

## MODELO COMPLEJO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN CINCO CIUDADES DEL ESTADO DE GUANAJUATO, MÉXICO

Complex model for the assessment of air quality management in five cities of the state of Guanajuato, Mexico

David SALAS-RODRÍGUEZ

Instituto Tepeyac, Tres Guerras 115, colonia Centro, CP 3700, León, Guanajuato, México.

Correo electrónico: [davino66@hotmail.com](mailto:davino66@hotmail.com)

*(Recibido: julio 2021; aceptado: agosto 2022)*

Palabras clave: complejidad, entropía, espacio fase, ICC, IQV.

### RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es proponer un modelo para la evaluación de la gestión de la calidad del aire (GCA) en cinco ciudades del estado de Guanajuato a modo de sistema complejo. Se aplicó la entropía como medida en la variabilidad de sus instrumentos de gestión, se utilizó el Índice de Variación Cualitativa (IQV) observado en las funciones y estrategias de cada unidad responsable de la calidad del aire (URCA) y el Índice de Coocurrencia de Códigos (ICC) para analizar los avances instrumentados que se reportaron en los informes del programa para mejorar la calidad del aire (PROAIRE). Los resultados se emplearon para crear un modelo de GCA que ubica a la URCA de cada una de las cinco ciudades dentro del espacio fase como un sistema complejo. Esto propone una solución a la diversidad de enfoques cualitativos, cuantitativos o mixtos para su estudio y a la falta o exceso de información relacionada con el estudio de la GCA.

Key words: complexity, entropy, IQV, ICC, phase space.

### ABSTRACT

This work aims to present and propose a model for evaluating air quality management (AQM) as a complex system. Entropy was applied as a measure of the variability of its management instruments, the Index of Qualitative Variation (IQV) observed in the functions and strategies of each responsible unit for air quality (URCA) in five cities in the state of Guanajuato and the Index Code of Co-occurrence (ICC) in its advances reported at the air quality program reports (PROAIRE). The results created an AQM model that positions each URCA of the five cities in the phase space as a complex system. Considering the latter, a solution to the diversity of qualitative, quantitative, or mixed approaches is proposed for its study and the lack or excess of information related to the study of AQM.

---

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el problema de la calidad del aire se presenta no sólo en las grandes concentraciones urbanas, ya que este fenómeno existe en ciudades con poblaciones menores al millón de habitantes, de tal forma que su gestión es un reto que involucra a todos los interesados: gobernadores, presidentes municipales y sociedad en general (Molina 2014). El concepto de gestión de la calidad del aire (GCA) es comprendido por las unidades responsables de su ejecución en formas diversas como los programas para el control de las emisiones o planes de cooperación entre los diversos actores involucrados en ella, es asociada también con las redes de monitoreo atmosférico y los planes de contingencia ambiental.

Adicionalmente existen herramientas de programas de cómputo como MOVES (EPA 2021) que integran modelos simuladores para emisiones vehiculares con modelos de datos y metodologías de medición para la simulación de contaminantes atmosféricos, entre otros (Gulia et al. 2014).

Esta diversidad de perspectivas e intereses de la GCA implica diferentes enfoques y modelos para su evaluación que dependen del objeto de estudio, ejemplo de lo anterior son los modelos cuantitativos aplicados a la dispersión de contaminantes en el aire o sus efectos en la salud por la exposición (Ancona et al. 2015, Szulecka et al. 2017).

Otro ejemplo de enfoque cuantitativo con componentes numéricos es el control de las emisiones de contaminantes con base en límites establecidos por las guías internacionales propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) o la medición de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de energía limpia y fuentes alternas (WHO 2005, OMS 2021).

Los enfoques cualitativos corresponden a interpretación de significados como el juicio de expertos basado en los lineamientos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) que es utilizado en el proyecto Desafío de Ciudades (WWF 2022).

El enfoque anterior es usado por la World Wide Foundation (WWF) para el análisis de las ciudades que participan en la competencia bienal Desafío de Ciudades. Su metodología evalúa la gestión relacionada con el cambio climático (CC) reportada por los gobiernos locales de las ciudades participantes, sin embargo no ofrece una medida cuantitativa de la gestión. Este hecho se confirmó en entrevista con el director de la Unidad Responsable de la Calidad del

Aire (URCA) en Celaya, ciudad que fue participante en la edición 2018 de la competencia mencionada.

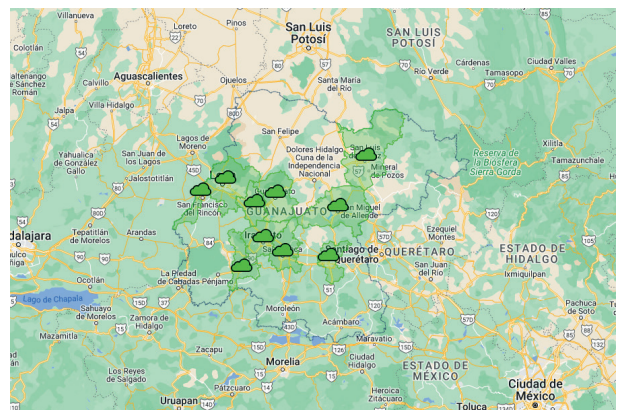
Otro enfoque cualitativo son las campañas de concientización para la población sobre la importancia de la calidad del aire para su salud, así como la moderación en los hábitos de consumo para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el desarrollo de una cultura ambiental.

Por lo anterior es necesario un enfoque holístico que considere la diversidad de significados y perspectivas conceptuales de la GCA en un indicador numérico para medir la gestión cuantitativamente, ya que dependiendo de los enfoques y métodos de estudio se obtienen indicadores cuantitativos o cualitativos.

Ante esta variedad de indicadores, una gestión consistente y comprometida es aquella que a lo largo de su implementación interviene en ambos componentes, cuantitativos y cualitativos, para integrarlos en un concepto de GCA holístico y complejo como el propuesto en este estudio.

### Contexto de la GCA en cinco ciudades de Guanajuato, México

El estado de Guanajuato se ubica en el centro de país con una superficie de 30 460 km<sup>2</sup>, lo que representa el 1.56 % del territorio nacional; está formado por 46 municipios y tiene una población de 6 166 934 habitantes (4.9 % del total del país); 72 % de estos viven en zonas urbanas y 28 % en zonas rurales. El sector que más aporta al Producto Interno Bruto (PIB) es el comercio y el estado en total aporta el 4.3 % al PIB nacional. La **figura 1** muestra la ubicación geográfica de las cinco ciudades estudiadas, que se mencionan a continuación (INEGI 2020, INEGI 2022).



**Fig. 1.** Las cinco ciudades estudiadas del estado de Guanajuato y su red de monitoreo atmosférico (Fuente: IEE 2022).

León con 1 721 215 habitantes es la más poblada, su principal actividad económica es la industria del cuero-calzado, aunque en los últimos 30 años se ha desarrollado la de servicios e inmobiliaria.

Silao de la Victoria tiene una población de 203 556 habitantes y presenta una gran dinámica por contar con una de las primeras plantas automotrices instaladas<sup>1</sup>.

Irapuato cuenta con una población de 592 953 habitantes y se ubica en la parte centro sur; aquí predomina la actividad agrícola, principalmente el cultivo de la fresa, además de la comercial e industrial; colinda con las ciudades de Silao de la Victoria y Salamanca.

Salamanca se localiza en la zona centro del Estado donde predomina la agricultura y el sector industrial. Ahí se encuentra ubicada la refinería Ing. Antonio M. Amor, de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la central termoeléctrica de la Comisión Federal de electricidad (CFE). Esta ciudad cuenta con una población de 273 417 habitantes.

Finalmente, Celaya se sitúa en la zona sur este del estado y es vecina de Juventino Rosas; sus actividades económicas principales son el comercio y los servicios, seguida por la industrial; cuenta con 521 169 habitantes, lo que la coloca como la tercera metrópoli del estado.

Estas cinco ciudades están conectadas por la carretera 45 al vecino estado de Jalisco y a la autopista Salamanca – Ciudad de México principalmente, a su vez cuentan con otras vías ampliamente interconectadas con el resto del país y forman la zona denominada como el corredor industrial del Bajío.

Esta zona ha sido altamente impulsada para el desarrollo económico y actualmente continúa en desarrollo. Al respecto, el gobierno del Estado en su Plan de Desarrollo 2035 publicado por el Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del estado de Guanajuato (IPLANEG), definió cuatro dimensiones estratégicas de desarrollo: a) Desarrollo humano y social; b) Administración pública y estado de derecho; c) Economía, y d) Medio ambiente y territorio. La cuarta dimensión tiene como esencia: "...Actualizar y asegurar el cumplimiento de la normatividad en materia de Calidad del Aire, colegiando los procesos de aplicación, seguimiento

y sanción de las acciones ambientales" (IPLANEG 2012).

Como efecto ante el impulso y desarrollo económico de la zona, el estado enfrenta el problema global del CC que se aborda de forma local en las ciudades a manera de GCA. La atención del problema tiene su génesis en el programa PROAIRE publicado en el año 2003. En este se materializó el concepto de Acta de Aire Limpio<sup>2</sup>, donde predominó el componente cuantitativo de intervención numérico para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos y sólo como elemento cualitativo la importancia de la calidad del aire para la salud de la población.

Las partes interesadas en el problema de la contaminación del aire citado anteriormente fueron los tres niveles de gobierno y la sociedad civil a través del Patronato para el Monitoreo de la Calidad del Aire de Salamanca. Por parte de la federación fueron dos empresas: CFE y PEMEX.

Este primer programa PROAIRE para Salamanca planteó el desafío de atender el problema del desarrollo sostenible a modo de elemento cualitativo y en específico, solucionar la contaminación del aire que en los últimos años de la década del 90 aquejaba a esta ciudad, ya que padecía altos niveles de dióxido de azufre en el aire. Por lo anterior, se tomó la acción de intervenir en el control de las emisiones de contaminantes como elemento cuantitativo (numérico) con base en la guía establecida por la OMS (IE 2004).

Desde entonces el programa PROAIRE se centra en el objetivo de reducir los niveles de contaminación en el aire, para lo que incorpora medidas concretas como la red de monitoreo atmosférico, programas de verificación vehicular, inventarios de emisiones por tipos de fuentes y revisión del cumplimiento de normas entre otras. Para el año 2014 se incluyó en el programa a las ciudades de Celaya e Irapuato (GEG 2022).

En el año 2008, el Instituto de Ecología del estado publicó un PROAIRE específico para la ciudad de León, ya que el gobierno de esta ciudad contempló incluir la sustentabilidad ambiental como eje rector en su plan de desarrollo 2007-2012 (IEE 2008). Para la segunda versión de dicho programa publicada en 2014, se incluyó a las ciudades cercanas a León que son Silao de la Victoria, San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón, conformando

<sup>1</sup> La inauguración de la planta de GM en Silao la realizó el 27 de julio de 1995 siendo entonces presidente de México Ernesto Zedillo y gobernador del estado Vicente Fox.

<sup>2</sup> Un acta de aire limpio es un instrumento jurídico creado por consenso para el planteamiento de la calidad del aire como un problema de salud pública. Históricamente, la primera acta de aire limpio corresponde al episodio de la neblina en Londres por el año de 1952.

así la actual denominada Zona Metropolitana de León (IEE 2014).

Cabe destacar que en Guanajuato, como parte histórica de las medidas tomadas por el programa PROAIRE, se cuenta con una red de monitoreo atmosférico que integra un subsistema de información accesible mediante el portal web denominado Sistema Estatal de Información de Calidad del Aire (SEICA). Por medio de este se provee a la ciudadanía de un instrumento tecnológico para la consulta de la calidad del aire en las ciudades integradas a ella (IEE 2022).

Durante la investigación se observó que la red integra a las siguientes ciudades y estaciones de monitoreo: Celaya con tres estaciones, Irapuato con tres, Salamanca con tres, Silao de la Victoria con una, León con tres, San Luis de la Paz con una, San Miguel de Allende con una, Purísima del Rincón con una, Abasolo con una y Guanajuato capital con una, lo cual configura una red de monitoreo de 18 estaciones en total.

El contexto para el estudio fueron las ciudades de León, Silao de la Victoria, Irapuato, Salamanca y Celaya, las que apenas rebasan el medio millón de habitantes, salvo León, que cuenta con una cifra superior al millón y medio de pobladores. Todas ellas están situadas en el corredor industrial del bajo, en

el que la GCA tiene como predominante cuantitativo (numérico) a la red de monitoreo atmosférico, que sigue en crecimiento y tuvo su origen en 1999 con la primera estación de monitoreo atmosférico en la ciudad de Salamanca, previo al PROAIRE (GEG 2022).

### Modelos teóricos aplicados a la GCA

El proceso de GCA como teoría incluye a los componentes cuantitativos y cualitativos para las cinco ciudades de Guanajuato, es operado mediante el modelo LART de gestión ambiental nombrado así por las siglas de su autor (Rivas-Tovar 2009).

Dicho modelo se utilizó para categorizar las acciones y avances con enfoques cualitativos y cuantitativos integrados en el PROAIRE, tales como el control de emisiones, los programas de Gobierno orientados para tal fin, la gestión de los interesados y las redes de monitoreo atmosférico, entre otros. En la **figura 2** se muestra el modelo para describir la forma en que se utilizaron las categorías en el estudio y que se explican a continuación.

Los elementos cuantitativos y cualitativos se clasificaron en ocho categorías de instrumentos para la gestión. Estos se nombraron de la siguiente forma: Internacionales, Jurídicos, Económicos, Político-Organizativos, Culturales, Educativos, Sociales y Tecnológicos<sup>3</sup>.

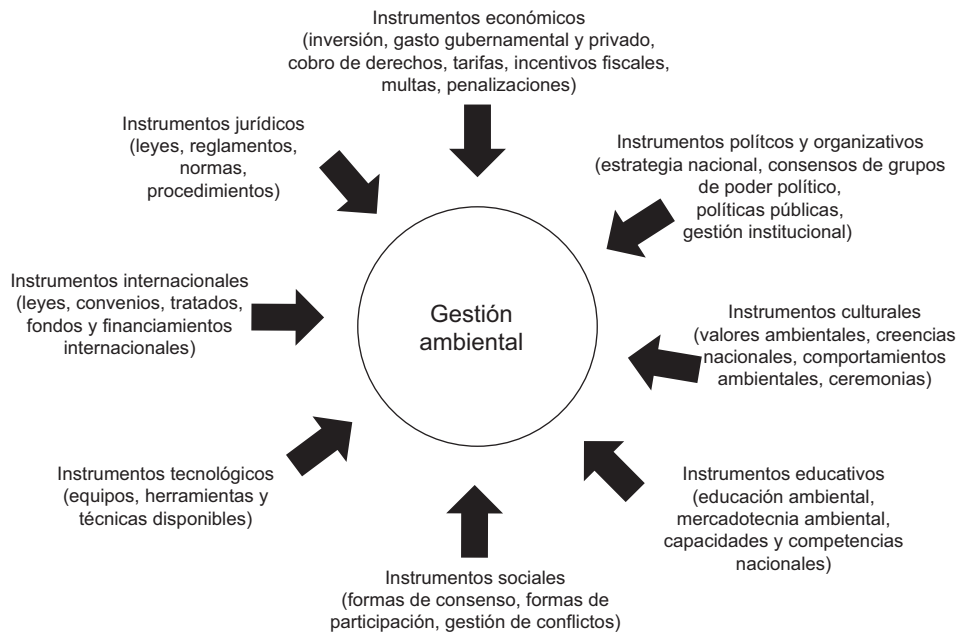


Fig. 2. Modelo teórico aplicado a la gestión de la calidad del aire con base en Rivas-Tovar (2009).

<sup>3</sup> En la teoría fundamentada, los nombres de las categorías se escriben con mayúscula.



Como ejemplos está la red de monitoreo atmosférico que es una medida de gestión cuantitativa (numérica) en la GCA del estado y es clasificada dentro de los instrumentos tecnológicos y el programa PROAIRE, que se categorizó en los instrumentos Político-Organizativos. Sin embargo, el fundamento de la gestión está en las diversas normas oficiales relativas a las emisiones y leyes ambientales vigentes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) por mencionar una, que son categorías de instrumentos Jurídicos, así como las guías de calidad del aire que marca la Organización Mundial de la Salud para los límites de contaminantes atmosféricos que corresponden a la categoría de instrumentos Internacionales (WHO 2005, OMS 2021).

Adicionalmente, para la teorización de la GCA se utilizó el estudio de Sprinz y Tapani (1994). Ellos propusieron un modelo llamado enfoque basado en el interés, donde modelaron un cuadrante con cuatro partes como se muestra en la **figura 3**. Aquí se posicionan los países estudiados de acuerdo con su postura según el soporte otorgado a las regulaciones internacionales de carácter ambiental. Su posición es el resultado del estudio de dos variables: el elemento numérico de los costos orientados a la disminución de la contaminación y el elemento de significado correspondiente a las políticas orientadas para ello.

Las cuatro partes del cuadrante se explican de la siguiente manera: en la parte I se ubica a los que poseen poco interés en participar, tienden a una mejor postura

que los no interesados (ubicados en la parte III) a razón de los bajos costos asociados con su posición de negociación; en la parte II se ubica a los que promueven las negociaciones internacionales y rigurosas regulaciones; la parte III corresponde a los no interesados que en general son países opositores a las regulaciones ambientales y en la parte IV se encuentran los países en condiciones precarias, ellos reciben incentivos al participar en las regulaciones internacionales otorgados por parte de los países promotores.

Las dos teorías anteriormente descritas fundamentan conceptualmente la investigación debido a que el modelo de gestión ambiental proporciona el marco para el estudio de los elementos numéricos y de significado para el proceso de GCA y el modelo del enfoque basado en el interés como el espacio geométrico, en donde se determina una postura ante el proceso de gestión mediante la medición y análisis de sus elementos numéricos y de significado.

**La entropía como medida holística de la GCA**

Para atender el problema de la medición y análisis holístico<sup>4</sup> de la GCA en las cinco ciudades, se empleó el Index of Qualitative Variation (IQV) como medida de la entropía (Hernández y González 2006). Este se relacionó con el número de categorías utilizadas para la codificación de las observaciones y su análisis.

Para ejemplo de la medida del desorden, sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 1, se muestran en la **figura 4** cuatro categorizaciones de las observaciones N (6 esferas) y se emplea una variación en el número de categorías k (0 y 2 a 4 casillas) con su entropía asociada. Para la medición es necesario contar con dos categorías o más, de esta forma visual es comprensible el concepto de entropía como medida del desorden (caos).

En el ejemplo anterior se mantiene fijo el número de observaciones (N) y a medida que aumentamos las categorías, el IQV aumenta, denotando el orden: el inciso a) de la figura muestra el caos (ausencia de orden) y el inciso d) muestra un mayor grado de orden. Así se demuestra que a medida que aumentamos las categorías, se tiene una mejor organización de las esferas. Hay que destacar que durante el proceso de codificación y análisis de los elementos de la gestión, se contemplan variaciones tanto en las observaciones como en las categorías.

		Vulnerabilidad ecológica	
		Bajo	Alto
Costos de abatimiento	Bajo	I. Espectadores	II. Promotores
	Alto	III. Rezagados	IV. Intermediarios

**Fig. 3.** Clasificación de un país hacia las regulaciones internacionales con base en Sprinz y Tapani (1994).

<sup>4</sup> Se usa el concepto holístico debido a que contempla los elementos numéricos y de significado así como su variabilidad en conjunto en el tiempo.

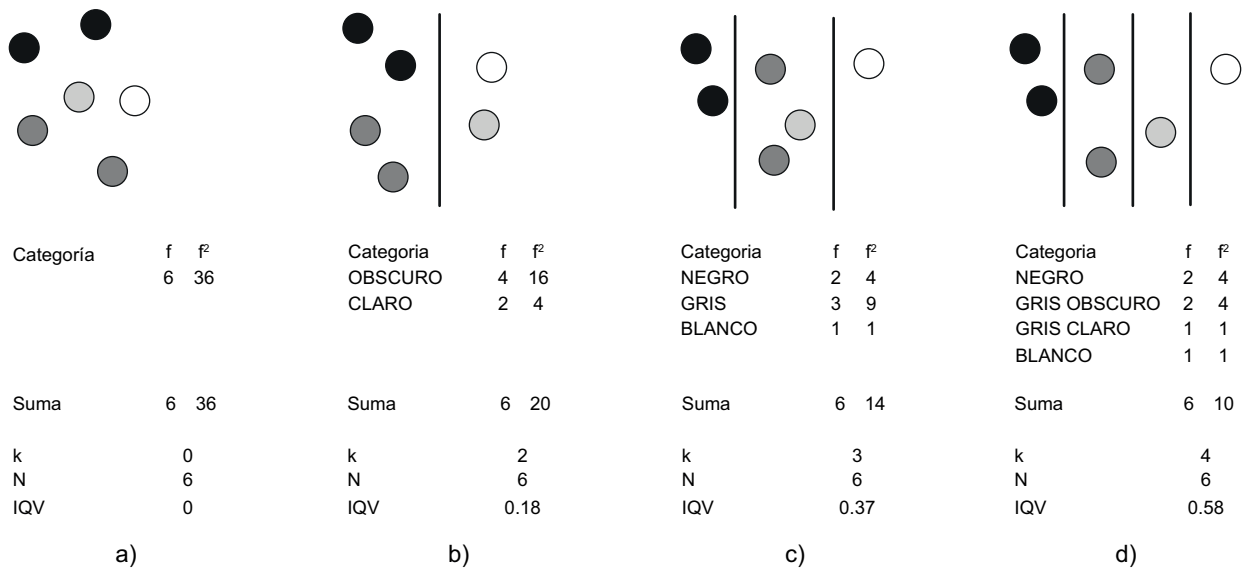


Fig. 4. Categorías (k), observaciones (N) e Índice de Variación Cualitativa (IQV) como medida del desorden (entropía), con base en Hernández y González (2006).

**Objetivo de la investigación**

El objetivo de la investigación es proponer un modelo complejo para establecer la postura de cada una de las cinco ciudades estudiadas ante el ejercicio de la GCA. Su base son las mediciones de la variabilidad de instrumentos de gestión con el IQV (entropía) en las funciones y estrategias de las URCA así como la coocurrencia de instrumentos medida con el Índice de Coocurrencia de Códigos (ICC) en los avances de su gestión. En el **cuadro I** se muestra la congruencia metodológica para la investigación, en él se plantean las preguntas de investigación refiriendo la primera a la variedad

de medidas para la GCA que cada unidad responsable ha implementado en la ciudad. Se detallan los instrumentos empleados así como la técnica de análisis y medición empleando la ecuación 1. La información se obtuvo vía la Plataforma Nacional de Transparencia y la única entrevista otorgada por la URCA de la ciudad de Celaya.

La segunda pregunta refiere a los avances en GCA reportados en los informes del PROAIRE. Se realizó un análisis documental observándolos y categorizándolos de acuerdo con el modelo teórico mostrado en la **figura 2**. La técnica de análisis y medida se realizó empleando la ecuación 2.

**CUADRO I.** CONGRUENCIA CUALITATIVA PARA EL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE (GCA).

Preguntas de investigación	Necesidad de información	Fuentes de información	Técnicas e instrumentos usados
¿Cuál es la variabilidad de instrumentos de GCA en las funciones y estrategias en las unidades responsables de la calidad del aire en las cinco ciudades?	Medir la variabilidad de instrumentos de GCA en las funciones y estrategias de las unidades responsables de la calidad del aire en las ciudades estudiadas.	Plataforma nacional de transparencia. Unidades responsables de la calidad del aire en las ciudades.	Solicitudes de acceso a la información pública. Entrevistas individuales. Correos electrónicos. Análisis del índice de variabilidad cualitativa (IQV).
¿Cuál es la coocurrencia de instrumentos de GCA en los reportes PROAIRE de las unidades responsables de la calidad del aire en las cinco ciudades?	Medir la coocurrencia de instrumentos de GCA en los reportes PROAIRE de las unidades responsables de la calidad del aire en las cinco ciudades estudiadas.	Informes de programas de gestión de la calidad del aire (PROAIRE).	Análisis documental, análisis del índice de coocurrencia de códigos (ICC).

Elaboración propia con base en Rivas-Tovar 2020.

La relevancia del estudio consiste en que el modelo propuesto logra posicionar a cada URCA de las cinco ciudades en un espacio fase (geométrico) que mide los elementos numéricos y de significado de la GCA en forma holística. Los resultados del estudio ubicaron en primer lugar a la ciudad de Celaya con una GCA que integra una diversidad de indicadores cuantitativos y cualitativos de gestión con mejores resultados observados en sus informes. Esto es congruente ya que el gobierno de la ciudad participó en el desafío de ciudades organizado por la WWF versión 2018 junto a 238 ciudades del mundo y fue situada dentro de las primeras 10 finalistas junto a otras ciudades de América Latina (WWF 2022).

El estudio se limita a la medición holística de la GCA con base en las funciones y medidas tomadas por las unidades responsables en cada ciudad así como a los resultados y avances que reportaron en los informes del PROAIRE. Los hallazgos mostrados por el modelo complejo propuesto se usarán en estudios futuros con otros indicadores, mediciones y teorías asociadas a la GCA para dimensionar su efecto en el control de las emisiones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los entidades de investigación fueron las URCA en cinco ciudades de Guanajuato: León, Silao de la Victoria, Irapuato, Salamanca y Celaya, todas pertenecientes al programa PROAIRE desde el año 2003 hasta el último informe que se reportó en el año 2015.

Las categorías de análisis para la medición fueron los instrumentos del modelo LART para la gestión ambiental (Rivas-Tovar 2009) mostrados en la **figura 2** y se fijó la postura de cada ciudad dentro del espacio fase de acuerdo con las mediciones en el IQV e ICC obtenidas del análisis cualitativo de los informes mediante la teoría fundamentada y el método comparativo constante (Strauss y Corbin 2002).

### Búsqueda de información

Las fuentes de información fueron la entrevista y el cuestionario vía correo con la URCA de la ciudad de Celaya. Para el resto que no respondieron a este medio, se recurrió a solicitudes de información pública a través de la Plataforma Nacional de Transparencia (PNT 2020).

Los informes PROAIRE fueron proporcionados como parte de la respuesta a las solicitudes de información pública por el gobierno de las ciudades de Celaya y León. Se destaca que desde el primer contacto, la URCA de la ciudad de Celaya presentó una gran apertura y disposición para la investigación, ya que proporcionaron respuestas de forma precisa y detallada en las entrevistas, cuestionarios y solicitudes de información.

Se analizaron un total de 174 documentos: seis correspondientes a las respuestas de solicitud de información referente a las funciones y estrategias en GCA en cada URCA y 168 correspondientes a los informes PROAIRE. En estos últimos, el de León como zona metropolitana incluyó 146 documentos que abarcan el periodo 2008-2012, y Salamanca, Irapuato y Celaya incluyeron 22 documentos del periodo 2014-2015. Se organizaron todos ellos en el programa Atlas.ti 7 como ocho documentos primarios (ATLAS.ti 2022) dentro de una unidad hermenéutica. La saturación teórica<sup>5</sup> en los avances en GCA reportados en los informes se obtiene con un total de 87 citas, con lo anterior se concluyó con el análisis de los avances reportados en los informes del PROAIRE.

### Cálculo del IQV en las funciones y estrategias de la GCA

Para la medición de la variabilidad de los instrumentos, se conceptualizó el proceso de gestión como un sistema complejo en un espacio fase para la medida del desorden (entropía). Se midió cuantificando la codificación y categorización con base en la teoría fundamentada, emergida de la observación de las funciones, estrategias y avances en GCA de las URCA en cada ciudad.

El caos o falta de orden medida como entropía se relaciona con la instrumentación (número de instrumentos de gestión) de acuerdo con lo siguiente: pocos instrumentos (categorías) se asocian al caos y a medida que la instrumentación se incrementa, se tiende al orden. Este concepto se explicó previamente con la **figura 4**.

Para el análisis se empleó el método comparativo constante (Strauss y Corbin 2002) y para medir el desorden se usó el IQV (entropía) utilizando la ecuación 1. Se emplearon las herramientas de codificación, categorización y análisis del programa Atlas.ti en su versión 7. Fueron analizadas las funciones, estrategias

<sup>5</sup>La saturación teórica es el punto en el que la construcción de la categoría en la cual ya no emergen propiedades, dimensiones, o relaciones nueva

y avances en GCA, organizadas en una unidad hermenéutica para su estudio. La medición y análisis del IQV (Hernández y González 2006) se implementó en una hoja de cálculo ya que el programa no cuenta entre sus herramientas con el procedimiento para hacerlo debido a su enfoque cualitativo.

$$IQV = \frac{k(N^2 - \sum_1^k f^2)}{N^2 * (N - 1)} \quad (1)$$

En la ecuación 1, *k* es el número de clases (categorías de instrumentos para su codificación), *N* es el número de funciones y estrategias observadas (citas codificadas) y *f* es la frecuencia por categorías (fundamento teórico). La fórmula se usa para calcular el desorden entre clases que corresponde a la entropía de funciones y estrategias similar a lo mostrado en la **figura 4**; la diferencia es que *N* y *k* varían en cada ciudad estudiada.

**Cálculo del ICC en los elementos numéricos y significados de la GCA**

Para la medición de los avances en GCA y su conceptualización por la URCA, se empleó el ICC. Este mide la coocurrencia de significados en una unidad de análisis<sup>6</sup>. En la codificación de los avances reportados en los informes PROAIRE, dos o más significados se presentan en dichas unidades, la medición resulta del cálculo obtenido aplicando la ecuación 2.

El programa de cómputo Atlas.ti proporciona en sus herramientas de análisis la matriz de coocurrencia de códigos. Para su procesamiento se seleccionan las categorías cruzadas a manera de renglón – columna, como primer análisis se usan todas las categorías y así se crea una matriz, siendo *k* el número de categorías resultantes de la codificación. Para el análisis subsiguiente se pueden seleccionar en los renglones y columnas sólo las categorías que muestren coocurrencia o continuar con el análisis de acuerdo con el método comparativo constante para que emerja la coocurrencia y lograr la saturación teórica.

Se optó por emplear una hoja de cálculo para verificar los resultados del programa Atlas.ti ya que la herramienta proporciona el ICC calculado pero no las variables *F<sub>cc</sub>*, *F<sub>c1</sub>* y *F<sub>c2</sub>* de la ecuación 2 requeridos para su cálculo y validación.

$$ICC = \frac{F_{cc}}{(F_{c2} + F_{c1}) - F_{cc}} \quad (2)$$

En la ecuación 2 *F<sub>cc</sub>* es la coocurrencia de los códigos, representa para cada ciudad la frecuencia por cada categoría del modelo teórico de la **figura 2**. *F<sub>c1</sub>* es el fundamento por ciudad que corresponden a los avances observados en los informes PROAIRE y *F<sub>c2</sub>* el fundamento observado por categorías en dichos informes para todas las ciudades. Como se muestra en el **cuadro II**, en la categoría de instrumentos

**CUADRO II. RESUMEN DE LA VARIABILIDAD DE FUNCIONES EN LAS UNIDADES RESPONSABLES DE LA CALIDAD DEL AIRE (URCA) EN LAS CINCO CIUDADES ESTUDIADAS.**

	Funciones	Internacionales	Jurídicos	Económicos	Político-Organizativos	Culturales	Educativos	Sociales	Tecnológicos	N	k	IQV	Promedio de funciones
Celaya	10	3	8	2	5	2	3	5	4	32	8	0.22	4
León	3		1				1	2	2	6	4	0.58	1.5
Silao de la Victoria	7		5		4	1	1	1	2	14	6	0.35	2.33
Salamanca													
Irapuato													
Totales	20	3	14	2	9	3	5	8	8	52	18	1.15	2.61*

\* Es el promedio de las categorías, la mediana del IQV en funciones es: 0.35.

N es el número de funciones y estrategias observadas (citas codificadas), k es el número de clases (categorías de instrumentos para su codificación) e IQV es el Índice de Variación Cualitativa.

<sup>6</sup>Las unidades de análisis son las ideas (textos) observadas en los documentos que forman la unidad hermenéutica, en ellos se identifican las citas (significados) que son categorizados.



económicos Celaya presentó un fundamento (citas)  $F_{cc} = 1$  de un total de  $F_{c2} = 2$  y con un fundamento total observado de  $F_{c1} = 12$  citas en los informes. El numerador representa la coocurrencia de los códigos en los avances, un valor mayor representa una mejor instrumentación del avance (se observan más categorías) y el denominador es la proporción que corresponde al total de los avances (citas).

## RESULTADOS

En el proceso de codificación de las funciones, estrategias y avances en GCA de las URCA observadas en las fuentes de información, se logró la saturación teórica en el cuarto análisis<sup>7</sup> y emergió la coocurrencia de códigos como fundamento teórico (Strauss y Corbin 2002). En el análisis de la información se codificaron las citas en los textos categorizándolos con el modelo teórico de instrumentos de gestión de la **figura 2**. A continuación se presenta un ejemplo de la codificación realizada en las funciones y estrategias de la URCA de la ciudad de Celaya y uno de los avances reportados en el PROAIRE por la ciudad de Salamanca:

Estrategia en la ciudad de Celaya:

...Programa de prevención de altos niveles de partículas menores a 10 micras en el municipio de Celaya, Guanajuato (contingencias ambientales). Objetivo: Prevenir los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de la población. Esto se aplica en caso de que en el municipio de Celaya, se registren niveles altos de partículas menores a 10 micrómetros, situación que se registra en las estaciones de monitoreo atmosférico ubicadas en el municipio de Celaya. Coordinación entre los tres niveles de gobierno.

En la unidad de análisis (texto de la estrategia) se observa el significado “niveles altos de partículas menores a 10 micrómetros” que corresponde a un elemento numérico y se codifica en la categoría de instrumentos internacionales ya que la medida se basa en los indicadores propuestos por guías internacionales.

El significado “situación que se registra en las estaciones de monitoreo atmosférico” corresponde a un elemento significativo y se codifica en la categoría instrumentos tecnológicos.

En el ejemplo anterior de cita<sup>8</sup> coocurren las dos categorías en la unidad de análisis y representan una medida de GCA con dos instrumentos. Al observar estas categorías de instrumentación y en acuerdo con el modelo teórico de la **figura 2**, significa una mejor gestión (dos o más instrumentos en una cita) con un ICC mayor como se explicó y se sintetizó previamente en el **cuadro II**.

Avance PROAIRE reportado por la URCA de la ciudad de Salamanca:

...Con el objetivo de incrementar fuentes de área verificadas en el 2014, se llevó a cabo un programa de levantamiento de datos en campo de los comercios que generen partículas  $PM_{10}$  en el municipio, solicitando la acreditación de la regulación ambiental de su actividad económica con la finalidad de aplicar condicionantes que permitan llevar a cabo la mitigación de los impactos ambientales generados, otorgando 8 permisos a establecimientos de comercios y servicios (IEE 2016).

En la unidad de análisis (texto del informe) antes citado, se observa el significado “levantamiento de datos” que corresponde a un elemento significativo y se codifica en la categoría de instrumentos tecnológicos. El significado “otorgando 8 permisos” corresponde a un elemento numérico y se codifica en la categoría de instrumentos jurídicos. De esta forma en la cita coocurren ambas categorías (códigos) que representan un avance tanto tecnológico como jurídico en la GCA.

### Estimación del IQV en las funciones y estrategias de la URCA

El IQV aplicado mide la variabilidad en datos cualitativos como categorías (Hernández y González 2006). Es una medida de la variación en los significados observados (citas en las unidades de texto) tanto en las funciones como las estrategias de la URCA,

<sup>7</sup>El método comparativo constante implica realizar el análisis de forma cíclica a los documentos para lograr la saturación teórica. Es posible hacer tantos análisis como sea necesario en tanto se agreguen nuevas observaciones a la unidad de análisis, correspondientes a la unidad hermenéutica en el programa Atlas.ti (Strauss y Corbin 2002).

<sup>8</sup>En el análisis cualitativo con Atlas.ti, los significados encontrados en el texto se marcan como “citas” y estas son categorizadas de acuerdo al marco teórico (modelo), en este caso corresponde a las categorías de instrumentos de gestión mostrados en la figura 2.

estas observaciones son categorizadas como instrumentos de gestión de acuerdo con modelo teórico mostrado en la **figura 2**.

La medición de la variabilidad depende del número de categorías y las frecuencias (fundamento teórico) en los significados (número de citas) observados en las unidades de análisis (textos). Se propone un espacio fase de entropía como sistema complejo con un valor que se encuentra entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 significa variabilidad (heterogeneidad) que indica que los significados están agrupados en diversas categorías, los valores 0.5 y cercanos a 1 corresponden a una baja variabilidad de categorías. El espacio fase de entropía se asocia a la medida del desorden, un valor alto indica poca variabilidad o tendencia al caos (falta de orden) y una medida baja indica variabilidad de instrumentos y tendencia al orden. Es conveniente tener un equilibrio contando con una variedad de funciones en las unidades responsables de la GCA para que ejecuten una serie de medidas variadas que incluyan un mayor número de categorías de instrumentos de gestión.

La variabilidad en los resultados medidos con el IQV son mostrados en el **cuadro II** para las funciones y en el **cuadro III** para las estrategias. En estos se aprecia el número de citas  $f$  (fundamento<sup>9</sup>) para cada

código del modelo de gestión (instrumentos) en cada ciudad;  $f^2$  es el número de citas al cuadrado,  $N$  es el número de citas,  $k$  el número de categorías e IQV es el valor calculado con los datos descritos y aplicando la ecuación 1.

En el **cuadro II**, las funciones para las URCA de las ciudades de Salamanca e Irapuato no presentan fundamento debido a que la primera expresó que las funciones de GCA corresponden al gobierno del estado y la segunda no cuenta con una URCA dentro de su estructura de gobierno que ejecute funciones y estrategias para la GCA. En el **cuadro III**, la URCA de Salamanca reporta como estrategia solamente lo relacionado con la red de monitoreo atmosférico en conjunto con el gobierno estatal e Irapuato no se presenta debido a la ausencia de una URCA.

### Estimación del ICC en los avances del PROAIRE

La coocurrencia de códigos en los avances significa los logros referentes a los diferentes instrumentos en la GCA. En los resultados se midió el avance con base en su variabilidad y coocurrencia; ambas se miden con el ICC que al presentar un valor mayor, implicó una mejor instrumentación de avances que posiciona una gestión holística. En esta forma de gestión intervienen tanto elementos cuantitativos

**CUADRO III.** RESUMEN DE LA VARIABILIDAD DE ESTRATEGIAS EN LAS UNIDADES RESPONSABLES DE LA CALIDAD DEL AIRE (URCA) EN LAS CINCO CIUDADES ESTUDIADAS.

	Estrategias	Internacionales	Jurídicos	Económicos	Político-Organizativos	Culturales	Educativos	Sociales	Tecnológicos	N	k	IQV	Promedio de estrategias
Celaya	4		4		2			4	3	13	4	0.24	3.25
León	2		1					1	1	3	3	1	1
Salamanca	1		1		1					2	2	1	1
Silao de la Victoria	5		3		1		1	3	2	10	5	0.42	2
Irapuato													
Totales	12		9		4		1	8	6	52	18	2.67	1.81*

\* Es el promedio de las categorías, la mediana del IQV estratégico es: 0.71.

N es el número de funciones y estrategias observadas (citas codificadas), k es el número de clases (categorías de instrumentos para su codificación) e IQV es el Índice de Variación Cualitativa.

<sup>9</sup> En el análisis cualitativo de la unidad hermenéutica en Atlas.ti, el fundamento es la frecuencia de citas encontradas en las unidades de análisis categorizadas de acuerdo con las variables y representan los significados encontrados en los documentos.

(numéricos) como cualitativos (de significado) categorizados utilizando los ocho instrumentos de gestión.

En el análisis de los avances en cada ciudad, los resultados obtenidos aplicando la ecuación 2 para calcular el ICC, se compararon con la matriz de coocurrencia de códigos que proporciona el programa Atlas.ti. La comparación mostró que son iguales y se muestran en el **cuadro IV**. Hay que recordar que el programa no proporciona el detalle para el cálculo ya que sólo es posible observar los valores. Cada columna en el cuadro es etiquetada con los elementos de la ecuación aplicada para identificar su valor, los resultados en conjunto describen la síntesis de los avances en GCA reportados por cada una de las URCA en las ciudades estudiadas.

En el **cuadro IV** también se sitúan a los Instrumentos Tecnológicos con un resultado mayor, esto por la evidencia e importancia de la red de monitoreo atmosférico como elemento numérico y significado en la GCA para las ciudades de León y Celaya.

**Estimación del espacio fase para funciones y estrategias de GCA**

Los valores del IQV cercanos o con tendencia a 0 indican heterogeneidad en las categorías de instrumentos en las funciones y estrategias adoptadas por cada URCA, es el equivalente al equilibrio (presencia de orden) y representan una gran variabilidad en su instrumentación (categorías). Por el contrario, los

valores cercanos a 1 indican homogeneidad o una baja instrumentación correspondiente a un estado caótico (falta de orden), esto representa una gestión pobre, con pocas funciones y medidas así como un mínimo de instrumentos.

Lo anterior se observa en los **cuadros II y III**, donde la ciudad de León exhibe un IQV de 0.58 calculado con tres funciones (unidades de análisis). Esta ciudad mostró seis citas como fundamento (N) y categorizadas en cuatro instrumentos (k), lo que sugiere una gestión con tendencia al caos. Para Celaya, con un IQV de 0.22, se señalan 10 funciones con 32 citas categorizadas en los ocho instrumentos de gestión, lo que sugiere una gestión heterogénea por la variedad de instrumentos. Esta ciudad se considera como holística y con tendencia al orden.

Utilizando los totales mostrados en los **cuadros II y III**, se crean dos indicadores que son: a) un valor de puntaje funcional y estratégico al multiplicar la sumatoria del IQV de funciones y estrategias por su promedio de funciones y promedio de estrategias; este valor corresponde a la división vertical del espacio fase, y b) la mediana de los IQV que divide horizontalmente para proporcionar los cuatro cuadrantes. A continuación se hace el cálculo de ellos.

Los valores obtenidos son los puntajes funcional de 2.99 ( $2.61 \times 1.15$ ), y estratégico de 4.83 ( $2.67 \times 1.81$ ). La mediana en el IQV funcional es de 0.35 y para el estratégico de 0.71.

**CUADRO IV. RESUMEN DE COOCURRENCIA DE CÓDIGOS EN LOS AVANCES EN GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE (GCA) EN LAS CINCO CIUDADES ESTUDIADAS.**

Categoría de análisis (citas)	León		Celaya		Salamanca		Silao de la Victoria		Irapuato		ICC total	
	Fundamento por ciudad (F <sub>ci</sub> )	19	12	7	6	4						
	Fundamento (F <sub>e2</sub> )	Avance* (F <sub>cc</sub> )	ICC	Avance* (F <sub>cc</sub> )	ICC	Avance* (F <sub>cc</sub> )	ICC	Avance* (F <sub>cc</sub> )	ICC	Avance* (F <sub>cc</sub> )	ICC	
Económicos	2	1	0.05	1	0.08	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.13
Educativos	5	3	0.14	1	0.06	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.21
Internacionales	2	0	0.00	0	0.00	1	0.13	0	0.00	0	0.00	0.13
Jurídicos	18	5	0.16	4	0.15	3	0.14	2	0.09	3	0.16	0.70
Político-Organizativos	1	0	0.00	1	0.08	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0.08
Sociales	6	4	0.19	1	0.06	0	0.00	2	0.20	0	0.00	0.45
Tecnológicos	19	8	0.27	6	0.24	3	0.13	2	0.09	1	0.05	0.77
Totales	53	21	0.81	14	0.68	7	0.39	6	0.38	4	0.20	2.45

\*Las columnas de Avance en cada ciudad corresponden a: F<sub>cc</sub> es la coocurrencia de los códigos, F<sub>ci</sub> es el fundamento por ciudad que corresponde a los avances observados en los informes PROAIRE y F<sub>e2</sub> el fundamento observado por categorías en dichos informes por todas las ciudades. El ICC es la coocurrencia de códigos y se obtiene mediante la ecuación 2 e ICC total es la suma de los ICC por categoría.

La interpretación es que la funcionalidad de la GCA se encuentra en un estado con tendencia al equilibrio (variabilidad de instrumentos), pero la estrategia tiende a ser dispersa (poca instrumentación). La **figura 5** nos muestra el IQV para las funciones y en la **figura 6** para las estrategias en la GCA para las cinco ciudades dentro del espacio geométrico.

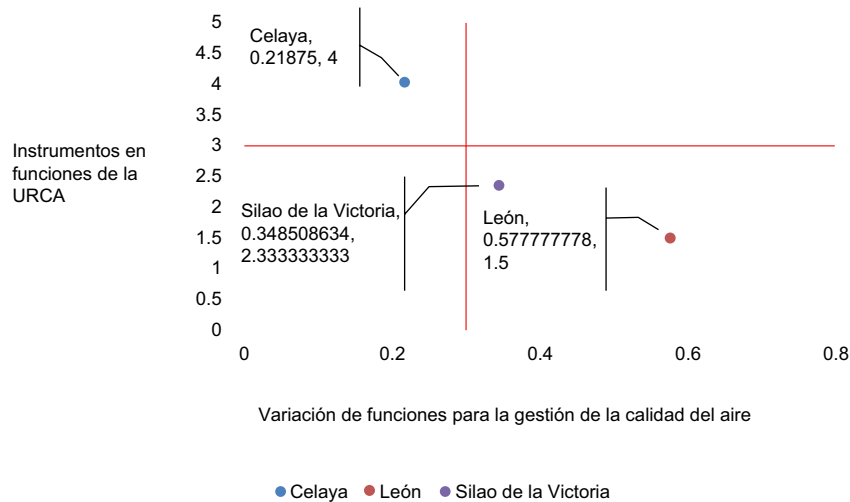
Esta medición con el IQV para las funciones y estrategias en GCA conceptualizan un espacio fase como un sistema complejo similar al modelo de las posturas estudiadas por Sprinz y Tapani (1994) que son mostradas en la **figura 3**.

**Validación de los avances en GCA para las cinco ciudades**

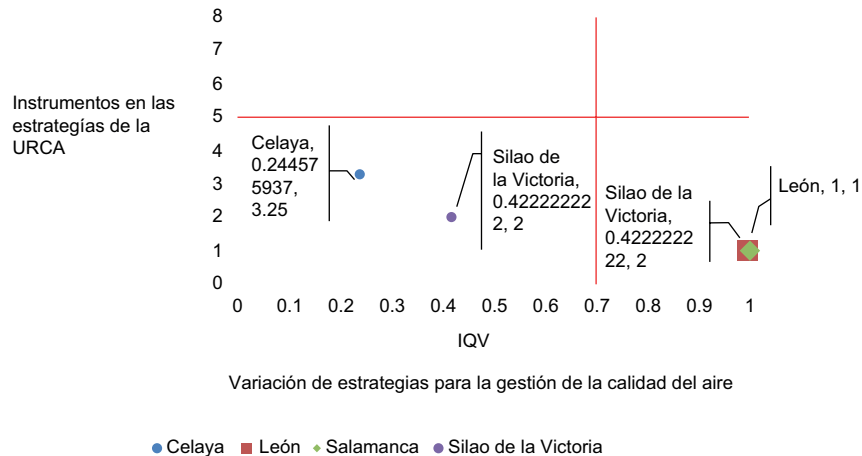
De acuerdo con la teoría fundamentada y el método comparativo constante, en la investigación se obtuvo la saturación teórica en el quinto análisis donde ya no emergen citas codificadas y coocurrencia.

Se calculó el ICC total por cada categoría de instrumentos en los avances reportados en el PROAIRE por cada ciudad. El cálculo y el valor obtenido en cada una se muestra en el **cuadro IV**.

Continuando con el **cuadro IV** es posible observar una relación entre el ICC total y la fundamentación medida con el valor  $F_{c2}$  (citas codificadas en



**Fig. 5.** Índice de Variación Cualitativa (IQV) funcional en las unidades responsables de la gestión de la calidad del aire (URCA).



**Fig. 6.** Índice de Variación Cualitativa (IQV) estratégica en las unidades responsables de la gestión de la calidad del aire (URCA).

los avances), es evidente un efecto positivo<sup>10</sup> de  $F_{c2}$  sobre la significación de los avances en GCA (ICC total), esto quiere decir que a un mayor número de funciones y de estrategias se tiene un mejor resultado en los avances de gestión.

Para medir el efecto positivo se aplicó un modelo de regresión simple entre el ICC total (que es la coocurrencia de instrumentos en los avances del PROAIRE) y el  $F_{c2}$  (Fundamento Teórico de los Avances) para cada URCA de las cinco ciudades, estos avances fueron categorizados con el modelo LART de gestión ambiental (Rivas-Tovar 2009). Con el modelo de la ecuación 3 para medir el efecto positivo se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9095 y un  $\alpha$  de 0.05:

$$ICC_{predicho} = 0.08 + 0.04 FTA_{GCA} \quad (3)$$

Donde,  $ICC_{predicho}$  es el índice de coocurrencia total de los instrumentos en la significación de los avances en GCA y  $FTA_{GCA}$  es la fundamentación total de los instrumentos presentes en los avances del PROAIRE ( $F_{c2}$ ).

La interpretación es que los avances en GCA por cada URCA son explicados en un 90.95 % por la fundamentación total de los instrumentos reportados. Por cada inclusión de un instrumento en las acciones de gestión se logra un efecto positivo de 0.04 en la GCA. En el **cuadro V** se presenta la aplicación del modelo para cada URCA de las cinco ciudades y su efecto predicho.

Este efecto explica que la ciudad de León exhibe mayores avances en GCA, ya que presenta una funda-

mentación teórica de 21 indicadores de avance (citas), seguida por Celaya con 16, Salamanca con 7, Silao de la Victoria con 6 e Irapuato con 4. La explicación del efecto positivo en la GCA asume que los avances reportados por cada ciudad son mejores en la medida que utilizan más instrumentos de gestión.

Aunque los resultados en el modelo del efecto positivo explican la clasificación de la GCA para cada ciudad, a continuación se discute la gestión como un sistema complejo contemplando tanto la evaluación del IQV en las funciones y estrategias así como el ICC observado en los avances reportados. La discusión incluye la medición y análisis de la variabilidad en los elementos cuantitativos (numéricos) y cualitativos (los significados) categorizados con el modelo teórico de gestión ambiental LART.

## DISCUSIÓN

### Ubicación de la GCA en el espacio fase como sistema complejo

Para la GCA como sistema complejo se definen cuatro estados posibles en un espacio fase con base en el IQV (entropía) explicado en la sección anterior. Este espacio se estima para las funciones y estrategias en GCA observadas en la URCA de cada ciudad estudiada. Hay que mencionar que el efecto positivo propicia los cambios de estado en el sistema.

La GCA como sistema complejo en el espacio fase se presenta en la **figura 7** para las funciones y en la **figura 8** para las estrategias. Los estados considerados como cuadrantes se contraponen entre

**CUADRO V.** CLASIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DELAIRE (GCA) EN LAS CINCO CIUDADES ESTUDIADAS.

Ciudad	FT <sub>GCA</sub>	IQV Funcional	IQV Estrategia	Instrumentación de la GCA (ICC predicho)
León	21	0.58	1	0.8577148
Celaya	16	0.22	0.24	0.6744528
Salamanca	7	0	1	0.3445812
Silao de la Victoria	6	0.35	0.42	0.3079288
Irapuato	4	0	0	0.234624

FT<sub>GCA</sub> es el fundamento teórico en Gestión de la Calidad del aire, el IQV es el Índice de Variación Cualitativa. El ICC predicho es el efecto positivo calculado con la ecuación 3.

<sup>10</sup>En los modelos complejos, un efecto positivo significa que un incremento en una variable tiene como efecto un incremento en otra variable o el sistema en sí e indice un cambio de estado.



<b>Consistente</b>	<b>Alineada</b>
Existe un equilibrio entre las funciones y los instrumentos de gestión. La variabilidad de instrumentos se hace evidente en las funciones de la URCA. Es el estado deseado de equilibrio.	Existe una gran funcionalidad, pero carece de variabilidad en los instrumentos de gestión, se hace necesario ajustar las funciones e integrar mayores instrumentos, la tendencia de esto es una alta funcionalidad desordenada.
<b>Precaria</b>	<b>Inconsistente</b>
La funcionalidad es pobre, pero es acorde a los instrumentos de gestión, implica incrementar la funcionalidad e integración de instrumentos de gestión.	Son pocas o son inexistentes las funciones y la tendencia es el caos. Implica asumir el compromiso de la gestión.

Fig. 7. Espacio fase de entropía funcional en la gestión de la calidad del aire.

<b>Compromiso</b>	<b>Evolución</b>
La estrategia está comprometida con la GCA presentan las estrategias pertinentes y en cada una un equilibrio de instrumentos. Es el estado deseado de equilibrio.	Las estrategias son variadas y presentan poca variabilidad de instrumentos, la recomendación sería incrementar la variabilidad de instrumentación de las estrategias.
<b>Involución / Naciente</b>	<b>Creencia</b>
Las estrategias son pocas, aquellas que se observan presentan un adecuado nivel de instrumentación.	Se presentan pocas estrategias o con poca o nula variabilidad de instrumentos, la recomendación es incrementar las estrategias que buscan una coherencia y equilibrio en su instrumentación.

Fig. 8. Espacio fase de entropía estratégica en la gestión de la calidad del aire.

sí en diagonal para las funciones: Consistente vs. Inconsistente; Precaria vs. Alineada; y en las estrategias: Compromiso vs. Creyente; Evolución vs. Involución/ Naciente. El estado posible emerge de acuerdo con el IQV. A continuación se discute cada posición en el espacio.

Para las funciones en GCA, una funcionalidad Consistente (cuadrante I) es aquella que presenta una gran variabilidad de instrumentos, lo que implica una gestión equilibrada con un número considerado de funciones (diez o más), orientadas tanto a elementos cuantitativos (numéricos) como cualitativos (de significado). Su contraparte es una funcionalidad Inconsistente (cuadrante IV) donde existen pocas funciones y sólo se considera una o dos categorías de instrumentos de gestión.

Una poca variabilidad de instrumentos pero demasiadas funciones representa una funcionalidad Alineada (cuadrante II). Esta ubicación significa que la mayoría de sus funciones, si no es que todas, se enfocan solamente a uno o dos instrumentos. Un ejemplo de ello es que todas las funciones se

orientan al monitoreo de contaminantes atmosféricos con base en límites establecidos, esta función es considerada un Instrumento Internacional e Instrumento Tecnológico.

La contraparte es una funcionalidad Precaria (cuadrante III) que implica una funcionalidad pobre pero con cierto grado de variedad de instrumentos; es decir, una o dos funciones pero altamente instrumentadas.

Para las estrategias en GCA, una postura de Compromiso (cuadrante I) consiste en un gran número de estrategias equilibradas por una variedad de los ocho instrumentos y orientadas tanto a elementos cuantitativos como cualitativos. Su contraparte la Creencia (cuadrante IV), implica pocas estrategias con una mínima variedad de instrumentos.

Si las estrategias son varias pero su instrumentación es menor (dos instrumentos), la gestión se encuentra en un estado de Evolución (cuadrante II) y se espera que en un futuro integre más instrumentos a sus estrategias para con ello generar una tendencia al Compromiso (cuadrante I).

La contraparte corresponde a un estado de Involución / Naciente (cuadrante III) que implica pocas estrategias pero con cierta variabilidad de instrumentos (entre tres y cinco). Este estado corresponde a una GCA que pudo ser comprometida o en evolución y abandona sus estrategias conservando sólo algunas (involuciona), también se considera como un estado Naciente de una GCA que inicia con pocas estrategias pero con una variabilidad de instrumentos aceptable.

### Modelo complejo de la GCA

Con el análisis gráfico mostrado en la figura 9, se observa que predominan como avances en GCA los

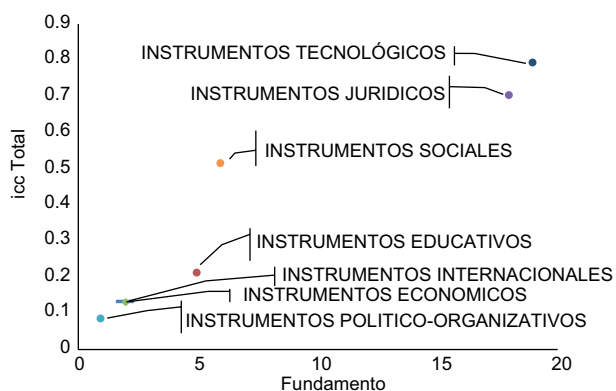


Fig. 9. Coocurrencia de códigos (ICC total) en los avances en la gestión de la calidad del aire.

Instrumentos Tecnológicos y Jurídicos con un valor de 0.70 y 0.77 respectivamente. Se hace evidente el rezago en los Instrumentos Político-Organizativos con un total de 0.08, esto debido a que solamente se categorizó un avance reportado por Celaya.

También es posible observar el efecto positivo del modelo de la ecuación 3 para la clasificación de la GCA como se muestra en la **figura 10**. Aquí se exhibe que la URCA de León cuenta con un índice mayor en GCA, después viene la unidad de Celaya y en tercero la unidad de Salamanca.

Si bien la medición del efecto positivo relaciona la instrumentación ( $FT_{GCA}$ ) con los avances en la gestión ( $ICC_{predicho}$ ), la evaluación todavía sigue siendo subjetiva debido a que la clasificación difiere de la realidad, ya que León reporta mayores avances que Celaya pero su gestión no se considera holística debido que presenta una baja variabilidad en su instrumentación (tendencia al caos).

Lo anterior se explica de la siguiente forma: León presenta mayores indicadores de avances reportados en el PROAIRE, la red de monitoreo, levantamiento de inventario de fuentes de área, verificación de cumplimiento de normativas entre otras, pero se enfocan a un mínimo de instrumentos de gestión en su mayoría correspondientes a cuatro categorías de instrumentos: Jurídicos, Educativos, Sociales y Tecnológicos.

En la ciudad de Celaya, por el contrario, aunque se observaron menos indicadores de avance, estos abarcan las ocho categorías de instrumentos, lo que es posible observar en los **cuadros II** y **III** en la variable  $k$ , que representa el número de categorías para la instrumentación.

Para atender la subjetividad en la medición y establecer una postura con base en esta variabilidad de instrumentos, además del número de funciones y estrategias, se pone a discusión un modelo complejo que incluye el IQV como entropía para medir y determinar una posición en el espacio fase para la GCA.

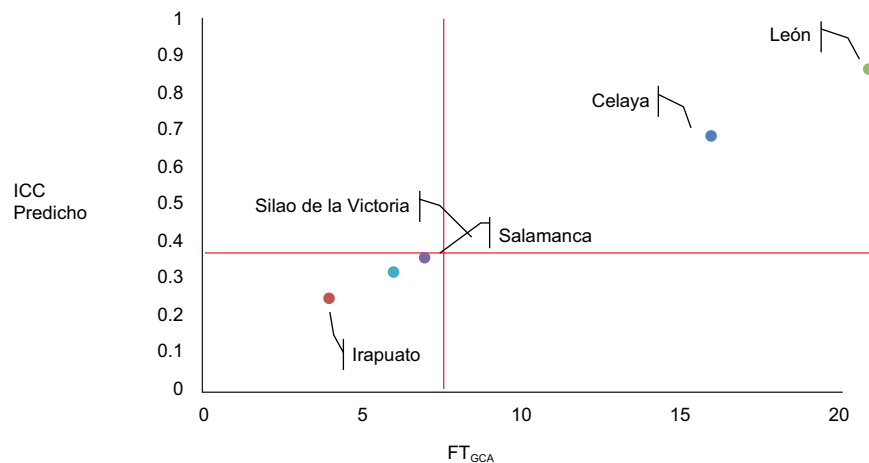
**Entropía en el espacio complejo para la GCA**

Con la medición de resultados en la GCA predichos con el modelo de la ecuación 3, se hace una comparación entre la predicción y el IQV (entropía) de la instrumentación para las funciones y estrategias por cada URCA.

La predicción del efecto positivo posiciona a la URCA en el eje vertical del espacio fase y el IQV para la variabilidad de funciones y estrategias en el eje horizontal como medida del desorden. Las variaciones en entropía para las funciones y estrategias determinan una posición en el espacio del modelo propuesto mostrado en las **figuras 7** y **8**, que fue explicado al inicio de la discusión en el apartado Ubicación de la GCA en el espacio fase como sistema complejo.

En el **cuadro V** se presentó la síntesis de las mediciones para la evaluación de la GCA. Existe un efecto de brecha entre la variabilidad de instrumentos en las funciones de GCA ( $IQV_{funcional}$ ) y la variabilidad de instrumentos en las estrategias de GCA ( $IQV_{estrategias}$ ) con los avances en la GCA ( $ICC_{predicho}$ ). Con esto es posible ubicar la URCA de cada ciudad en el espacio fase de la GCA.

El efecto que tiene la variación de los instrumentos medido con el IQV es el siguiente: con un uso mayor de instrumentos (seis a ocho categorías)



**Fig. 10.** Clasificación de la instrumentación ( $ICC_{predicho}$ ) y fundamento teórico ( $FT_{GCA}$ ) de la gestión de la calidad del aire.

aunque no se tenga un gran número de estrategias o funciones, resulta en un índice menor a 0.5, lo que representa una tendencia al orden con una heterogeneidad de instrumentos ordenada.

Si se tienen diez o más de estrategias o funciones, pero todas orientadas a un mínimo de instrumentos (dos o tres categorías), el índice arroja un valor mayor a 0.5, que implica una tendencia al desorden (caos) por presentar una pobre variedad en la instrumentación.

La relevancia de este modelo complejo como espacio fase es que ubica a cada URCA ante la GCA y proporciona un índice que dimensiona elementos de gestión tanto cuantitativos (numéricos) como cualitativos (de significado). Este hecho se comprobó al compartir los resultados del estudio con el Director y equipo de trabajo de la URCA en la ciudad de Celaya.

En la **figura 11** se muestra gráficamente el espacio fase como sistema complejo y la ubicación de cada URCA ante la GCA para las cinco ciudades estudiadas. Se destaca que el hallazgo es acorde con la realidad ya que el modelo complejo ubica en primer lugar a la ciudad de Celaya con una GCA de 0.67, que presenta una funcionalidad consistente con un IQV de 0.22 y una estrategia comprometida con un IQV de 0.24 ubicada en el cuadrante I.

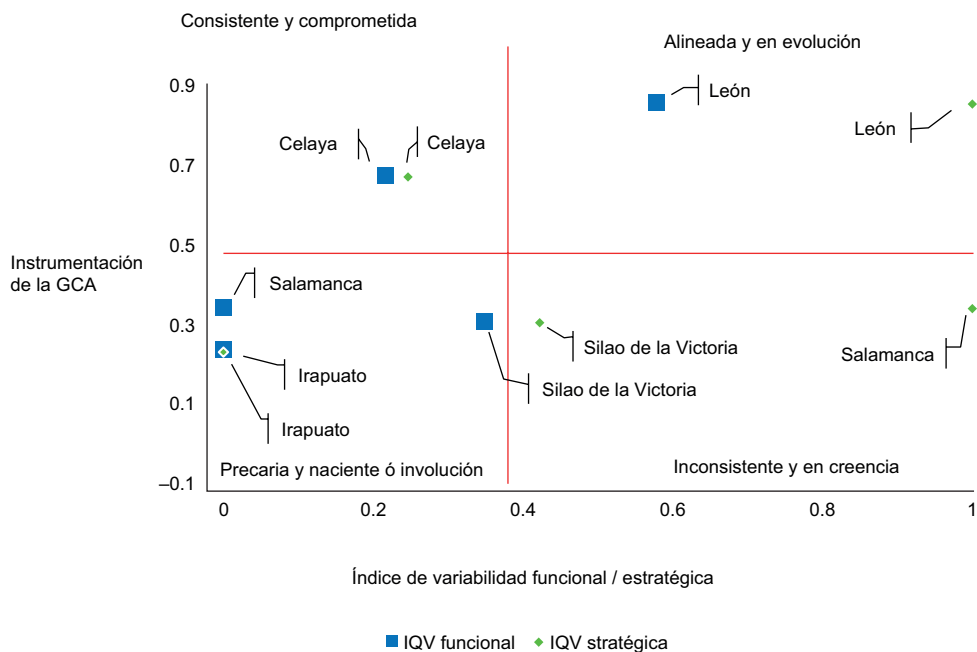
La ciudad de León se posiciona en segundo lugar

con una GCA de 0.85, que si bien presenta una mayor instrumentación en sus avances que Celaya, la variabilidad de los instrumentos en sus funciones con un IQV de 0.58 y estrategias con un IQV de 1, la sitúan como una GCA con una funcionalidad Alineada y una estrategia en Evolución en el cuadrante II. Lo anterior, debido a la poca instrumentación de sus acciones, lo que hace evidente la brecha marcada entre ambas.

Finalmente, en tercer lugar, se coloca a la ciudad de Silao de la Victoria con una GCA de 0.31 de funcionalidad Naciente en el cuadrante III, con un IQV de 0.35 y con Creencia de manera firme en la integración de una variedad de instrumentos, lo que la ubica en el cuadrante IV con un IQV de 0.52. Se presenta una brecha menor entre las estrategias y las funciones, de tal forma que con un seguimiento adecuado tendrá la oportunidad de disminuirla y tender a una postura deseable en el cuadrante I o evolucionar hacia el cuadrante II.

### CONCLUSIONES

Con la información contenida en las respuestas a las solicitudes -vía Plataforma Nacional de Transparencia- referentes a las funciones y estrategias en GCA por parte de cada URCA en las cinco ciudades,



**Fig. 11.** Clasificación del Índice de Variación Cualitativa (IQV) en la gestión de la calidad del aire en las cinco ciudades estudiadas.

se logró observar, medir y analizar la variabilidad de elementos cuantitativos y cualitativos de gestión. De las cinco ciudades, la Unidad de Celaya presentó una actitud positiva, abierta al escrutinio y una gran participación para la investigación.

Los modelos teóricos empleados permitieron el estudio con un enfoque holístico. La medición y la descripción del análisis cualitativo facilitaron la síntesis en el índice de GCA propuesto como sistema complejo. Con lo anterior, el modelo explica el efecto positivo de la variabilidad de instrumentos (IQV) en el proceso de gestión de la siguiente manera: a mayor instrumentación (número de categorías de instrumentos) es evidente un mejor proceso de gestión (ordenado, no caótico).

Una mejor gestión no implica directamente una mejor calidad del aire en las ciudades. Sin embargo, el modelo propuesto mide de forma objetiva la gestión y se podrá incluir con otros modelos y teorías en estudios futuros para dimensionar su efecto positivo o negativo en la calidad del aire y control de las emisiones.

El valor que resulta del modelo se propone como un índice para medir la instrumentación del proceso de gestión, no como una medida para la efectividad, ya que esta incluye otras variables como el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, las parcelas de aire y la ubicación geográfica, entre otras.

Es relevante en el resultado, que si bien el efecto positivo previamente descrito propone una medición de los avances en gestión, la comparación con la entropía en las funciones y estrategias seguidas por las URCA, determina una posición en el espacio fase basado en la entropía (desorden) que emerge dependiendo del uso de los ocho instrumentos de gestión para la GCA.

Este desorden en las funciones y estrategias en el modelo complejo propuesto establece una posición clara de la URCA en la GCA, facilitando a las unidades responsables un panorama gráfico en el espacio fase como modelo complejo. Con lo anterior, se pueden planificar acciones que aseguren llegar a una gestión consistente y comprometida (cuadrante I del modelo).

El hallazgo relevante es el caso de Celaya, cuyo índice de GCA evaluado con el modelo propuesto en este estudio coincide con el resultado obtenido por su participación en el One Planet City Challenge 2019 del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF 2022). El evento contó con la participación de doscientas treinta y ocho ciudades a nivel mundial, y Celaya finalizó dentro de las primeras 10 ciudades de América Latina, hecho se verificó con el Director y su equipo de trabajo de la URCA.

El modelo complejo propuesto en este estudio permite evaluar la brecha entre las funciones y las estrategias de la GCA, como es el caso de la ciudad de Silao de la Victoria en donde la función es naciente ya que la URCA tiene poco tiempo de existir y presenta una estrategia creyente en la importancia de su gestión.

Además de lo señalado, este análisis de brechas en el espacio fase con base en la entropía permite detectar casos preocupantes como el de la ciudad de Salamanca, cuna del programa PROAIRE (IE 2004), donde con el paso del tiempo sus funciones se han tornado precarias (cuadrante III) y sus estrategias se muestran inconsistentes (cuadrante IV).

Los resultados arrojados por las cinco ciudades reflejan el predominio de los instrumentos Tecnológicos y Jurídicos y un rezago de los instrumentos Político-Organizativos.

La conclusión final es que la GCA se enfoca principalmente a la medición de las emisiones de contaminantes atmosféricos para determinar y atender las contingencias ambientales provocadas por la contaminación, además de crear los instrumentos jurídicos regulatorios que las sustentan, como los reglamentos ambientales y los programas de verificación. Por otra parte, se abandona el desarrollo político-organizacional de las URCA, que son las responsables de la GCA, ya que carecen de estructura para el desempeño de sus funciones estratégicas y, en el peor de los casos, su figura ni siquiera existe en la estructura del gobierno de la ciudad.

Es evidente la poca variabilidad de los instrumentos de gestión por lo que se sugiere una mayor inclusión de ellos de forma holística (para un IQV menor con tendencia al equilibrio) que abarque tanto elementos cuantitativos (numéricos) como cualitativos (de significado). Se sugieren estrategias orientadas a la instrumentación de las categorías con poca o nula implementación: Sociales, Económicas, Educativas y Culturales.

Los estudios futuros deberán orientarse a la integración con otros modelos que emplean la ciencia de datos y la inteligencia artificial. El modelo propuesto en este trabajo se podrá usar como función de cambio para el estado del sistema.

También se considera la integración del modelo propuesto en simuladores utilizados en la GCA como el programa MOVES (EPA 2021) que no incluye mediciones similares al IQV e ICC propuestos. Además podrán desarrollarse módulos de programa para implementar el modelo en los lenguajes de Python y R para la medida del IQV e ICC, lo que brindará facilidad y libertad de uso.

## REFERENCIAS

- Ancona C., Badaloni C., Mataloni F., Bolignano A., Bucci S., Cesaroni G., Sozzi R., Davoli M. y Forastiere F. (2015). Mortality and morbidity in a population exposed to multiple sources of air pollution: a retrospective cohort study using air dispersion models. *Environmental Research* 137, 467-474. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.10.036>
- ATLAS.ti (2022). ATLAS.ti [en línea]. <https://atlasti.com/es/15/08/2022>
- EPA (2021). Motor vehicle emission simulator. Environmental Protection Agency [en línea]. <https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves/15/08/2022>
- GEG (2022). Guanajuato, con la segunda red de monitoreo de calidad del aire más importante del país. Gobierno del Estado de Guanajuato [en línea]. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2022/05/03/guanajuato-con-la-segunda-red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-mas-importante-del-pais/#:~:text=En%201999%20se%20instal%C3%B3%20la,Aire%20del%20Estado%20de%20Guanajuato/16/08/2022>
- Gulia S., Nagendra S. S., Khare M. y Khanna I. (2014). Urban air quality management-A review. *Atmospheric Pollution Research* 6 (2), 286-304. doi:<https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>
- Hernández R. y González M. (2006). Estadística con SPSS y metodología de la investigación. Trillas, Ciudad de México, México, 536pp.
- IEE (2008). Programa para mejorar la calidad del aire en León 2008 -2012. Instituto de Ecología del Estado. Programa. Guanajuato, Guanajuato, México, 56 pp.
- IEE (2014). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire de la zona metropolitana de León. Instituto de Ecología del Estado. Programa. Guanajuato, Guanajuato, México, 164 pp.
- IEE (2016). 2o informe PROAIRE 2014-2015 Salamanca, Celaya e Irapuato. Instituto de Ecología del Estado. Informe. Guanajuato, Guanajuato, México, 17 pp.
- SMOT (2022). Subsistema estatal de información de calidad del aire. Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial [en línea]. <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/seica/monitoreo/17/08/2022>
- INEGI (2020). Cuéntame información por entidad Guanajuato. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [en línea]. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/gto/default.aspx?tema=me&e=11/17/08/2022>
- INEGI (2022). Sistema para la consulta de información censal 2020. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [en línea]. <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/17/08/2022>
- IE (2004). Programa para mejorar la calidad del aire en Salamanca. Instituto de Ecología [en línea]. [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/ProAires\\_Anteriores/10\\_PRO-AIRE\\_SALAMANCA.pdf/18/08/2022](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/ProAires_Anteriores/10_PRO-AIRE_SALAMANCA.pdf/18/08/2022)
- IPLANEG (2012). Plan estatal de desarrollo 2035. Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato [en línea]. [https://transparencia.guanajuato.gob.mx/biblioteca\\_digital/docart10/201501141426150.PED2035ResumenEjecutivo.pdf/19/08/2022](https://transparencia.guanajuato.gob.mx/biblioteca_digital/docart10/201501141426150.PED2035ResumenEjecutivo.pdf/19/08/2022)
- Molina M. (2014). Expansión urbana y cambio climático. *Revista Ciencia* 65 (4), 10-13.
- OMS (22 de septiembre de 2021). Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. Organización Mundial de la Salud [en línea]. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution/19/08/2022>
- PNT (2020). Plataforma Nacional de Transparencia [en línea]. <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/12/08/2022>
- Rivas-Tovar L. A. (2009). Efectos de la teoría de la complejidad en la gestión ambiental en México. Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, 425 pp.
- Rivas-Tovar L. A. (2020). Elaboración de una tesis. Estructura y metodología. 2a ed, Trillas, Ciudad de México, México, 384 pp.
- Sprinz D. y Tapani V. (1994). The Interest-Based explanation of international environmental policy. *International Organization* 48 (1), 77-105.
- Strauss A. y Corbin J. (2002). Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada. 2a ed, Sage, Medellín, Colombia, 340 pp.
- Szulecka A., Oleniacz R. y Rzeszutek M. (2017). Functionality of openair package in air pollution assessment and modeling—a case study of Krakow. *Environmental Protection and Natural Resources* 28 (2), 22-27. doi:<https://doi.org/10.1515/oszn-2017-0009>
- WHO (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. World Health Organization [en línea]. [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;jsessionid=B8E23E0D297FE107298C7668FF889CB7?sequence=1/16/08/2022](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=B8E23E0D297FE107298C7668FF889CB7?sequence=1/16/08/2022)
- WWF (2022). One planet city challenge. World Wide Foundation [en línea]. [https://wwf.panda.org/projects/one\\_planet\\_cities/one\\_planet\\_city\\_challenge/12/08/2022](https://wwf.panda.org/projects/one_planet_cities/one_planet_city_challenge/12/08/2022)