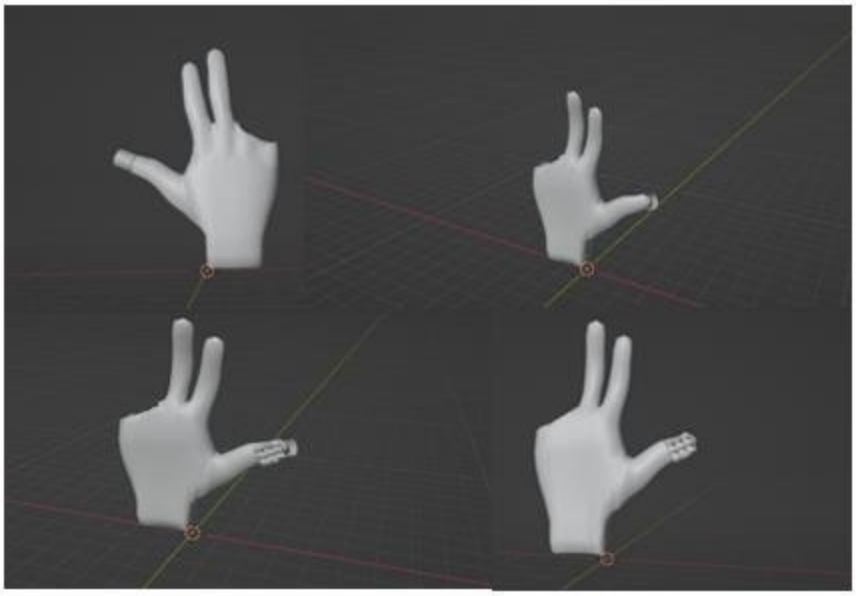


Figura 3. Diseño de guante seleccionado con muestras

El material seleccionado para la impresión 3D fue de Tipo PLA con un rango de fundición para el extrusor de 190° a 220° especificadas por el fabricante y una temperatura en cama de 60°, para la impresión se utilizó una impresora Ender 3 V2. En la Figura 4 se muestra los inicios de impresión y sus resultados.

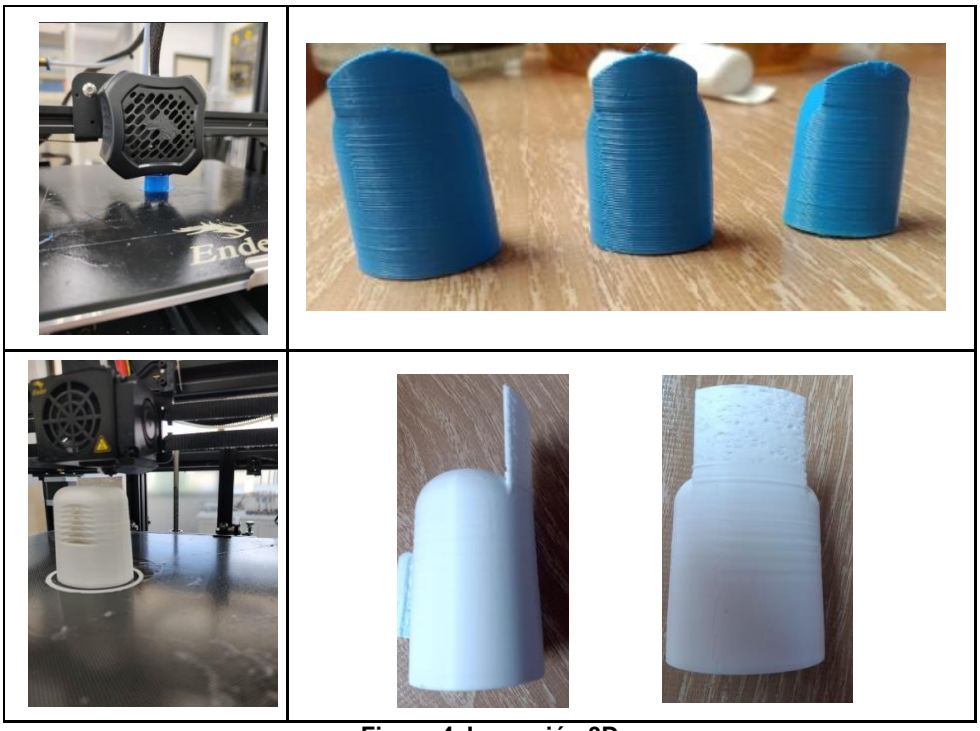


Figura 4. Impresión 3D

Resultados y discusión

Primeros resultados

Se obtuvieron los modelos finales del guante, y de manera provisional se llevaron al campo para poder determinar el grado de aceptación del mismo. Por lo anterior se realizó una nueva encuesta de satisfacción después del uso. Obteniéndose los siguientes resultados.

- El 100% de las personas NO usan dispositivos o herramientas para la cosecha del chícharo.
- El 92 % de las personas entrevistadas presentan lesiones o malestares en el cuerpo después de realizar la cosecha del chícharo.
- Las lesiones y malestares se presentan en: 40% en los dedos de las manos, 25 % en la palma de la mano y 20% en las muñecas de las manos y 15% en la espalda.
- El tiempo promedio del malestar dura entre 6 y 8 horas, siendo el de los dedos de la mano y la muñeca los de mayor duración.
- La intensidad del dolor se cuantifico en una escala del 1 al 5, siendo 1 menor intensidad y 5 de mayor intensidad, donde las personas en promedio manifiestan en una escala del 4 el 35% y en la del 5 el 65%.
- En la actividad de la cosecha del chícharo el 60 % de las personas que cortan son mujeres que rondan entre los 12 y 75 años de edad y el 40% son hombres entre 22 y 64 años de edad.
- El 90% manifiesta que han observado una disminución de sus capacidades diarias por las actividades de cosecha de chícharo, por lo cual, saben de los riesgos a la salud que se tienen, pero todo lo justifican con su necesidad económica y que esto ha sucedido por generaciones en sus núcleos familiares.

Segundos resultados

Se realizaron pruebas de corte chícharo con el prototipo final, capacitando a las personas en su uso, cabe mencionar que dichas pruebas se aplicaron a una cuadrilla de 16 personas de Santa Cruz Texmalaquilla Municipio de Atzizintla Puebla, quienes accedieron a dicho experimento, los resultados fueron los siguientes:

- Se realizó el proceso de cosecha de chícharo con el guante, obteniéndose una reducción del 21% del tiempo final de la jornada.
- Se propusieron movimientos de calentamiento antes de la jornada laboral.
- Se presentó la reducción de las lesiones o malestares en un 15%, en las primeras tres semanas de uso.
- Se realizaron las pruebas en la región de texmalaquilla y en barrio, que son zonas aledañas a Ciudad Serdán.
- Se generó un seguimiento médico de las personas con la finalidad de detectar en su momento enfermedades en desarrollo.
- Se dieron pláticas sobre el riesgo y enfermedades de trabajo que se tienen en la cosecha de los campos mexicanos.
- Se mejoró en un 13% la recolección de chícharo de primera, es decir, el corte fue más definido, no se maltrató la vaina y para los trabajadores se les dio un mejor pago por este, por lo cual, los ingresos económicos de las personas mejoraron significativamente.
- Se solicitó una mejora en el diseño impreso dando como resultado lo presentado en la Figura 5.

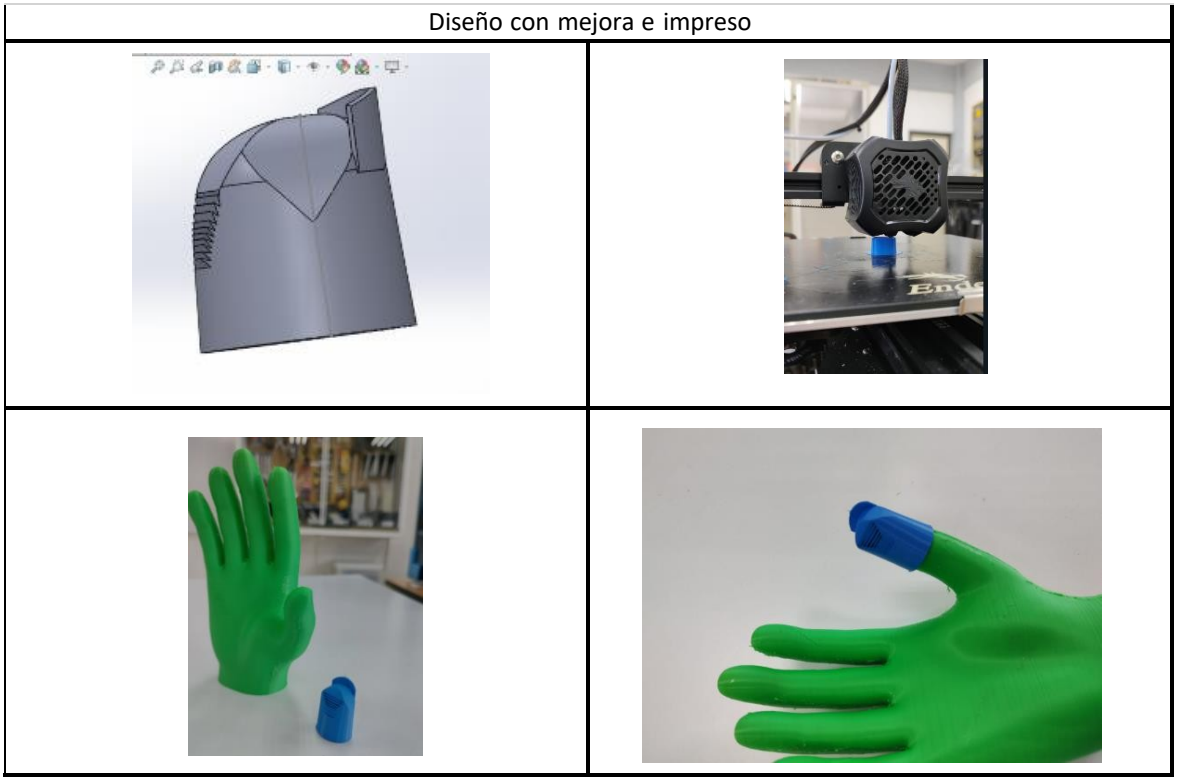


Figura 5. Diseño con mejora e impreso en 3D

Terceros resultados

Se presentó en las personas estudios sobre la tendencia del desarrollo del síndrome de túnel carpiano, dado que las personas en un 44% presentan pérdida de la fuerza en la mano, dado que para la actividad se requiere detalle, y aunque no se tenga un peso significativo de manera individual de una vaina, pero se cargan aproximadamente entre 20 y 23 kilos por persona.

Así mismo, se encontró que el 26% de las personas tienen malestar o dolor cuando realizan movimiento en las muñecas o dedos, fuera de su actividad o jornada laboral, y al ser uno de los síntomas principales de tendinitis, se debe de estudiar más profundamente.

Por todo lo anterior se debe encontraron indicios de dos posibles enfermedades que se están generando derivado de las actividades de cosecha de chícharo.

Trabajo a futuro

En cuanto al trabajo futuro, uno de los objetivos principales será abordar la mejora solicitada, que implica la optimización de la ergonomía del diseño actual. Esta solicitud proviene de la necesidad de garantizar la comodidad y la eficiencia en la interacción con el producto. Además, es esencial destacar que la impresión del diseño en PLA fue utilizando una impresora 3D de filamento, resultó en una estructura mucho más robustas de lo previsto dado a las limitaciones de la impresora Ender 3 V2.

En vista de esta caracteriza, en el próximo estudio se empleará una impresora de resina. Esta elección se basa en la intención de refinar aún más el diseño, buscando lograr una apariencia más delgada y estilizada, sin comprometer la durabilidad y la calidad del producto. La tecnología de impresión en resina nos permitirá explorar nuevas posibilidades de diseño y material, lo que seguramente contribuirá a alcanzar nuestros objetivos de mejora de manera más efectiva.

Conclusiones

El desarrollo y la implementación de un guante cortador fabricado con tecnología de impresión 3D tienen el potencial de revolucionar la recolección de cultivos como el chícharo. Este guante innovador no sólo reduce la fatiga física y el desgaste experimentado por los campesinos durante la cosecha, sino que también aumenta significativamente la eficiencia y la productividad en el campo.

Al utilizar la impresión 3D para fabricar el guante cortador, se logran diseños ergonómicos personalizados que se adaptan perfectamente a la mano de cada usuario. Esto garantiza una mayor comodidad y facilidad de movimiento, permitiendo a los campesinos realizar sus tareas de manera más eficiente y sin el riesgo de lesiones o agotamiento. Además, la ligereza y flexibilidad del material utilizado en la impresión 3D permiten un mejor control y precisión al cortar los chícharos, asegurando que se realice de manera óptima y evitando daños innecesarios a los cultivos, como lo muestra los resultados anteriormente mencionados.

Además, la introducción de esta tecnología en la agricultura tiene un impacto significativo en la economía de los agricultores. Al mejorar la eficiencia en la recolección, se logran mayores volúmenes de chícharos cosechados en menos tiempo. Esto no sólo aumenta los ingresos de los campesinos, sino que también reduce la pérdida de cultivos debido a retrasos en la cosecha. Al tener la capacidad de cumplir con las metas de producción, los agricultores pueden satisfacer la demanda del mercado y garantizar la entrega oportuna de sus productos, lo que genera mayores oportunidades de negocio y una posición más sólida en la cadena alimentaria.

Por otro lado, el uso de tecnología de impresión 3D en la fabricación del guante cortador abarata los costos en comparación con las tecnologías existentes en el mercado. Esto abre la puerta a una mayor accesibilidad para los agricultores, evitando así la necesidad de recurrir a métodos tradicionales que resultan en una menor eficiencia y mayores dificultades físicas.

En resumen, la implementación de un guante cortador fabricado con tecnología de impresión 3D representa una solución innovadora y prometedora para los problemas actuales en el campo. Este enfoque mejora la eficiencia y la productividad en la recolección de cultivos como el chícharo, al tiempo que protege la integridad física de los campesinos. Además, proporciona beneficios económicos tanto a nivel individual para los agricultores, como a nivel macroeconómico para el desarrollo y crecimiento del sector agrícola.

Agradecimientos

Al departamento de investigación del Tecnológico Nacional de México, campus Ciudad Serdán por su invaluable apoyo e impulso.
A los campesinos que brindaron su tiempo y disposición para este trabajo.

Referencias

[1] M. Araya y C. L. Quesada, erspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe, México: IICA, 2009.

[2] R. E. López, M. C. Valle y J. L. Solleiro, El cambio tecnológico en la agricultura y las agroindustrias en México: propuesta para una nueva dinámica en la actividad productiva, México: Siglo XXI, 1996.

[3] F. A. Simaca, J. A. Páez, E. C. Díaz y J. V. Palacio, La agricultura de precisión y herramientas TIC de apoyo, Colombia: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia, 2023.

[4] OXBO, «OXBO,» 23 Abril 2023. [En línea]. Available: https://oxbo.com/es/products/oxbo-epd540e/. [Último acceso: 2023 Abril 2023].

[5] «Sembralia,» 2021 01 2021. [En línea]. Available: https://sembralia.com/blogs/blog/tijeras-de-podar. [Último acceso: 26 04 2023].

[6] C. S. C. Texmalaquilla, Interviewee, *Chicaro y recolección.* [Entrevista]. 22 11 2022.

[7] M. R. Spiegel y L. J. Stephens, Estadística., México: Mc Graw-Hill, 2009.

[8] M. K, Ergonomía. Hombre en su ambiente de trabajo, Reino Unido: Chapman and Hall , 1965.

Mejora del rendimiento de un proceso mediante Kaizen, en una empresa de acuicultura en México

L. G. González Sosa[1], B. A. Villalobos Martínez[2], L. M. Blanco González[2], J. K. López Orduña[2], J. A. Sarmiento Torres[2]
[1]Alumna de la carrera de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana km 1080, CP 29050, Tuxtla Gutiérrez, México
[2]Docente del departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana km 1080, CP 29050, Tuxtla Gutiérrez, México
**bruno.vm@tuxtla.tecnm.mx*

***Área de participación**: Ingeniería Industrial*

Resumen

El presente trabajo muestra el desarrollo de un proyecto de mejora en una empresa de acuicultura del sur de México. El desarrollo de dicho trabajo se basó en las etapas de un proyecto tradicional DMAIC, pero sin buscar el objetivo de implementar un proyecto tradicional de Seis Sigma, sino más bien, utilizarlo como guía para el lanzamiento de eventos Kaizen, que permitan implementar mejoras pequeñas pero sustanciales para el proceso de producción. Una parte clave del proyecto fue el desarrollo del VSM de estado actual para identificar los puntos críticos de mejora del proceso de producción considerando las variables más importantes delimitadas en la etapa de definir del proyecto, esto permitió desarrollar eventos Kaizen que se enfocaran en ser efectivos y con beneficios potenciales sustanciales para el proceso.

***Palabras clave**: Kaizen, DMAIC, mejora continua, VSM*

Abstract

This paper shows the development of an improvement project in an aquaculture company in southern Mexico. The development of such work was based on the stages of a traditional DMAIC project, but without seeking the objective of implementing a traditional Six Sigma project, but rather, using it as a guide for the launch of Kaizen events, which allow to implement small but substantial improvements for the production process.

A key part of the project was the development of the VSM of current state to be able to identify the critical points of improvement of the production process considering the most important variables delimited in the stage of defining the project, this allowed to develop Kaizen events that focused on being effective and with substantial potential benefits for the process.

***Key words**: Kaizen, DMAIC, continuous improvement, VSM*

Introducción

La mejora continua en las empresas es un aspecto fundamental para su adecuado funcionamiento y posterior crecimiento en aras de lograr sus objetivos organizacionales, no se puede pretender que una empresa tenga éxito si no se encuentra comprometida con su propio proceso de mejora, según la idea de Guerra-López [2]. En la actualidad, existen muchas metodologías diferentes para lograr la mejora de los procesos, pero nada detiene a las empresas de utilizar tantas herramientas o la combinación de ellas que mejor les parezca para conseguir los objetivos de mejora que persiguen como lo presentan Quesado, Matias y Pimentel [4] en su trabajo.

Dado lo anterior, en este trabajo se desarrolló un proceso de mejora cuyo eje central fue la implementación de eventos Kaizen, pequeñas pero sustanciales mejoras como Socconini [6] sugiere debido a que éstas ofrecen un mejor resultado, permiten obtener beneficios de ellas y cimentar un proyecto de mejora aún más grande a futuro; para lograr esto se comenzó a trabajar sobre la base metodológica de Seis Sigma, que de acuerdo con Quick [5] éstas pueden orientar el trabajo de un proyecto de mejora continua, y el diagnóstico se sustentó principalmente en el desarrollo de un VSM para que con ayuda de éste se pudieran lanzar los eventos de mejora Kaizen como se ejemplifica en 50Minutos [1].

Metodología

El desarrollo del presente proyecto se realizó con base en las etapas de un proyecto de Seis Sigma, por lo que estas etapas son las que guían el desarrollo del mismo, no obstante, sólo funcionan como marco de referencia para el desarrollo del proyecto y por lo tanto no se utilizó el conjunto de herramientas tradicionales de la metodología y, por otra parte, se incluyeron otras herramientas de ingeniería industrial que permitieran obtener los beneficios que la empresa buscaba, en particular, aquellas que permitieron el desarrollo de eventos Kaizen.

Etapa Definir

El comienzo de la metodología consistió en el desarrollo de la etapa de Definir que, en este caso, incluyó un Project Charter, un breve diagrama de flujo, un diagrama de flujo de proceso, la definición de las variables del proceso que se utilizan para evaluar su desempeño al momento del desarrollo de la etapa y la definición de las variables críticas para la calidad o CTQ's, lo que según Liker [3] hace que el proceso de mejora sea más efectivo. Es importante mencionar que los diagramas o información que se presente en el trabajo procurarán reservar la información sensible sobre la empresa y se presentará únicamente aquella que sea relevante para la comprensión del proyecto. Los pasos para esta etapa son los siguientes:

1. Se comenzó fue la realización de un Project Charter (Figura 1) con el que se consolidó la importancia de trabajar en la mejora del rendimiento del proceso de producción ya que constantemente se tenían fluctuaciones en el rendimiento y se definió, junto con la administración de la empresa, que se tomarían acciones para mejorar el porcentaje del rendimiento, ya que éste sería el principal indicador para medir el éxito del proyecto, mediante el desarrollo de mejoras incrementales que permitieran incluir cambios concretos y no de gran escala pero muy significativos para el desempeño del proyecto.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO			
PROBLEMA / OPORTUNIDAD	La producción se ha visto afectada de manera significante en la obtención de los rendimientos óptimos de la materia prima en las líneas de valor agregado.		
PROPÓSITO DEL PROYECTO	Reducir fluctuaciones de la eficiencia del rendimiento en el proceso con base en la metodología DMAIC, para la mejora de la productividad.		
CASO DE NEGOCIOS	Aumentar el porcentaje en la eficiencia del rendimiento actual en Planta Proceso.		
METAS / METAS	Propuestas de mejoras para la productividad y la eficiencia del rendimiento.		
ENTREGABLES ESPERADOS	Elaboración de plan de acción y un documento digitalizado.		
ALCANCE Y CRONOGRAMA DEL PROYECTO			
DENTRO DEL ALCANCE DEL PROYECTO	Identificar las situaciones que afectan la eficiencia del rendimiento en la Planta Proceso, accediendo al proceso para realizar diagnósticos y a datos generales que involucran el rendimiento. Proporcionando finalmente un plan de acción en el mes de diciembre.		
FUERA DEL ALCANCE DEL PROYECTO	Acceso a otras áreas que no incluyen al proceso o realización de actividades externas al enfoque del proyecto.		
CRONOGRAMA TENTATIVO	**HITOS CLAVE**	**INICIO**	**FIN**
	Asignación del proyecto y conformación del Equipo de Proyecto	09/06/2021	09/10/2021
	Reconocimiento de la planta y el área de trabajo	09/13/2021	10/01/2021
	Identificación de actividades que no generen valor al producto mediante un diagnóstico visual	09/13/2021	10/01/2021
	Elaboración del Project Charter	09/27/2021	09/28/2021
	Determinación de tiempos muertos en las líneas de operación	10/04/2021	10/07/2021
	Señalar actividades que no generen valor agregado	10/08/2021	10/14/2021
	Analizar las condiciones de seguridad en las áreas y el reporte de mermas del proceso.	10/18/2021	10/19/2021
	Proponer estrategias de mejora con base en los resultados obtenidos	10/20/2021	11/13/2021
	Elaborar un plan de acción	11/15/2021	11/25/2021
	Documentar los datos como un proyecto final	11/26/2021	12/06/2021

Figura 1. Sección del Project Charter del proyecto.

2. Posteriormente, se comenzó a "conocer" las principales etapas del proceso de producción, tanto su ubicación en el proceso, así como, cada una de sus actividades a detalle, por lo que se elaboró un diagrama de flujo de proceso, como se ve en la Figura 2. En este diagrama se muestran las 6 principales etapas del proceso de producción, cabe mencionar que todos los productos, sin importar su presentación final, tienen que pasar por todas las áreas, aunque las operaciones a detalle pueden variar ligeramente.



Figura 2. Diagrama de flujo de las principales actividades del proceso.

3. Se realizaron diagramas de flujo de proceso como el que se observa en la Figura 3 para conocer a detalle las actividades que se hacen en cada una de las principales etapas del proceso de producción. Es importante mencionar que no se elaboraron únicamente 6 diagramas (uno para área principal), ya que hay algunas etapas que cambian la manera en la que procesan un producto dependiendo de la salida que se espera de ellos, por ejemplo, no es lo mismo realizar el arreglado (etapa 4) de un producto que sólo se venderá como un filete que de un producto que se venderá como cubos de pescado, por eso fue necesario elaborar un diagrama para cada etapa del principal producto y conocer así, que variables son las importantes para cada área.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

Página:	1 de 1	**Método actual** ✖		**Método propuesto**		
Empresa:			**Área:**	Degolle		
Observador:	Leslie Gabriela González Sosa		**Fecha:**	10 de octubre de 2021		

Resumen		**Operación** ●	**Inspección** ■	**Transporte** ➡	**Demora** ◗	**Almacenamiento** ▼
Total:	23	8	0	10	5	0
Tiempo (s):	3523	2661	0	97	765	0
Distancia (cm):	4410	1645	0	2490	275	0

No.	ACTIVIDADES	SÍMBOLO	TIEMPO (s)	DISTANCIA (cm)	OBSERVACIONES
1	Entrada de la mojarra a Hopper		2	75	
2	Pesado en Hopper		3	-	
3	Descenso al tanque de aturdido		2	20	
4	Anestesiado en el tanque		972	600	Temperatura 11° - 14.5°
5	Caída a la mesa de degolle		5	10	
6	Sacrificio de la mojarra manualmente		3	35	Si la mojarra no es anestesiada completamente, el operario tarda en degollarla
7	Desplazo al tobogán		12	15	
8	Llegada al tanque de desangrado		6	600	
9	Deceso de la mojarra en el tanque		1090	550	Si la residencia es menor a los 20 min, el filete es rojo
10	Espera mientras es introducida a Grader manualmente		18	250	
11	Introducción a Grader		2	30	
12	Pasar por Grader		3	400	
13	Subir por banda elevadora		16	400	
14	Caída en banda transportadora		2	20	
15	Transporte a las básculas de descamadoras		35	840	Se tomaron los datos de la descamadora más lejana
16	Llenado de básculas		110	30	200 - 250 kg
17	Espera mientras abre la descamadora		412	-	
18	Entrada a la descamadora		3	50	
19	Descamado del pescado		479	-	La residencia no debe ser menor a 7 minutos
20	Salida de escamadora		6	15	
21	Entrada al tanque de desinfección por banda		12	120	
22	Permanencia en el tanque		324	-	Depende de filete, la residencia
23	Salida a Área de Fileteo		8	350	
	TOTAL	8 0 10 5 0	3523	4410	
	PORCENTAJE	35 0 43 22 0			

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso del degolle de producto.

4. Se recolectaron las variables que la empresa utiliza actualmente para evaluar al desempeño del proceso, pero de forma general (Tabla 1), es decir, no se planean como una evaluación etapa por etapa al proceso, sino que se evalúan al final o en algún punto posible. Debido a lo anterior, se consideró necesario determinar las variables críticas para evaluar el desempeño de cada una de las etapas individuales del proceso, de esta manera se aseguran variables significativas al desempeño y relevantes para cada área.

Para la determinación de las variables críticas, se analizaron los diagramas de flujo del proceso para cada área como se presenta en la Figura 3 y se trató de considerar la importancia de las variables que ya se utilizaban actualmente (Tabla 1), con tal información en mente se elaboró un diagrama SIPOC que permitiera ver el panorama más grande, considerando principalmente las entradas y salidas para el proceso de producción. Una vez elaborado este diagrama (el cual se omite por razones de espacio) se procedió con la determinación de los CTQ's, los cuales permitieron establecer las variables más importantes para cada una de las principales áreas del proceso de producción con respecto del rendimiento de cada una de ellas de modo tal que se escuchara a la voz del cliente de cada área. Un fragmento para 3 de las 5 áreas del proceso de producción se muestra en la Figura 4, en donde puede verse el resultado del desarrollo del árbol de los CTQ's elaborado.

Tabla 1. Variables para medir el rendimiento del proceso.

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
Tiempos por minutos	Permite el establecimiento de estándares antes de iniciarse la producción. Peces por minutos, arreglado de filete por minuto y arreglado de lomo por minuto
Temperatura	Magnitud escalar necesaria para mantener en buen estado de la biomasa. Temperatura del agua y temperatura del área
Cantidad de inventarios	Registros tanto de entradas como de salidas en el proceso de producción de la empresa.
Cantidad de peces	Número de peces improcesables, peces muertos, peces pequeños y peces lesionados al día
Número de reprocesos	Cantidad de filetes que no son 100% despielados y tienen que volver a despielarse.
Cantidad de materiales de empaque	Control de material de empaque, en diferentes procesos del área de empaque
Cantidad de merma	Registro de los filetes mixtos, filetes en el piso, retazos

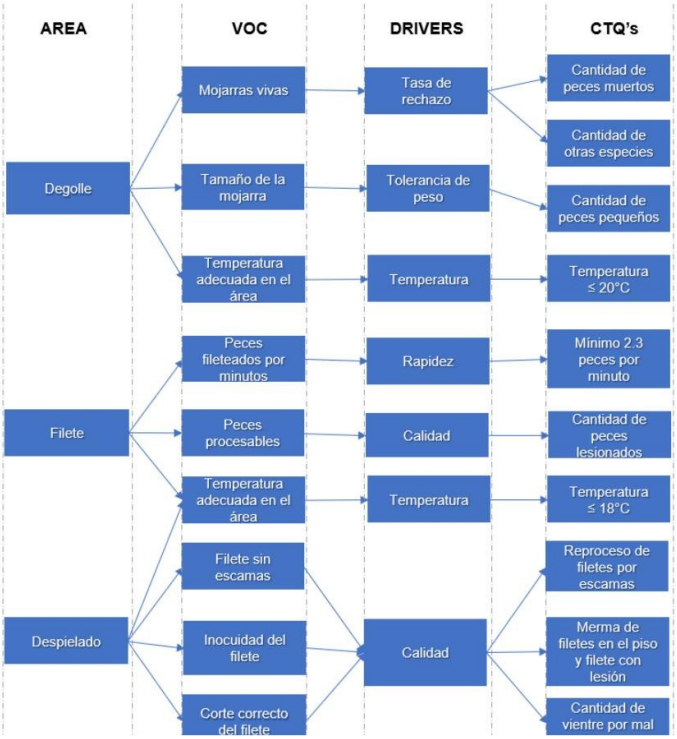


Figura 4. Definición de variables críticas para la calidad (CTQ´s).

Etapa Medir

La determinación de los CTQ's que se realizó en el punto anterior se utilizó para establecer cuáles eran las variables importantes a medir en la siguiente etapa de la metodología en el desarrollo de DMAIC, medir. Lo realizado en esta etapa fue lo siguiente:

1. La Tabla 2 muestra un ejemplo de la medición de una de las variables que se midieron para la etapa de medir, todas correspondientes a las que se obtuvieron de la determinación de los CTQ's, cabe mencionar que no se hizo la presentación de todos los resultados de las variables ya que se considera a varias de las variables como información sensible de la empresa además de ser impráctico por el espacio disponible.

2. Posteriormente, para la misma etapa de medir se realizó un recorrido en el piso de producción ya que es muy importante observar de primera mano lo que sucede al recolectar la información, hablar con las personas involucradas y conocer su punto de vista, este recorrido, también conocido como Gemba walk, permitió recabar una serie importante de observaciones e ideas de los involucrados en el proceso, una parte del resultado de este análisis se presenta en la Figura 5.

Tabla 2. Ejemplo de medición

Temperatura en Degolle	
Fecha	°C
13/09/2021	19
14/09/2021	18
15/09/2021	20
16/09/2021	19
20/09/2021	19
21/09/2021	21
22/09/2021	19
23/09/2021	18
24/09/2021	19
27/09/2021	21
28/09/2021	19
29/09/2021	21
30/09/2021	19
01/10/2021	19
04/10/2021	21
05/10/2021	19
06/10/2021	19
07/10/2021	20
08/10/2021	19
11/10/2021	19
12/10/2021	21
13/10/2021	20
14/10/2021	19
15/10/2021	18
18/10/2021	19
19/10/2021	19
20/10/2021	19
21/10/2021	20
22/10/2021	19
25/10/2021	19

GEMBA WALK		
ÁREA	CONDICIONES INSEGURAS	CAUSAS/CONSECUENCIAS
DEGOLLE	Temperatura a 19°C|	La temperatura con el EPP no es adecuada para los operarios A
	Las escamas se atascan en succionador de agua	El agua y las escamas se salen del contenedor y el piso es
		El área se inunda
	El agua del tanque de desangrado se derrama por los laterales y cae por el alimentador a Grader	El piso se encuentra siempre mojado y resbaloso
FILETEO	Tapa de difusor está despegada	Puede caerse en cualquier momento, hiriendo a algún filetero e incapacitarlo.
	La temperatura debería estar <18°C y se encuentra a 23 °C	Los operarios se sudan por la temperatura elevada, pudiendo contaminar a los filetes
	Merma en el piso	Piso resbaloso, pudiendo causar un incidente
DESPIELADO	El material del piso en conjunto a la grasa que cae	Se tiene que caminar con precaución y más lento, porque existe un alto riesgo de caerse, por ser muy resbaloso
	La temperatura debería estar <18°C y se encuentra a 22°C	Los operarios tienden a acalorarse y podrían contaminar con sudor al producto
	Se requiere una escalera asegurada por TRIO 3 y falta un pasamanos	Se tiene un escalón resbaloso, los operarios que frecuentan la zona pueden accidentarse
	Falta una adaptación para llegar al chiller 2	Puede haber un accidente por saltar la banda transportadora, los operarios saltan la banda transportadora
	Piso dañado	Ya que la forma segura de caminar en el piso es arrastrando un poco los pies, las personas se tropiezan
		Las taras se atoran, como el piso es resbaloso, es difícil moverlas
	Existe una manguera mal ubicada y desordenada	Puede caerse algún opearío, debido a un tropecio por esta.
	Existen lámparas fundidas en el área	La calidad de la iluminación no es buena
	Chiller 1 está desnivelado	Los operarios pueden golpearse la mano al querer desatorar el chiller
	Detenedor de filetes en chiller está suelto	Los operarios que trabajan debajo de ellos, pueden ser golpeados al subir el chiller
	La piel que se recolecta en taras, es empujado por debajo del chiller	El espacio es muy pequeño y los operarios se suelen golpear la cabeza
ARREGLADO	Exceso de merma en el piso	Las técnicas que tienen de arreglado, implican tirar merma por todos lados, pudiendo haber riesgos.
	Pasillo principal angosto	Las personas suelen golpearse al pasar, principalmente los arregladores de las últimas dos líneas.

Figura 5. Extracto del análisis del Gemba walk

Etapa Analizar

La siguiente etapa de la metodología desarrollada en el proyecto fue la etapa de analizar, para esta se desarrollaron la siguiente serie de pasos:

1. Se comenzó realizando un VSM de estado actual del proceso de producción para identificar las áreas de mejora en el proceso de producción, el cual se presenta en la Figura 6.

   El mapa de estado actual se elaboró con base en el producto más vendido para la empresa que son los filetes y se colocaron las variables que mejor representaron la situación actual, pero evitando colocar información sensible del proceso de producción o que se considerara inapropiada para divulgar. De la elaboración del mapa se lograron identificar dos áreas puntuales que necesitaban atención pronta para la mejora de su situación, las cuales fueron el área de despielado y el área de empaque, siendo el despielado el área con una mayor cantidad de problemas, entre ellos, la temperatura del área, el tiempo de procesamiento, la cantidad de mermas registradas para el área y sus diferentes fuentes.

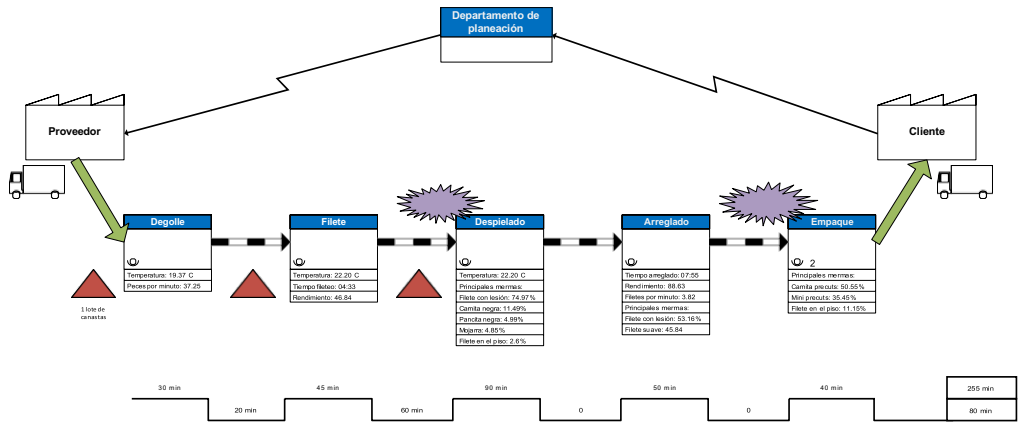


Figura 6. Value Stream Map de estado actual del proceso de producción de filetes.

2. Además de la elaboración del VSM de estado actual se hicieron gráficas para cada uno de los CTQ's que se identificaron en la etapa de definir para cada una de las principales etapas del proceso, lo que derivó en la realización de 17 gráficas en total, una para cada uno los CTQ's, estas permitieron analizar los valores de cada una de estas variables en comparación con sus valores esperados. Para ejemplificar lo anterior se utiliza la Figura 7, en donde se muestran los valores de temperatura para el área de degolle; en esta figura se puede observar cómo los valores de temperatura durante 30 días seguidos se mantuvieron mayormente bajo el nivel de temperatura ideal, pero en algunos días estos valores se excedieron, lo que provocó mermas, tales como los filetes suaves o con coloración negra que se observan en el VSM de estado actual de la Figura 6.

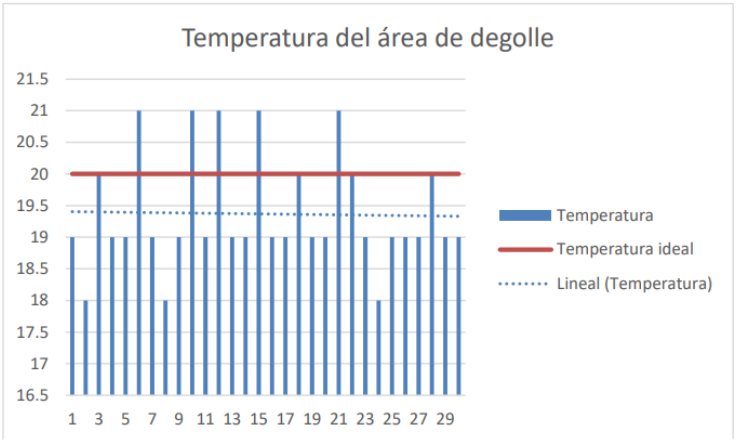


Figura 7. Medición del CTQ de la temperatura del área de degolle.

3. Con el análisis del VSM de estado actual y los resultados de la graficación de las variables de los CTQ's se plantearon una serie de mejoras a implementarse a modo de eventos Kaizen, las cuales corresponden al inicio de la etapa de mejorar de la metodología de Seis Sigma, los que permitieran llevar a cabo pequeñas acciones con grandes impactos en el proceso de producción, una parte de toda la serie de mejoras propuestas se muestran en la Tabla 3, cabe mencionar que solamente se muestran una parte de todas las propuestas debido a la limitación de espacio, pero se presentan algunas de las que se consideran más relevantes.

Tabla 3. Propuestas de mejora generadas

ÁREA	PROBLEMAS ENCONTRADOS / OPORTUNIDADES DE MEJORA	EXPLICACIÓN Y/O CONSECUENCIA	SOLUCIÓN PROPUESTA	BENEFICIOS
Filete	Se envían peces enteros en la banda transportadora de esqueletos	El personal no cumple con las normas y reglas establecidas en el proceso por falta de compromiso, además de tener desviaciones y fluctuaciones en el proceso productivo	PROPUESTA DE UN PROGRAMA DE CAPACITACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE FLUCTUACIONES DE RENDIMIENTO EN PLANTA PROCESO	Se disminuye e incluso se elimina el porcentaje de peces enteros, pasando únicamente esqueletos en banda transportadores, aumentando el porcentaje de rendimiento en el área.
	Se tiene eficacia en los cortes de filetes, pero no una eficiencia	Tener rapidez en los cortes no quiere decir que se estén cortando adecuadamente el filete y aprovechando al 100% la carne del filete		Mejorar la actitud, conocimiento y habilidades del personal buscando perfeccionar al colaborador en su puesto de trabajo
Despielado	Alto porcentaje de vientre en las canastas de filete	Ya que las canastas no son revisadas antes del peso final algunas contienen peces pequeños o mucho vientre, al momento de pesarlas intervienen en la fluctuación		Las canastas sólo contienen filetes, eliminando las malas prácticas de manufactura que se están detectando
Empaque	Filete y lomo mixto utilizado para precut	El producto que no es manipulado correctamente se envía como subproducto		Si el grado de preparación de los empleados es alto, también lo será su productividad aumentando la calidad de trabajo y reduciendo el filete mixto en el área
Empaque	Cantidades aproximadas de producto IVP	No se está haciendo el pesaje adecuado de los productos IVP, alterando el rendimiento por las cantidades inciertas	MATRIZ RACI	define las responsabilidades, papel y obligaciones de cada una de las personas que forman parte de una actividad

Etapa Mejorar

Para la etapa de mejorar se desarrollaron diferentes eventos Kaizen en busca de atacar los principales problemas identificados en etapas posteriores, estos eventos fueron los siguientes:

1. Se realizó la implementación de un programa de capacitación ya que se identificó que muchas de las causas que generaban problemas, mermas o bajas en el rendimiento de cada una de las áreas se relacionaba a un proceso de trabajo no estandarizado por parte de los operarios. Por lo anterior se desarrollo un plan de capacitación que permitiera identificar las necesidades de cada uno de los operarios en el piso de producción, por lo que se involucró a los operarios con el fin de conocer sus necesidades específicas para poder atacar los problemas encontrados durante la etapa de medir y analizar. Dado el tamaño del programa de capacitación solo se muestran los pasos que se consideraron para la elaboración del programa de capacitación en la Figura 8.



Figura 8. Proceso para el desarrollo del programa de capacitación.

2. Se desarrollaron de mejoras para el área de despielado para reducir los efectos de las mermas debido a los filetes suaves o los filetes en el piso. Como se ve en la Figura 9, los filetes constantemente se apilan y se caen al piso, lo que puede provocar problemas de filete suave y filete en el piso como se observó en el VSM de estado actual, por lo que se desarrollaron mejoras en el diseño de la entrega de los filetes de la despieladora para que estos se mantuvieran en su lugar, con mejoras muy simples pero que eliminaran el problema de raíz, como se muestra con los rediseños de la Figura 10.



Figura 9. Problemas identificados en despielado

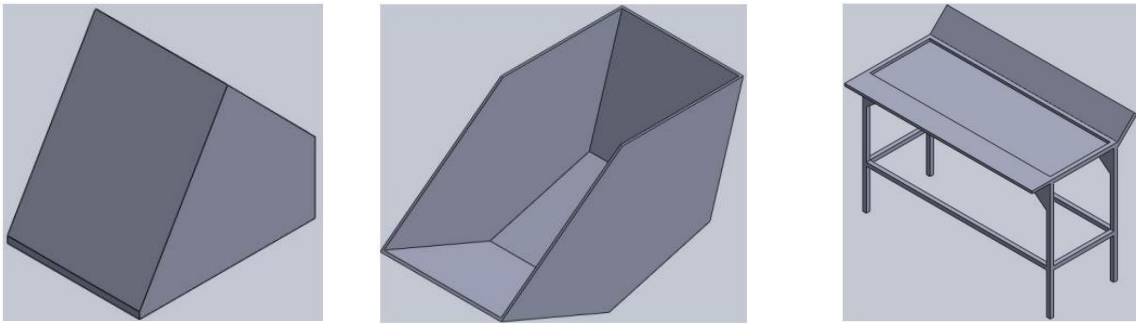


Figura 10. Modificaciones para eliminar mermas en despielado

3. Se realizó una matriz de asignación de responsabilidades, presentada en la Figura 11, con la participación de los operarios y los encargados del proyecto, para determinar claramente las responsabilidades de cada persona y atacar diferentes problemas, principalmente la observación de la adecuada temperatura en las áreas y el cuidado de los equipos, lo que permita mantener condiciones de temperatura estables en los diferentes espacios.

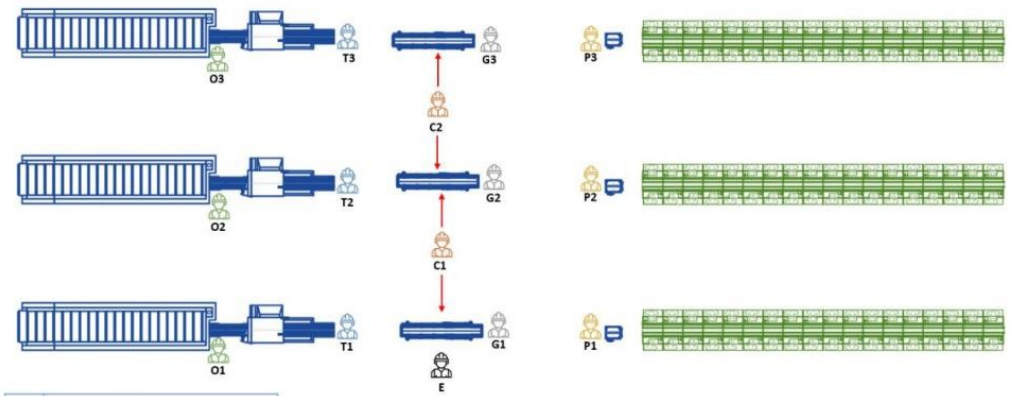
MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDADES

R	Responsable
A	Aprobador
C	Consultado
I	Informado

	ROLES / ACTIVIDADES	MIEMBROS DEL ÁREA DE EMPAQUE					
		EMPAQUE MP					
		PRODUCCIÓN	SUPERVISOR	ENCARGADO	OPERARIO A	AYUDANTE GENERAL	CALIDAD
1	Verificar el estado y condiciones de la maquinaria Termoformadora	A	I	C	R		
2	Asegurar las modificaciones y captura de especificaciones en el sistema	A	I	C	R		
3	Utilizar EPP distintivo del área, la limpieza y orden inmediata	A	I	C	R	R	
4	Clasificar el producto dispuesto a la alimentación de la termoformadora	A	I	C		R	
5	Separar en taras diferentes los que cumplen y no cumplen los requerimientos	A	I	C		R	
6	Garantizar el paso y empaque al vacío de producto de calidad.	A	I	C	R		A
7	Alimentar de manera continua la termoformadora llenando todos los moldes de esta	A	I	C		R	
8	Recibir el producto que sale de la termoformadora	A	I	C		R	
9	Realizar la inspección continua de la operación de la máquina	A	I	C	R		
10	Separar el producto que no cumpla con las especificaciones requeridas	A	I	C		R	A
11	Acomodar 40 o 50 piezas en bandejas según el producto procesado	A	I	C		R	
12	Colocar las bandejas en los carritos de manera ordenada.	A	I	C		R	
13	Llevar el carrito a la báscula patín para realizar su pesaje	A	I			R	
14	Descontar al peso generado el peso del carrito con bandejas y el peso del MP	A	I			R	
15	Anotar los datos en la papeleta	A	I			R	
16	Inspeccionar que los datos sean correctos	A	I	R			C
17	Aprobar los datos en la papeleta	A	I	C			R
18	Llevar carrito al área de empaque de MP	A	I	C		R	

Figura 11. Matriz de asignación de responsabilidades.

4. Se llevó a cabo la organización del personal de los equipos de despielado, de modo tal que se pudiera mantener a los equipos operando todo el tiempo, ya que la despieladora es un área que es un cuello de botella en el proceso de producción. Para esta actividad, si bien no se implementó SMED, si se utilizó la misma idea de separación de actividades internas y externas, su clasificación y perfeccionamiento para el ordenamiento de las tareas y mantener a las máquinas operando al 100%, evitar los tiempos de paro, el equipo y personal se muestra en la Figura 12 y su ordenamiento se explicó por medio de las imágenes a los operarios.



E	Encargado de grupo
P	Pesador final (Operario B)
G	Alimentador de grader (Operario B)
C	Clasificador filete (Operario B)
T	Alimentador de TRIO (Operario B)
O	Operador de TRIO (Operario B)

Figura 12. Maquinaria y personal del área de despielado.

5. Este evento se realizó para el área de despielado también, buscando mantener su operación al 100% y la reducción de los tiempos de paro para tal área, este evento surgió a raíz del análisis de las fallas en el área

de despielado, como se ve en la Tabla 4, ya que una que se producía de forma repetitiva eran los paros por motivos de la cuchilla de corte.

Tabla 4. Fallas para el área de despielado

Inicio de Paro	Fin de Paro	Duración	Sub-(Equipo/Proceso)	Descripción de la causa del paro	Acción correctiva	Tipo de falla
14:45	15:00	15.00	cuchilla	cuchilla rota	cambio de pieza	Mantenimiento
02:30	02:45	15.00	cuchilla	cuchilla rota	cambio	Mantenimiento
12:20	12:45	25.00	cuchilla	cuchilla rota	cambio	Mantenimiento
06:50	07:50	60.00	cuchilla	falta de refacciones (cuchilla) trio 3	cambio de piezas	Mantenimiento
10:05	10:25	20.00	cuchilla	cuchilla rota	cambio	Mantenimiento
10:00	10:19	19.00	Cuchilla	cuchilla en mal estado	cambio de cuchilla	Mantenimiento
11:50	12:05	15.00	Cuchilla	cuchilla rota	Cambio	Mantenimiento

Una falla recurrente para esta área fue el cambio de cuchillas en las despieladoras y se detectó que el cambio de estas requería de mucho tiempo, sin ser necesario, por lo que se decidió cambiar el lugar de almacenamiento de las cuchillas lo que redujo considerablemente los traslados para hacer los cambios de este componente vital como se observa en la Figura 13.

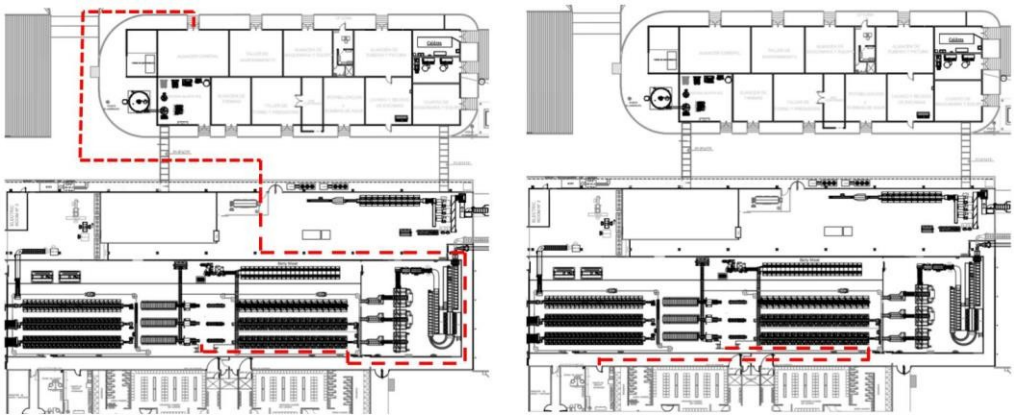


Figura 13. Antes y después del cambio de almacenamiento de las cuchillas para despieladora.

Resultados y discusión

Para el desarrollo del proyecto se obtuvieron una gran cantidad de resultados diferentes, por mencionar dos: la Tabla 5 presenta los resultados del cambio del lugar de almacenamiento de las cuchillas y la Figura 14 presenta las reducciones de tiempo muerto para la organización de las actividades en el área de despielado. En este caso ambos eventos Kaizen representaron un beneficio para la empresa, el primero con una mejora directa del rendimiento de poco más del 4% y el segundo con una mejora de reducción de tiempo muerto del 70%, lo que demostró la efectividad de los eventos Kaizen.

Tabla 5. Antes y después del cambio de cuchillas

Método	Actual	Propuesto
Lugar	Cuchilla en almacén general	Cuchilla en Planta Proceso
Tiempo de traslado (minutos)	19.13	5
Distancia (metros)	175	80
Tiempo de cambio de cuchilla (minutos)	5	5
Tiempo total (minutos)	24.13	10.00
Tiempo total (Segundos)	1453.00	600.00
Filetes por minuto	3148	1300
Canastas acumuladas	84	35
Rendimiento	**32.01%**	**36.79%**

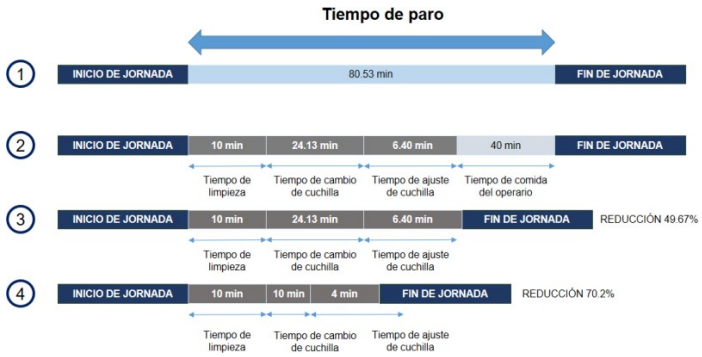


Figura 14. Actividades antes y después de la mejora SMED

Del desarrollo de las mejoras propuestas para el proyecto, se realizó una comparación de los valores actuales de rendimiento, el indicador de desempeño general del proyecto, presentado en la Figura 15. En esta gráfica se puede ver que el valor promedio es de 32.5% para el rendimiento actual, señalado con una línea de color azul y que, comparado con lo esperado con la implementación de los eventos Kaizen, éstos ofrecen una mejora del 11.5%, alcanzando valores de rendimiento global de 44% como se ve con las barras de color verde.

Finalmente se realizó un estimado de los ahorros esperados con la implementación de las mejoras, lo cual da una idea más clara del impacto de las mejoras propuestas, en este caso se esperaría que, si se logran implementar todas las mejoras propuestas, la empresa consiga un ahorro de poco más de $ 114,000 al mes, por sólo el desarrollo de eventos Kaizen, como se observa en la Tabla 6, cabe mencionar que no es posible hacer una comparación del antes y después debido a que la empresa prefiere reservar los montos totales.

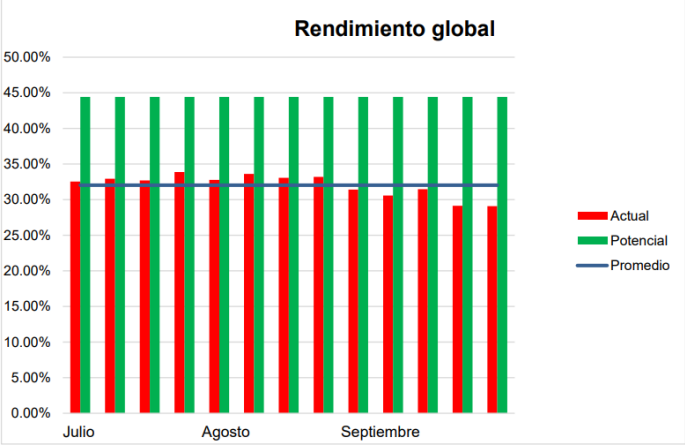


Figura 15. Comparación del rendimiento actual vs esperado.

Tabla 6. Impacto potencial de los eventos Kaizen.

Producto	Promedio (lbs)	Biomasa (kg)	Costos ($)
Filete suave	2,129.25	3,163.57	$ 75,925.70
Filete en el piso	1,073.14	1,594.44	$ 38,266.60
Impacto potencial de las mejoras mensuales			**$ 114,192.29**

Conclusiones

En conclusión, el desarrollo del proyecto trajo consigo una cantidad importante de beneficios para la empresa, primero que nada, se comprobó la efectividad de combinar herramientas de ingeniería industrial para el beneficio de la organización, utilizando la metodología de Seis Sigma para guiar el desarrollo del proyecto, el VSM para identificar las posibles áreas de mejora y comenzar con el desarrollo de los eventos Kaizen lo que traería consigo una mejora del 11.5% del rendimiento global, el principal indicador del proyecto.

El segundo beneficio principal del proyecto fueron los ahorros potenciales de la implementación de los eventos Kaizen ya que, únicamente considerando la mejora en el rendimiento de los procesos se pueden tener beneficios potenciales que ascienden hasta los $114,000.

Referencias

[1] 50Minutos, “El mapa del flujo de valor: los secretos de la herramienta clave del Lean Manufacturing”, pp. 9-12, 50Minutos.es, 2017

[2] I. J. Guerra-López, “Evaluación y mejora continua: Conceptos y herramientas para la medición y mejora del desempeño”, pp. 9-11, AuthorHouse, 2007

[3] J. K. Liker, “Las claves del éxito de Toyota: 14 principios de gestión del fabricante más grande del mundo”, pp. 215 - 220, Gestión2000, 2019

[4] J. L. Quesado Pinto, J. C. O. Matias, C. Pimentel, “Just in time factory: Implementation through Lean Manufacturing tools”, pp. 113-120 Springer, 2018

[5] T. Quick, “Splitting the DMAIC: Unleash the power of continuous improvement”, pp 1 – 30, Quality Press, 2019

[6] L. Socconini, “Lean Manufacturing: paso a paso”, pp. 125-130, Alpha Editorial, 2019

El problema *Dial–a–Ride* y sus variantes

Erick Cervantes–Mendieta[1], M. Angélica Salazar–Aguilar[1]*
[1]Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
**erick.cervantesmnd@uanl.edu.mx*

***Área de participación**: Ingeniería Industrial*

Resumen

El problema Dial–a–Ride (DARP) consiste en diseñar rutas de vehículos y programar el traslado de usuarios que demandan servicio desde un punto de origen a un destino. Su principal aplicación se encuentra en trasladar personas de la tercera edad o personas con alguna discapacidad. En el problema clásico, un conjunto de clientes realiza una solicitud de servicio, por lo que estos deben ser recogidos en algún punto llamado origen y entregados en algún punto denominado destino. Por lo general los clientes establecen algunos horarios en los que desean ser transportados, por lo que el DARP puede ser definido como una combinación de un problema de ruteo de vehículos (VRP) y un problema de planificación de tareas. En este trabajo se presenta una clasificación actualizada de las variantes del DARP y algunas de las referencias más relevantes que han sido estudiadas en la literatura.

***Palabras clave**: optimización, ruteo de vehículos, DARP.*

Abstract

Dial-a-Ride problem (DARP) consists of designing vehicle routes and schedules for users who demand service from a point of origin to a destination. The principal application is transferring the elderly or people with disabilities. In the classic problem, a set of customers makes a request for service, so these must be collected at some point called the origin and delivered at a different point called the destination. Customers usually set some schedules in which they want to be transported, so DARP can be defined as a combination of a vehicle routing problem (VRP) and a scheduling problem. This paper presents an updated classification of DARP variants and some of the most relevant references that have been studied in the literature.

***Key words**: optimization, vehicle routing problem, dial-a-ride problem.*

Introducción

Dial–a–Ride (DAR) es un servicio de transportación utilizado en diferentes países (principalmente en Estados Unidos) con la característica de que las personas deben hacer una reservación adelantada por teléfono. Típicamente es utilizado para trasladar personas de la tercera edad y/o personas con alguna discapacidad. Si bien, este tipo de servicio no es exclusivo, la idea se basa en tener viajes compartidos, los cuales se proporcionan durante las mismas horas de operación que el servicio de autobuses existente en cualquier área. Este servicio se asemeja al servicio de paratránsito (transporte público para personas con discapacidades) o taxi en su ejecución.

Así, las empresas que ofrecen este tipo de servicio se enfrentan al problema de diseñar rutas y horarios de sus vehículos para satisfacer la demanda de un número finito de usuarios, cuyas solicitudes de puntos de recogida y entrega han sido especificados, a este tipo de problema se le conoce como el Problema de *Dial–a–Ride* (DARP). Para una definición formal del problema, modelación matemática, enfoques de investigación y otros problemas relacionados con la generación de rutas de vehículos para el transporte de personas, se recomienda el trabajo de Doerner y Salazar [3]. Dichos autores empatan la idea del DARP a un problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega y ventanas de tiempo (VRPPDTW) (ver Dumas et al. [6]), sin embargo, este tipo de problema es comúnmente asociado al transporte de mercancías y no al transporte de personas, en donde un servicio de alta calidad es obligatorio.

La primera revisión a este tipo de problemas se debe a Oxley [2], en su trabajo demuestra la viabilidad de un servicio de transporte público bajo demanda, partiendo del análisis de la primera existencia de este servicio ofrecido en Mansfield, Ohio, en los Estados Unidos en 1970, además, se plantea el surgimiento de nuevos esquemas similares en otros lugares.

Para una reseña de los modelos y algoritmos de solución desarrollados hasta 2007, se recomienda al lector a Cordeau y Laporte [5], quienes clasifican a los DARPs en variantes i) *estáticas* o *dinámicas* y ii) si se utiliza *un* o *múltiples vehículos*.

Por otra parte, Molenbruch et al. [4] además de presentar una tipología de los DARPs, presentan en su trabajo una amplia gama de métodos de solución propuestos en la literatura, así como detalles completos de las características del problema en cada documento analizado, sin embargo, su clasificación limita a tres características que distingue múltiples categorías de características de la vida real: i) *diseño de servicio avanzado* (heterogeneidad, propiedades de enrutamiento, especificaciones de calidad), ii) *objetivos alternativos* (un solo objetivo, múltiples objetivos), y iii) *estocástico o dinámico* (tiempos de viaje, solicitudes, comportamiento del usuario).

Otra clasificación de las diversas variantes del problema, metodologías de solución y referencias a instancias disponibles en línea, lo presentan Ho et al. [1]. Estos autores categoriza los DARPs en i) *estáticos y deterministas*, ii) *estáticos y estocásticos*, iii) *dinámicos y deterministas*, *y* iv) *dinámicos y estocásticos*, también muestran si las variantes consideran ventanas de tiempo, capacidad del vehículo, el tiempo de viaje, la duración de la ruta y si utiliza visitas selectivas, el grado de heterogeneidad de la flota (homogénea o heterogénea), el número de vehículos utilizados, la cantidad de funciones objetivo a considerar (objetivos únicos o múltiples), la cantidad de depósitos considerados y la cantidad de viajes permitidos en un solo día.

Una interesante y vasta taxonomía de los DARPs es presentada por Gökay et al. [7], en esta revisión, se consideran las restricciones del problema de estudio para categorizar diversas variantes de los DARPs: i) *estático o dinámico*, ii) *determinista o estocástico*, iii) *único o múltiple vehículo*, iv) *único o múltiples depósitos*, v) *con o sin restricciones de tiempo*, vi) *vehículos homogéneos o heterogéneos*, vii) *con o sin backhauls*, $viii$) *con o sin transferencias*, ix) *con o sin vehículos eléctricos*, x) *con o sin puntos de encuentro*, xi) *con o sin preferencias de usuario*.

Como pasa comúnmente en el área de la Optimización, los DARPs están motivados por aplicaciones de la vida real, cada una de las diferentes variantes presentadas en la literatura aborda diferentes características que conducen a ciertas limitaciones u objetivos específicos. Conforme el tiempo avanza más variantes del DARP son propuestas, es por esto que el objetivo de este trabajo es presentar la mayor cantidad de variantes de los DARPs abordadas en la literatura desde 1980 hasta 2021, aunado a referencias de trabajos que aporten el entendimiento de dichas variantes.

Con esto se pretende abrir aún más el panorama a este tipo de problemas, para que investigadores interesados en el área analicen la pertinencia de nuevas variantes y/o combinaciones de estas.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: se presenta una *descripción del problema* base, seguido de una *clasificación* de las diferentes variantes encontradas en la literatura, finalmente se presentan las *conclusiones* generales.

Descripción del problema

Según Doerner y Salazar [3], el DARP es una combinación de un problema de ruteo de vehículos y un problema de planificación de tareas. El primero consiste en diseñar las rutas de los vehículos, asignar la solicitud de cada cliente a un vehículo y determinar la secuencia de las visitas. El segundo consiste en decidir la hora a la que cada vehículo inicia el servicio en cada ubicación. Ambos problemas deben integrarse en uno sólo cuando se busca dar solución a un DARP.

Lo ideal en este tipo de problemas es que un *vehículo* traslade una gran cantidad de pasajeros con un servicio personalizado. En algunas aplicaciones algunos clientes pueden ser transportados por dos o más vehículos, uno tras otro unidos por un punto de transferencia, aunque en la mayoría de los casos solo se asigna un vehículo para atender la solicitud de cada cliente.

Es importante mencionar que el problema empieza cuando un conjunto de *clientes* realiza una solicitud de servicio, por lo que, como puede verse en la Figura **1**, cada uno de ellos requiere ser *recogido* en alguna ubicación determinada llamada *origen*, para luego ser *entregado* en otra ubicación diferente, denominada *destino*, por lo general los clientes imponen algunos *tiempos* en los que desean ser transportados por los vehículos que salen de un depósito.



Figura 1. Elementos de un DARP: un depósito, los orígenes $(+)$ y los destinos $(-)$ de los clientes (cinco en este caso) que requieren un servicio.

Luego, el problema puede verse como un *problema de optimización*, en dónde se desea asignar un vehículo o un conjunto de vehículos a cada una de las solicitudes de cada cliente, por lo que es necesario diseñar las rutas de los vehículos para que se satisfaga la demanda de los clientes en los límites de tiempo establecidos a un costo mínimo. Por lo general, este costo refleja la distancia total del viaje realizado por los vehículos utilizados y la satisfacción del cliente.

En el DARP, al ser una variante del VRP, se deben satisfacer algunas restricciones cuando se determinan las rutas que debe(n) seguir el(los) vehículo(s), como lo es que cada solicitud debe ser atendida una sola vez, los vehículos deben regresar al depósito de donde salió, por lo general el servicio de recogida y entrega a una solicitud es atendida por un mismo vehículo, una solicitud debe ser recogida antes de ser entregada, no se puede exceder la capacidad del vehículo, existen intervalos de tiempo para recoger y entregar a cada clientes, el tiempo que un usuario pasa en un vehículo, es decir, la diferencia entre las horas programadas de recogida y entrega.

Ho et al. [1] indican que el objetivo del problema depende mucho de la aplicación. Algunos objetivos típicos adoptan la perspectiva del operador y/o la perspectiva de los clientes. Sin embargo, los objetivos desde las dos perspectivas pueden estar en conflicto entre sí: es posible que sea necesario mejorar la experiencia de los clientes (por ejemplo, reducir el tiempo total de viaje y el tiempo de espera) o aumentar el costo operativo (por ejemplo, contratar más vehículos).

Se recomienda al lector revisar el trabajo de Cordeau [10] para el análisis del modelo matemático básico del DARP, el cual ha sido estudiado extensamente por otros autores y ha formado la base para otras extensiones de problemas hasta la fecha.

Clasificación del DARP

Se utilizó Google Scholar (https://scholar.google.es/) para la búsqueda de trabajos en inglés con las palabras clave: *dial-a-ride*, DARP variants. Luego, se realizó una búsqueda exhaustiva para encontrar en los resúmenes de los documentos las diferentes variantes que incluían la palabra DARP. Aunque existen bastantes trabajos para una sola variante, se trató de incluir a los autores que la propusieron originalmente, y para los demás, se incluyeron los trabajos más relevantes que describen en general las características de dicha variante.

DARP dinámico (D-DARP)

Los servicios *Dial–a–Ride* pueden operar de acuerdo con un modo estático o dinámico (Cordeau y Laporte [5]). En el caso estático, todas las solicitudes de transporte se conocen de antemano antes planificar todas las rutas, mientras que, en el caso dinámico, las solicitudes se revelan gradualmente a lo largo del día y las rutas de los vehículos se ajustan en tiempo real para satisfacer la demanda.

Una definición más precisa del **DARP *estático*** lo hace Psaraftis [9], en su trabajo describe que cada cliente solicita un servicio vía telefónica, con lo que se puede ir formando una lista cronológica de solicitudes a cubrir, suponiendo que en un tiempo $t = 0$, un solo vehículo está disponible, y su tarea, conforme avanza el tiempo, es cubrir la demanda de los clientes que aparecen únicamente en la lista de solicitudes. También el autor analiza el caso del DDARP, para el cual cada nueva solicitud que hace un cliente es automáticamente elegible para su consideración en el momento en que se genera, por lo que cada que aparece una solicitud de este tipo, la entrada del problema se modifica, al igual que la solución al problema. Aunque debe resaltarse que esta nueva modificación no puede afectar la primera parte de la ruta, pero por obvias razones, si afectará la parte restante. Así, el procedimiento de solución en el caso dinámico debe estar activo siempre, ya que nuevas entradas pueden ir anexándose al problema.

DARP estocástico (S-DARP)

Si bien la mayoría de los DARPs presentados en la literatura son ***deterministas*** (es decir, se asume que toda la información necesaria para resolver el problema se conoce con certeza), en la práctica, algunos de los parámetros están sujetos a incertidumbre, como, por ejemplo, los tiempos de transporte, la disponibilidad de los vehículos, etc., uno de estos casos lo analizan Chassaing et al. [11]. Los autores proponen al SDARP como una variante similar al DARP estático, con la diferencia que los tiempos de transporte no son constantes y se modelan como una variable aleatoria positiva, esto debido a que existen problemas como el atasco, el mantenimiento de las carreteras o las condiciones meteorológicas que pudieran presentarse. Para más información y trabajos relacionados con estas variantes ver Ho et al. [1].

DARP con un único vehículo (1-DARP)

Psaraftis [12] indica que en la práctica es difícil tener un problema DARP con un solo vehículo, sin embargo, los algoritmos utilizados para solucionar este tipo de problemas pueden ser utilizados como subrutinas para los problemas en los que se tenga una flota de vehículos. Tal es el caso del trabajo presentado por Psaraftis [9], en el cual la versión del problema a resolver involucra un conjunto de clientes que solicitan un *servicio inmediato* (lo más pronto posible) desde orígenes y destinos distintos, cuyo servicio será cubierto por un único vehículo, cuya ubicación inicial es conocida (por ejemplo, un depósito). Algunas limitantes de este tipo de problemas son la capacidad del vehículo y que los tiempos de servicio algunas veces podrían despreciarse, ya que no importa a qué cliente se le dará servicio primero.

DARP con múltiples vehículos (m-DARP)

De la variante anterior, tenemos la noción de que un cliente llama a los servicios *Dial–a–Ride* para solicitar transporte desde y hacia una ubicación, y la compañía que brinda ese servicio le dice al cliente cuándo irá una camioneta o un automóvil a recogerlo. El objetivo entonces para la empresa es diseñar un conjunto de rutas vehiculares de costo mínimo capaces de atender todas las solicitudes. Según Maalouf et al. [13], puede haber la posibilidad de que un solo vehículo no sea suficiente para satisfacer la demanda de sus clientes, por lo que la compañía debe contar una *flota de vehículos* disponible, que serán asignados a todos los clientes de tal forma que se cumplan los tiempos de recogida y entrega estipulados para cada cliente. Para una explicación más extensa de los trabajos que han abordado esta variante, se recomienda al lector el trabajo de Cordeau y Laporte [5].

DARP con vehículos heterogéneos (H-DARP)

La mayoría de los estudios sobre el DARP asumen la disponibilidad de una flota ***vehículos homogéneos*** basados en un solo depósito. Sin embargo, una propuesta de introducción de vehículos heterogéneos la hace Parragh [14], su trabajo está motivado por las observaciones realizadas en la Cruz Roja Austriaca (ARC) para el transporte de pacientes. La ARC dispone de dos tipos *diferentes* de vehículos, cada tipo ofrece diferentes

capacidades para cuatro modos de transporte (asiento del personal, asiento del paciente, camilla y lugar para silla de ruedas).

Otra interesante propuesta la presentan Tellez et al. [15], en dicha investigación se propone que la capacidad del vehículo dependa de una configuración elegida, esta configuración se caracteriza por un vector de capacidad multidimensional que indica el número máximo de usuarios de cada tipo permitidos en el vehículo. La reconfiguración del vehículo es tan sencilla como plegar o desplegar un asiento plegable o varios, lo que hace que la capacidad del vehículo se modifique, según las necesidades de los clientes, ya que se supone este tipo de servicio es especialmente para personas mayores o con alguna discapacidad.

DARP con ventanas de tiempo (DARP-TW)

En el trabajo de Psaraftis [12], se indica que cada que un cliente requiere un servicio de transporte, se deben especificar los tiempos de recogida y entrega, lo que en los VRPs se les conoce como ventanas de tiempo, consideradas generalmente como intervalos. Se hace notar dos notas importantes en dicho trabajo: la primera es que si el vehículo llega a cualquier punto (origen o destino) *después* que el límite superior o la restricción de tiempo en ese punto, entonces la ruta y la calendarización del vehículo son no factibles, la segunda es que si el vehículo llega a cualquier punto (origen o destino) *antes* del límite inferior de la restricción de tiempo en ese punto, el vehículo permanecerá inactivo en ese punto y partirá inmediatamente se alcance el valor establecido para el tiempo.

Por otra parte, Doerner [3] implica que las restricciones de tiempo típicas dadas por los clientes son las llamadas restricciones de ventanas de tiempo, las cuales consisten en imponer un tiempo de recogida deseado dentro de un intervalo y un tiempo de entrega deseado dentro de otro intervalo para cada cliente, el autor enfatiza que estos intervalos pueden crear instancias infactibles (no cumplen con todas las restricciones del problema), especialmente en los casos para los cuales un cliente especifica un tiempo máximo de entrega deseado y un tiempo mínimo de recolección deseado.

DARP con múltiples depósitos (MD-DARP)

Por lo general, las empresas que ofrecen un servicio de transportación utilizan un ***solo depósito*** en donde su(s) vehículo(s) esperan para poder dar servicio, pero en algunos problemas los vehículos pueden estar estacionados en diferentes depósitos, esto depende mucho del área geográfica en donde se esté dando el servicio de transportación. En el MD-DARP, como lo menciona Braekers et al. [16], cada vehículo debe regresar a su depósito original al final de su ruta, lo que indica que su jornada de trabajo ha concluido o simplemente que está disponible para servir de nuevo.

DARP con transferencias (DARP-T)

Esta variante fue propuesta por Masson et al. [17], en su investigación, el DARP-T consiste en definir un conjunto de rutas que satisfacen las solicitudes de transporte de los clientes entre un punto de recogida y un conjunto de puntos de entrega, en presencia del tiempo de viaje, como sucede en el DARP típico, sin embargo, en este caso los usuarios pueden *cambiar* de vehículo durante el viaje. Este cambio de vehículo, denominado transferencia, se realiza en ubicaciones específicas denominadas puntos de transferencia. En ese trabajo, se muestra que el uso de puntos de transferencia en la mayoría de los casos puede generar ahorros significativos tanto para aplicaciones de la vida real como para instancias del DARP.

Otra propuesta más reciente es la de Pierotti y Theresia [18], en su documento las transferencias se utilizan para cambiar diferentes modos de transporte dentro de un aeropuerto o entre el transporte público y privado. Los autores definen que permitir transferencias significa que cada pasajero puede ser recogido por un vehículo, llevado a un lugar determinado, dejado y recogido por otro vehículo, esto puede suceder en cualquier punto (según su modelación propuesta), por lo que este procedimiento puede repetirse varias veces.

DARP con solicitudes divididas y ganancias (DARP-SRP)

Parragh et al. [19] proponen una variante del DARP en donde se consideran los ingresos, se tiene un número determinado de vehículos, cada uno de una capacidad determinada, además, para cada uno de estos vehículos se especifica un límite de duración de la ruta que corresponde a la duración máxima del período de servicio del

conductor, además se asume que el número de personas en una solicitud puede ser como máximo igual a la capacidad de los vehículos a utilizar. Lo más importante de esta propuesta es que las solicitudes de grupo pueden *dividirse*; es decir, una solicitud de transporte determinada puede ser atendida por más de un vehículo o por varios viajes del mismo vehículo, lo que indica que un nodo origen pueda ser visitado varias veces hasta que se satisfaga la demanda de recogida en ese punto. Se supone que los tiempos de servicio proporcionados son constantes, es decir, son independientes del número de personas que se recogen o se dejan (si la solicitud se divide).

DARP realista (R-DARP)

Una tendencia cuando se proponen variantes del DARP es tomar en consideración restricciones más realistas para hacer que el problema sea más práctico, Liu et al. [20] estudian un problema realista del DARP, el cual consiste en considerar simultáneamente múltiples viajes, vehículos heterogéneos, múltiples tipos de solicitudes, capacidad configurable del vehículo y planificación de mano de obra, esta propuesta asemeja bastante a muchos problemas de la vida cotidiana, ya que trata de incluir muchos aspectos a considerar simultáneamente.

DARP con vehículos eléctricos y estaciones de cambio de batería (DARP-EV)

Otra variante del DARP que utiliza vehículos eléctricos es analizada por Masmoudi et al. [21], dicho DARP es considerado DARP-EV y se refiere al problema de programar de una flota de vehículos eléctricos para atender un conjunto de solicitudes de transporte preestablecidas durante un determinado horizonte de planificación. Además, los vehículos eléctricos se pueden recargar intercambiando sus baterías por baterías cargadas de cualquier estación de intercambio de baterías.

DARP con vehículos eléctricos autónomos (e-ADARP)

En comparación con el DARP clásico y el propuesto por Masmoudi et al. [21], el e-ADARP estudiado por Bongiovanni et al. [22] considera el uso de vehículos eléctricos autónomos, por lo que este tipo de problema tiene la característica de que se debe gestionar el uso de la batería, existen paradas intermedias para recargar el vehículo, los vehículos pueden ser heterogéneos en términos de capacidad e inventarios iniciales de baterías, los vehículos pueden estar ubicados inicialmente en diferentes depósitos, los vehículos pueden regresar a un conjunto de depósitos opcionales, y no se aplican restricciones sobre la duración máxima de la ruta.

DARP con dinero como incentivo (DARP-M)

Trasladar personas en un viaje compartido (como lo es en un taxi) es una aplicación muy utilizada en diferentes localidades, y más si las distancias de traslado son grandes, por lo que Santos y Xavier [23] abordan esta variante del DARP como sigue: hay un conjunto de pasajeros que necesitan viajar desde un origen a un punto diferente llamado destino, por lo que existe una flota de vehículos disponible, cada uno con un origen y un destino establecidos. Los pasajeros tienen limitaciones que deben tenerse en cuenta, por ejemplo, una primera hora de salida, una última hora de llegada, además la cantidad de pasajeros que viajarán juntos determina el valor máximo que están dispuestos a pagar por el viaje. Los vehículos tienen una capacidad máxima y un precio por kilómetro, el costo del viaje para cada pasajero debe calcularse de manera justa, así, el costo de cada parte de la ruta se divide en partes iguales entre todos los pasajeros a bordo.

El problema es calcular rutas para cada vehículo, donde cada ruta es una secuencia de puntos de origen y destino, que satisface todas las restricciones y maximiza una función objetivo de criterios múltiples. La función objetivo consiste en maximizar el número de solicitudes atendidas y minimizar el valor total pagado por todos los pasajeros.

DARP multicriterio (MC-DARP)

El DARP tiene varias variantes que involucran diferentes restricciones y funciones objetivos. Es común observar que en la vida cotidiana varios objetivos pueden estar en conflicto entre sí, por lo que varios trabajos pueden incluir *más de un objetivo* que deben optimizarse al mismo tiempo en su análisis, Atahran et al. [24] proponen una variante con tres objetivos: el costo para el operador de transporte, la calidad del servicio para los usuarios y el impacto en el medio ambiente.

DARP integrado (I-DARP)

Esta variante propuesta por Häll et al. [25], trata en diseñar rutas y establecer los horarios de los vehículos como sucede en el DARP clásico, con la diferencia de que cada solicitud en alguna parte de su viaje puede ser realizada por algún servicio de ruta fija, por lo que el diseño de las rutas fijas se conoce, y lo que se desea es tratar de utilizar lo mejor posible esos servicios.

DARP consistente en el tiempo (TC-DARP)

Una variante que integra consideraciones de la vida real, como lo son los tiempos máximos de viaje y la consistencia del tiempo de servicio es propuesta por Tellez et al. [26], en dicha investigación, se encontró que un bajo porcentaje de pasajeros tienen un horario completo y regular durante toda la semana, y que el mayor porcentaje de pasajeros tiene una demanda regular, ya que llega a presentar variaciones en su planificación debido a que cambian los puntos de recogida o destino debido a factores personales, como lo es asistir a una cita médica. Por lo que no se puede suponer una planificación de transporte coherente con el tiempo debido a las numerosas variaciones en las demandas de transporte durante toda la semana. La formulación DARP se extiende a lo largo de *varios períodos* y cada período tiene un conjunto conocido de solicitudes de transporte de los pasajeros.

DARP con viajes múltiples (MT-DARP)

Zhang et al. [8] proponen una variante al problema para servicios de transporte en ambulancia para personas discapacitadas llamada MTDARP, la idea planteada es que cada ambulancia disponible debe completar *varias rutas cortas* en un período de trabajo. Se considera un tiempo en el cual las ambulancias deben ser desinfectadas para prevenir la propagación de alguna enfermedad. De igual forma, se deben considerar en la planificación los tiempos para el almuerzo de los conductores y de los asistentes, por lo que la programación de múltiples viajes y todas estas pausas hacen que el problema sea complejo.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron algunas referencias a documentos que abordan al DARP, se proporciona una taxonomía de las diferentes variantes, incluyendo algunas que no se habían mencionado en las reseñas encontradas en la literatura.

El problema sigue llamando la atención a investigadores que, con la creciente diversidad de requisitos, limitaciones y características de situaciones reales, permiten visualizar nuevas tendencias para proponer nuevos esquemas que se derivan del problema clásico.

Agradecimientos

Al Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Referencias

[1] S. C. Ho, W. Y. Szeto, Y.-H. Kuo, J. M. Y. Leung, M. Petering, and T. W. H. Tou, “A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments,” Transportation Research Part B: Methodological, vol. 111, pp. 395–421, May. 2018.

[2] P. Oxley, “Dial/a/ride: a review,” Transportation Planning and Technology, vol. 6, no. 3, pp. 141–148, Jan. 1980.

[3] K. F. Doerner and J.-J. Salazar-González, “Chapter 7: Pickup-and-Delivery Problems for People Transportation,” Vehicle Routing, pp. 193–212, Nov. 2014.

[4] Y. Molenbruch, K. Braekers, and A. Caris, “Typology and literature review for dial-a-ride problems,” Annals of Operations Research, vol. 259, no. 1–2, pp. 295–325, May. 2017.

[5] J.-F. Cordeau and G. Laporte, “The dial-a-ride problem: models and algorithms,” Annals of Operations Research, vol. 153, no. 1, pp. 29–46, May. 2007.

[6] Y. Dumas, J. Desrosiers, and F. Soumis, “The pickup and delivery problem with time windows,” European Journal of Operational Research, vol. 54, no. 1, pp. 7–22, Sep. 1991.

[7] S. Gökay, A. Heuvels, and K.-H. Krempels, “A High-level Category Survey of Dial-a-Ride Problems,” Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, 2019.
[8] Z. Zhang, M. Liu, and A. Lim, “A memetic algorithm for the patient transportation problem,” Omega, vol. 54, pp. 60–71, Jul. 2015.
[9] H. N. Psaraftis, “A Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-Many Immediate Request Dial-a-Ride Problem,” Transportation Science, vol. 14, no. 2, pp. 130–154, May 1980.
[10] J.-F. Cordeau, “A Branch-and-Cut Algorithm for the Dial-a-Ride Problem,” Operations Research, vol. 54, no. 3, pp. 573–586, Jun. 2006.
[11] M. Chassaing, G. Fleury, C. Duhamel, and P. Lacomme, “Determination of robust solutions for the DARP with variations in transportation time,” IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 12, pp. 943–948, 2016.
[12] H. N. Psaraftis, “An Exact Algorithm for the Single Vehicle Many-to-Many Dial-A-Ride Problem with Time Windows,” Transportation Science, vol. 17, no. 3, pp. 351–357, Aug. 1983.
[13] M. Maalouf, C. A. MacKenzie, S. Radakrishnan, and M. Court, “A new fuzzy logic approach to capacitated dynamic Dial-a-Ride problem,” Fuzzy Sets and Systems, vol. 255, pp. 30–40, Nov. 2014.
[14] S. N. Parragh, “Introducing heterogeneous users and vehicles into models and algorithms for the dial-a-ride problem,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 19, no. 5, pp. 912–930, Aug. 2011.
[15] O. Tellez, S. Vercraene, F. Lehuédé, O. Péton, and T. Monteiro, “The fleet size and mix dial-a-ride problem with reconfigurable vehicle capacity,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 91, pp. 99–123, Jun. 2018.
[16] K. Braekers, A. Caris, and G. K. Janssens, “Exact and meta-heuristic approach for a general heterogeneous dial-a-ride problem with multiple depots,” Transportation Research Part B: Methodological, vol. 67, pp. 166–186, Sep. 2014.
[17] R. Masson, F. Lehuédé, and O. Péton, “The Dial-A-Ride Problem with Transfers,” Computers & Operations Research, vol. 41, pp. 12–23, Jan. 2014.
[18] J. Pierotti and J. Theresia van Essen, “MILP models for the Dial-a-ride problem with transfers,” EURO Journal on Transportation and Logistics, vol. 10, p. 100037, 2021.
[19] S. N. Parragh, J. Pinho de Sousa, and B. Almada-Lobo, “The Dial-a-Ride Problem with Split Requests and Profits,” Transportation Science, vol. 49, no. 2, pp. 311–334, May 2015.
[20] M. Liu, Z. Luo, and A. Lim, “A branch-and-cut algorithm for a realistic dial-a-ride problem,” Transportation Research Part B: Methodological, vol. 81, pp. 267–288, Nov. 2015.
[21] M. A. Masmoudi, M. Hosny, E. Demir, K. N. Genikomsakis, and N. Cheikhrouhou, “The dial-a-ride problem with electric vehicles and battery swapping stations,” Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 118, pp. 392–420, Oct. 2018.
[22] C. Bongiovanni, M. Kaspi, and N. Geroliminis, “The electric autonomous dial-a-ride problem,” Transportation Research Part B: Methodological, vol. 122, pp. 436–456, Apr. 2019.
[23] D. O. Santos and E. C. Xavier, “Taxi and Ride Sharing: A Dynamic Dial-a-Ride Problem with Money as an Incentive,” Expert Systems with Applications, vol. 42, no. 19, pp. 6728–6737, Nov. 2015.
[24] A. Atahran, C. Lenté, and V. T’kindt, “A Multicriteria Dial-a-Ride Problem with an Ecological Measure and Heterogeneous Vehicles,” Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 21, no. 5–6, pp. 279–298, Mar. 2014.
[25] C. H. Häll, H. Andersson, J. T. Lundgren, and P. Värbrand, “The Integrated Dial-a-Ride Problem,” Public Transport, vol. 1, no. 1, pp. 39–54, Nov. 2008.
[26] O. Tellez, S. Vercraene, F. Lehuédé, O. Péton, and T. Monteiro, “The time-consistent dial-a-ride problem,” Networks, Jun. 2021.