

# CAPSTONE PROJECT

## 1. Diseño

### 1.1 Pregunta de diseño y restricciones

En relación al objetivo final del curso descrito, este proyecto de grado en ingeniería se alinea de manera integral al definir y abordar un problema complejo en el ámbito de la calidad del aire en Bogotá. La investigación se enfoca en el análisis exhaustivo de contaminantes atmosféricos críticos como NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, y PM<sub>10</sub>, utilizando métodos en ciencias de la ingeniería y modelado estadístico para ofrecer soluciones viables y efectivas. Mediante el empleo de modelos econométricos como los modelos Probit, VAR, VECM y ARDL, junto con técnicas de Random Forest, se identifican patrones y se pronostican tendencias que son fundamentales para la formulación de políticas públicas eficaces. Este enfoque no solo aborda los desafíos técnicos y ambientales, sino que también contempla la interacción entre múltiples disciplinas y stakeholders, incluyendo entidades gubernamentales y la comunidad científica, destacando la significancia del diseño en ingeniería aplicado a problemas urbanos complejos.

No obstante, la realización de este estudio involucró enfrentar diversas restricciones críticas:

1. Acceso a Datos: La recopilación de datos de contaminantes y variables meteorológicas fue restringida debido a la limitada disponibilidad y la inconsistencia en las mediciones de algunas estaciones de monitoreo. Esto influyó en la selección y exclusión de ciertas variables en el análisis.
2. Códigos y Modelado: Inicialmente, la investigación enfrentó limitaciones en la implementación de modelos como VAR, VECM y ARDL debido a la falta de acceso a los códigos apropiados. Esta barrera fue superada gracias a la intervención de la asesora del proyecto, quien facilitó los códigos necesarios.
3. Normatividad y Estándares: La investigación tuvo que adherirse a las normativas internacionales sobre calidad del aire, lo que limitó la libertad de explorar enfoques más experimentales que no se alinearan estrictamente con estos estándares.
4. Interoperabilidad: La integración de datos de múltiples fuentes y su análisis a través de diferentes plataformas de software presentó desafíos significativos, requiriendo una estandarización meticulosa de los datos antes del análisis.
5. Sostenibilidad y Políticas Públicas: Las recomendaciones de políticas tuvieron que considerar la viabilidad a largo plazo y la aceptación política y social, limitando la propuesta de soluciones que requerían cambios radicales o inversiones significativas a corto plazo.

Cada una de estas restricciones necesitó ser cuidadosamente manejada para asegurar que los resultados del estudio fueran tanto científicamente válidos como aplicables en el contexto político y social de Bogotá, destacando el papel crucial del diseño en ingeniería en la resolución de problemas complejos.

**Palabras: 398**

### 1.1 Design question and constraints

In relation to the final objective of the course described, this engineering degree project is comprehensively aligned by defining and addressing a complex problem in the field of air quality in Bogotá. The research focuses on the comprehensive analysis of critical air pollutants such as NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub>, using methods in engineering sciences and statistical modeling to offer viable and effective solutions. By employing econometric models such as Probit, VAR, VECM and ARDL models, along with Random Forest techniques, patterns are identified and trends are predicted that are critical for the formulation of effective public policies. This approach not only addresses technical and environmental challenges, but also contemplates the interaction between multiple disciplines and stakeholders, including government entities and the scientific community, highlighting the significance of engineering design applied to complex urban problems.

However, the realization of this study involved facing several critical constraints:

1. **Data Access:** Data collection of pollutant and meteorological variables was restricted due to limited availability and inconsistent measurements from some monitoring stations. This influenced the selection and exclusion of certain variables in the analysis.
2. **Codes and Modeling:** Initially, the research faced limitations in the implementation of models such as VAR, VECM and ARDL due to the lack of access to appropriate codes. This barrier was overcome thanks to the intervention of the project advisor, who provided the necessary codes.
3. **Regulations and Standards:** The research had to adhere to international air quality regulations, which limited the freedom to explore more experimental approaches that did not strictly align with these standards.
4. **Interoperability:** Integrating data from multiple sources and analyzing them across different software platforms presented significant challenges, requiring meticulous standardization of data prior to analysis.
5. **Sustainability and Public Policy:** Policy recommendations had to consider long-term viability and political and social acceptability, limiting the proposal of solutions that required radical changes or significant short-term investments.

Each of these constraints needed to be carefully managed to ensure that the results of the study were both scientifically valid and applicable in the political and social context of Bogotá, highlighting the crucial role of engineering design in solving complex problems.

**Words: 354**

### 1.2 Pregunta de normatividad, regulaciones y estándares nacionales e internacionales

En el contexto de la investigación realizada para mejorar la calidad del aire en Bogotá, se hizo indispensable adherirse a un conjunto riguroso de normas y regulaciones tanto nacionales como internacionales, asegurando que los métodos y recomendaciones propuestas estuvieran alineados con los estándares aceptados globalmente y las políticas locales vigentes. Este acercamiento no solo garantiza la relevancia y aplicabilidad de los hallazgos, sino que también fortalece la integridad metodológica y la credibilidad de las propuestas de intervención.

- **Normatividad Internacional:** A nivel internacional, la principal referencia utilizada fue la establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los Niveles de Guía de Calidad del Aire (AQG) de la OMS proporcionan umbrales para contaminantes específicos, incluyendo PM2.5, PM10, dióxido de nitrógeno (NO2), y ozono, entre otros. Estos niveles son diseñados para proteger la salud pública de los efectos nocivos de la contaminación del aire y sirven como una meta para alcanzar o mantener la calidad del aire. En el estudio se tomaron estos niveles como criterios de evaluación y comparación de la calidad del aire en Bogotá, lo cual fue esencial para diagnosticar la severidad de la contaminación y para establecer objetivos claros de mejora.
- **Aplicación de Normativas en la Solución Propuesta:** Al diseñar las soluciones y estrategias de mitigación, fue fundamental considerar estas normativas para asegurar que cualquier intervención propuesta fuera realista y ejecutable dentro del marco legal existente. Por ejemplo, las recomendaciones sobre la actualización de la infraestructura de monitoreo de la calidad del aire y la implementación de tecnologías más limpias en transporte y industrias debían cumplir con los límites establecidos tanto por la OMS como por las regulaciones nacionales.

Además, se consideraron las directrices para el manejo y reporte de datos ambientales, asegurando que la metodología de recopilación, análisis y presentación de la información fuera transparente, replicable y conforme a los estándares de calidad y precisión requeridos por las autoridades ambientales colombianas y las recomendaciones internacionales.

## **Palabras: 319**

### **1.2 Question of national and international norms, regulations and standards**

In the context of the research conducted to improve air quality in Bogotá, it became essential to adhere to a rigorous set of national and international norms and regulations, ensuring that the proposed methods and recommendations were aligned with globally accepted standards and current local policies. This approach not only guarantees the relevance and applicability of the findings, but also strengthens the methodological integrity and credibility of the intervention proposals.

- **International Standards:** At the international level, the main reference used was that established by the World Health Organization (WHO). The WHO Air Quality Guideline Levels (AQG) provide thresholds for specific pollutants, including PM2.5, PM10, nitrogen dioxide (NO2), and ozone, among others. These levels are designed to protect public health from the harmful effects of air pollution and serve as a target for attaining or maintaining air quality. The study used these levels as criteria for evaluating and comparing air quality in Bogotá, which was essential to diagnose the severity of pollution and to establish clear objectives for improvement.
- **Application of Regulations in the Proposed Solution:** In designing solutions and mitigation strategies, it was critical to consider these regulations to ensure that any proposed interventions were realistic and enforceable within the existing legal framework. For example, recommendations on upgrading air quality monitoring infrastructure and

implementing cleaner technologies in transportation and industries had to comply with limits set by both WHO and national regulations.

In addition, guidelines for the management and reporting of environmental data were considered, ensuring that the methodology for the collection, analysis and presentation of information was transparent, replicable and in accordance with the standards of quality and accuracy required by the Colombian environmental authorities and international recommendations.

**Words: 279**

## 2. Pregunta de ética

El proyecto de grado sobre la calidad del aire en Bogotá, centrado en el análisis de los niveles de contaminantes clave como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, y su correlación con variables meteorológicas, presenta múltiples implicaciones éticas si se llegase a implementar sus recomendaciones.

### Impacto Positivo

- **Ambiental:** La implementación de las recomendaciones del proyecto podría resultar en una mejora significativa de la calidad del aire en Bogotá. Esto incluye la reducción de los niveles de contaminantes nocivos, lo que llevaría a una mejor calidad del aire para los bogotanos. Una disminución en la concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, por ejemplo, reduciría la incidencia de problemas respiratorios y cardiovasculares asociados con la contaminación del aire, contribuyendo directamente a la salud pública.
- **Económico:** Un aire más limpio puede traducirse en menos días perdidos de trabajo debido a enfermedades relacionadas con la contaminación, lo que mejora la productividad. Además, al reducir los gastos en salud pública asociados con el tratamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, se liberan recursos que pueden ser reinvertidos en otros sectores críticos.
- **Social:** Socialmente, la implementación del proyecto fomentaría una mayor conciencia y educación sobre la importancia de la calidad del aire. Esto podría estimular una mayor participación comunitaria en iniciativas ambientales y promover estilos de vida más sostenibles.
- **Político:** Políticamente, el proyecto podría fortalecer las políticas ambientales y regulaciones locales, estableciendo un precedente para la acción gubernamental en temas de sostenibilidad y protección ambiental. También podría mejorar la imagen internacional de Bogotá como ciudad comprometida con el desarrollo sostenible.

### Impacto Negativo

- **Económico:** La implementación de las estrategias propuestas podría requerir una inversión económica significativa inicial, lo cual podría ser percibido como una carga para los contribuyentes o un desvío de fondos de otras áreas críticas. Además, las industrias afectadas por nuevas regulaciones podrían enfrentar costos de adaptación y posible pérdida de ingresos, lo que podría generar oposición.

- Social: Existe el riesgo de que las políticas implementadas puedan ser vistas como restrictivas o como una imposición, especialmente si afectan la cotidianidad de las personas, como limitaciones al uso del vehículo personal. Esto podría generar resistencia social, especialmente entre aquellos directamente afectados, como los conductores y las industrias.
- Político: El proyecto podría generar tensiones políticas, especialmente si las medidas propuestas se perciben como favorecedoras de ciertos grupos o como una imposición de la administración actual sobre la autonomía personal o empresarial.

**Palabras: 395**

## 2. Ethics question

The graduate project on air quality in Bogotá, focused on the analysis of the levels of key pollutants such as nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles, and their correlation with meteorological variables, presents multiple ethical implications if its recommendations were to be implemented.

### Positive Environmental

- Environmental: Implementation of the project recommendations could result in a significant improvement of air quality in Bogotá. This includes a reduction in the levels of harmful pollutants, which would lead to improved air quality for the people of Bogotá. A decrease in the concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, for example, would reduce the incidence of respiratory and cardiovascular problems associated with air pollution, contributing directly to public health.
- Economic: Cleaner air can translate into fewer days lost from work due to pollution-related illnesses, which improves productivity. In addition, reducing public health costs associated with the treatment of respiratory and cardiovascular diseases frees up resources that can be reinvested in other critical sectors.
- Social: Socially, project implementation would foster greater awareness and education about the importance of air quality. This could stimulate greater community participation in environmental initiatives and promote more sustainable lifestyles.
- Political: Politically, the project could strengthen local environmental policies and regulations, setting a precedent for government action on sustainability and environmental protection issues. It could also improve Bogotá's international image as a city committed to sustainable development.

### Negative Impact

- Economic: Implementation of the proposed strategies could require significant upfront financial investment, which could be perceived as a burden to taxpayers or a diversion of funds from other critical areas. In addition, industries affected by new regulations could face adaptation costs and possible loss of revenue, which could generate opposition.
- Social: There is a risk that the policies implemented could be seen as restrictive or as an imposition, especially if they affect people's daily lives, such as limitations on the use of

personal vehicles. This could generate social resistance, especially among those directly affected, such as drivers and industries.

- Political: The project could generate political tensions, especially if the proposed measures are perceived as favoring certain groups or as an imposition of the current administration on personal or business autonomy.

**Words: 357**

### 3. Rúbrica de cursos usados en el proyecto

En la rúbrica adjunta, he marcado con una "X" en la columna "Utilizados" aquellos cursos que brindaron mayor apoyo en el desarrollo del proyecto.

Área	Cursos	Código	A Usar	Descripción de las herramientas del curso que piensa integrar en su proyecto
Investigación de Operaciones y Estadística	PRINCIPIOS OPTIMIZACIÓN	IIND-2103	X	Herramientas de programación en Python para procesamiento de datos.
	MODELOS PROBABILÍSTICOS	IIND-2104		Herramientas de programación en RStudio para procesamiento de datos.
	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA I	IIND-2106		Herramientas de programación en RStudio para procesamiento de datos.
	PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA II	IIND-2107	X	Estimaciones de varianzas, pruebas de hipótesis e intervalos de confianza.
	SISTEMAS APOYO A LA DECISIÓN	IIND-2109		
	SIMULAC. EVENTOS DISCRETOS	IIND-3113	X	Diagramas de q-q plot, p-p plot, histogramas. Manejo de RStudio.
		IIND-		
		IIND-		
		IIND-		
Producción y	CONTROL DE PRODUCCIÓN	IIND-2201		

	FUNDAMENTOS DE PRODUCCIÓN	IIND-2202		
	LOGÍSTICA	IIND-3221		
		IIND-		
		IIND-		
		IIND-		
Gestión de Organizaciones	PENS SISTÉMICO ORGANIZACIONES	IIND-2302		
	DINÁMICA DE SISTEMAS	IIND-2301		
	ESTRATEGIA ORGANIZACIONAL	IIND-3311		
		IIND-		
		IIND-		
		IIND-		
Economía y Finanzas	SIST. DE CONTROL GERENCIAL	IIND-2400		
	ANALIS.DECISIÓN INVERSIÓN	IIND-2401		
	FINANZAS	IIND-3400		
		IIND-		
		IIND-		
		IIND-		
Otros	INGENIERÍA FINANCIERA	IIND-4414	X	Analítica de datos. Introducción a Procesos Estocásticos. Modelo ARCH.
	ECONOMETRIA 1 (CON TALLER)	ECON 2301		
	ECONOMETRIA 2 (CON TALLER)	ECON 3311		

