

# MODELACIÓN REGIONAL DE INYECCIÓN DE AEROSOLES DE SULFATO PARA REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA GLOBAL EN FORMA ARTIFICIAL. CASO: REGIÓN DE CUYO.

Mulena, Gabriela C.\*<sup>1</sup>, Puliafito, Salvador E.<sup>1</sup> y Lakkis Gabriela S.<sup>2</sup>

1: Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente

Facultad Regional Mendoza

Universidad Tecnológica Nacional

Rodríguez 273. C.P. 5500. Mendoza

e-mail: celeste.mulena@gmail.com, epuliafito@frm.utn.edu.ar, web: <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa/>

2: Programa para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global

Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Tecnológica Nacional

Mendoza (5500)

e-mail: gabyLakkis@uca.edu.ar;

web: <http://www.uca.edu.ar/index.php/site/index/es/universidad/investigacion/ucacyt/pepacg/>

**Palabras clave:** Geoingeniería Climática, Modificación Artificial del Clima, Inyección de Aerosoles, Volcanes, Modelación Regional, WRF.

**Resumen.** *Esta investigación está basada en el método de inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera baja, derivada de la geoingeniería climática. La técnica se fundamenta en los efectos provocados por las erupciones volcánicas y su objetivo es incrementar los niveles naturales de aerosoles de sulfato de manera artificial, causando un aumento en el albedo planetario y reduciendo la entrada de la radiación solar y, logrando la disminución de la temperatura media global. Hasta el momento los científicos se han abocado a la realización de estudios con modelo de circulación general, sin embargo, se cree importante poner a prueba esta técnica de geoingeniería bajo una visión local. En razón de ello, se propone desarrollar un modelo regional de inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera baja para reducción de la temperatura media global, elegir escenarios (regionales) ambientalmente sostenibles de siembra y con ellos estudiar los balances de los impactos positivos y negativos, como así también, la sensibilidad del área. La zona en estudio es la Región de Cuyo debido a presenta antecedentes de alta vulnerabilidad en sus ecosistemas y, por tanto, también podría ser susceptible al empleo de sulfatos estratosféricos. El modelo regional, WRF se utilizará para el estudio.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente preocupación por parte del ambiente científico, y la sociedad en general, por evitar y mitigar las consecuencias del cambio climático. La evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [1] muestra que los indicadores inequívocos del cambio climático inducido por el hombre son cada vez más evidentes. Los debates actuales sobre políticas se centran en una reducción de las emisiones de carbono a través del aumento de la eficiencia energética y el cambio de combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, geotérmica y los biocombustibles, posiblemente,

complementado con el uso a gran escala de la energía nuclear. A falta de progresos visibles en la disminución de las emisiones, los científicos han comenzado a discutir enfoques de emergencia para mitigar el calentamiento planetario. Por esta razón, la geoingeniería está recibiendo una creciente atención.

La *geoingeniería* se define como toda aquella intervención humana intencional en el ambiente, a gran escala. La *escala* e *intención* juegan un rol central en la definición. Para que una acción sea considerada de geoingeniería, el cambio del ambiente debe ser el objetivo primario por sobre los efectos secundarios, y la intención y el efecto de la manipulación debe ser a gran escala, por ejemplo, a nivel continental o mundial [2]. Las manipulaciones no necesariamente deben estar dirigidas a cambiar el medio ambiente, también contemplan mantener un estado deseado del mismo frente a las perturbaciones, ya sean naturales o antropogénicas. Tres atributos esenciales sirven como indicadores de la geoingeniería: la escala, la intención, y el grado en que su acción es una medida compensatoria o una “solución técnica”. Podemos decir que la noción de modificación artificial del clima no es nueva. En este sentido, en la provincia de Mendoza, constan referencias del empleo de prácticas artificiales para modificación del clima, tal es el caso de la lucha antigranizo y la lucha contra las heladas<sup>3</sup>. De este modo, se puede pensar a la geoingeniería, como una extensión a mayor escala de los métodos de modificación artificial del clima. El primer uso del término geoingeniería, en el sentido anteriormente definido, fue utilizado por Marchetti en la década del '70 para describir la mitigación del impacto climático por la quema de combustibles fósiles mediante la inyección de dióxido de carbono en las profundidades oceánicas [3].

La geoingeniería ha sido usualmente aplicada a propuestas para manipular el medio ambiente con el objetivo de reducir el no deseado cambio climático causado por la influencia humana. Esta categoría se llama *geoingeniería climática* y su función da respuesta al problema del *dióxido de carbono* y el *clima*. Las principales técnicas de geoingeniería climática propuestas se engloban en dos áreas: 1) La captura de dióxido de carbón; 2) La gestión de la radiación solar. Ambos métodos, tienen el objetivo final de reducir la temperatura global, pero hay grandes diferencias en sus modos de acción, los plazos durante los cuales los resultados son efectivos, los efectos sobre la temperatura y otras consecuencias; de modo que ellos son; generalmente mejores considerados por separado.

Esta propuesta de trabajo se centra en las medidas de gestión de radiación solar, más precisamente, en el **método para inyectar gases precursores de aerosoles en la estratosfera** sugerido por Budyko [4, 5], Dickinson [6] y Crutzen [7]. La mayor parte de la discusión de la geoingeniería con aerosoles de sulfato se ha focalizado en el uso de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); sin embargo, otros precursores sulfatados, como el sulfuro de hidrógeno, sulfuro de carbonilo, y el sulfato de amonio, también podrían ser utilizados eventualmente. Cabe señalar que existen estudios en lo referente a inyección de aerosoles en la atmósfera; por ejemplo sobre aerosoles emitidos, en forma estacional, por la quema de biomasa [8].

El método de geoingeniería de la inyección de SO<sub>2</sub>, en la estratosfera, se basa en los efectos provocados por las erupciones volcánicas. Su objetivo es incrementar los niveles naturales de aerosoles de sulfato de manera artificial, causando un aumento en el albedo planetario y reduciendo la entrada de la radiación solar y, así mismo, lograr la disminución de la temperatura global [7, 9, 10, 11, 12, 13]. Las analogías entre las principales erupciones

---

<sup>3</sup>[www.contingencias.mendoza.gov.ar](http://www.contingencias.mendoza.gov.ar)

volcánicas y las inyecciones de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera son aún imperfectas. Las primeras son esporádicas y sus impactos podrían sólo durar unos pocos años, mientras que la técnica de geoingeniería de siembra de sulfato en la estratosfera, requiere una constante inyección de sulfatos, por décadas o siglos, para equilibrar el aumento de los forzamientos radiativos por los gases de efecto invernadero.

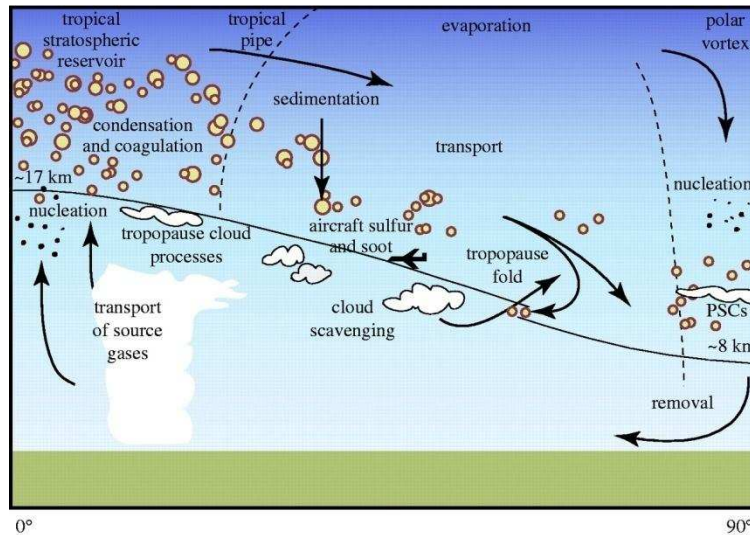


Figura 1. Esquema de [13] de los procesos que influyen el ciclo de vida de los aerosoles estratosféricos

La erupción del Monte Pinatubo en 1991, en Filipinas, es un ejemplo de inyecciones naturales de azufre en la atmósfera. Este acontecimiento, supuso un descenso en la cantidad de radiación con un correspondiente enfriamiento de entre  $0,5 - 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$  en grandes zonas de la Tierra durante los años 1992 y 1993. Tras la erupción fueron identificados, además, variados impactos regionales por ejemplo: el fortalecimiento de la Oscilación del Atlántico Norte, uno de los modos de variabilidad climática más importante [14, 15, 16, 17, 18] una reducción significativa en el ozono estratosférico, con un nivel mundial cerca del 2% por debajo del valor esperado [19] y un decremento substancial en las precipitaciones sobre la tierra, con el correspondiente registro, de reducciones en la escorrentía y la descarga de los ríos [20]. Este fenómeno provocado por erupciones volcánicas también ha sido estudiado en menor escala, tal es el caso, del volcán “El Chichón” en México [21].

Existen numerosos procesos que requieren ser investigados, tal como la dinámica de intercambio estratosfera-troposfera, impulsada entre otros factores por el calentamiento de aerosoles en la estratosfera baja que afecta el vapor de agua estratosférico y el forzamiento radiativo [22]. Un mayor intercambio estratosfera-troposfera de aerosoles de sulfato reduciría también la vida útil de la capa de aerosol, requiriendo un aumento en las inyecciones para mantener un determinado valor de la profundidad óptica. Esto último, afecta el ciclo de reconstrucción y destrucción del ozono estratosférico. Tilmes et al. (2008) [23] sugieren que el agotamiento del ozono en el Ártico, tras la inyección de sulfato, podría ser mucho mayor y provocaría un retraso en la recuperación de la capa de ozono en la Antártida por tal vez, hasta 70 años [24, 25]. Varios estudios de modelos climáticos han explorado el impacto de una capa de sulfato estratosférico diseñada artificialmente [13, 26, 27, 28]. Caldeira y Wood (2008) [26] han considerado los impactos de la reducción de la entrada de radiación solar de 1.84%.

Dicha reducción podría ser generada por el método de inyección de aerosoles de sulfato u otro método de gestión de radiación solar. Los resultados mostraron, bajo ciertos escenarios idealizados, cambios en las temperaturas y las precipitaciones. Por su parte, Robock et al. (2008) [18], usando un modelo de circulación general (GCM), encontraron que las inyecciones de SO<sub>2</sub> para mejorar aerosoles estratosféricos modificarían los monzones de verano de Asia y África, reducirían las precipitaciones y, de este modo, afectarían potencialmente el suministro de comida a miles de personas.

También, la cantidad de depósito de azufre puede ser motivo de preocupación ya que los aerosoles de sulfato pueden hidratarse para formar ácido sulfúrico (componente de la lluvia ácida), conduciendo a un aumento de la deposición ácida con consecuencias ampliamente estudiadas en los ecosistemas [29, 30, 31, 32; 33]. Teniendo en cuenta este efecto, Kravitz B. et al. (2009) [34], utilizaron un modelo climático de circulación general de la Tierra para cuantificar la cantidad de deposición de SO<sub>2</sub> que podría resultar del empleo de la inyección de aerosoles de sulfato. Consideraron que el total de sulfato se hidrata y se transforma en ácido sulfúrico, el escenario A1B [1] y dos cantidades de inyecciones diferentes. El análisis de sus estudios determinó que la deposición adicional de sulfato no produciría un impacto negativo en la mayoría de los ecosistemas. Sin embargo, los autores de este trabajo científico, señalan que aunque aquel modelo fuese factible, la geoingeniería con aerosoles podría “conducir a resultados locales diferentes debido a la variabilidad de agua” en las diversas zonas geográficas.

Las experiencias mencionadas en párrafos anteriores plantean algunos interrogantes de investigación: a) Inyectando aerosoles de sulfato estratosféricos ¿Qué balances ambientales se obtendrían teniendo en cuenta la variabilidad en el clima, en los recursos naturales, en distribución geográfica, en los accidentes geográficos, y en las zonas de implementación?; b) Los escenarios idealizados: ¿son los apropiados?; c) Los resultados a los que se condujeron ¿tuvieron en cuenta una amplia gama de procesos de retroalimentación? y d) Las herramientas utilizadas ¿son las adecuadas? e) Los parámetros empleados ¿son los apropiados?

Un resumen de los efectos en la tierra provocados por la inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera se presenta en la Tabla 1. Como se puede apreciar en la Tabla 1, es de esperar que la experimentación a gran escala, con inyección de aerosoles de sulfato produzca cambios en los parámetros climáticos como la temperatura global (deseado), pero traigan aparejados distintos cambios en las condiciones del planeta, con consecuencias que redundan directamente en cambios regionales. Es decir, podrían percibirse grados de acidificación en los océanos y suelos [35]; variaciones en las precipitaciones, en la disponibilidad de agua, la vegetación natural, en la provisión de alimentos, en la salud y en los ecosistemas en general, que pueden actuar en forma diferenciada dependiendo de la zona de implementación. En particular, esta técnica podría influir en la Región de Cuyo dada su alta vulnerabilidad. Consecuentemente, el nivel de aquellas influencias, modificaciones y sus impactos necesitan ser convenientemente estudiados. En conclusión, la revisión del estado del arte de inyección de aerosoles de sulfato en la estratósfera baja: 1- Señala la necesidad de realizar contribuciones bajo una perspectiva mesoescalar mediante un modelo de escala regional; 2- Vislumbra que quizás diferentes metodologías (distintos escenarios, modelos, etc.) generen resultados disímiles; 3- Sugiere algunos importantes efectos que podrían resultar de su uso, los cuales, contrarrestarían o reforzarían los relacionados con el propio cambio climático; 4- Existen antecedentes locales de modificación artificial del clima (por ejemplo, el caso de la lucha antigranizo en Mendoza); 5- Indica que constan historiales de inyecciones de sulfatos en

forma natural y eventual (erupciones volcánicas); 6- Muestra la importancia de estudiar la sensibilidad y vulnerabilidad de la zona en estudio; 7- Revela la escasez de estudios que evidencien cuales serían los balances de impactos positivos y negativos provocados por la inyección de sulfatos estratosféricos.

<i>Efectos</i>	<i>Mecanismos</i>
<b>Efecto deseado con la inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera</b>	
Enfriamiento global – disminución de la temperatura global [7, 9, 10, 11, 12,13]	Bloqueo de la radiación solar.
<b>Efectos secundarios derivados de la inyección de aerosoles de sulfato estratosféricos</b>	
Reducción de las precipitaciones [20]	Bloqueo de la radiación solar, reducción de la evaporación.
Veranos fríos.	Bloqueo de la radiación solar.
Calentamiento estratosférico.	Absorción estratosférica de la radiación solar y terrestre.
Inviernos cálidos.	Absorción estratosférica de radiación solar y terrestre, dinámica.
Reducción del ciclo diurno.	Bloqueo de radiación solar y emisión de radiación del infrarrojo.
Destrucción del ozono (depleción del ozono) [19]	Dilución, química heterogénea de los aerosoles.
Incremento del albedo planetario [7, 9, 10, 11, 12, 13]	La cantidad de energía reflejada por una superficie.
Aumento de la radiación Ultravioleta – B (UVB), con implicancias médicas y biológicas.	Destrucción del ozono.
Perturbación del ciclo del azufre en la estratosfera en forma significativa. No sería importante la interferencia en el intercambio de azufre de la troposfera-estratosfera.	Inyección de aerosoles de sulfato.
Influencia en los ecosistemas. Por ejemplo, influencia de la interacción parásito-planta, disminución de los suministros de alimentos, etc. [28]	Bloqueo de radiación solar, cambios de la proporción entre la energía difusa y directa de llegada, etc.
Disminución de la visibilidad, aumento de la formación de nubes y nieblas, etc.	Bloqueo de radiación solar, formación de condensación de núcleos nubosos (en inglés cloud condensation nuclei o CCNs) que influyen el tamaño de las gotas de las nubes, la persistencia o tiempo de vida de las mismas (efectos indirectos del aerosol) y, por lo tanto, la reflectividad de aquellas.
Deposición de sulfatos en los suelos [35] y los océanos.	Acidificación.
Aumento de las lluvias ácidas [29, 30, 31, 32, 33, 34]	Hidratación de los aerosoles de sulfato.

Tabla 1. Efectos en la tierra de la inyección de aerosoles de sulfato en la atmósfera. Datos adaptados de Robock, 2000 [26].

## 2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La bibliografía consultada, como se dijo más arriba, muestra que hasta el momento los estudios numéricos realizados para cuantificar las derivaciones la inyección de aerosoles de sulfato estratosféricos, han sido conducidos hacia un enfoque de escala global [28, 34] de este modo se ha dejando de lado los potenciales efectos en la mesoescala. Sin embargo, se cree importante realizar investigaciones de inyección de aerosoles de sulfato estratosféricos con un modelo de escala regional. Estas representarían los primeros intentos para poner a prueba

esta propuesta particular de geoingeniería bajo una visión local. En razón de lo descripto, se propone en la región cuyana (Argentina) modelar la inyección de los aerosoles de sulfato para la estratósfera baja para reducir la temperatura media global, elegir escenarios (regionales) para la siembra de los mismos, investigar el impacto de cada escenario regional y también la sensibilidad de la zona de interés. El sitio elegido para el estudio es la Región de Cuyo, debido a que esta podría resultar un zona susceptible de inyectársele aerosoles de sulfato estratosféricos dada su marcada tendencia positiva de temperatura en los últimos años, tanto en el piedemonte como en el sector montañoso. Además, la región posee glaciares cordilleranos, que son altamente vulnerables a los cambios de temperaturas y a la modificación de los patrones de nevadas [37]. Por ejemplo, esta inyección podría impactar en el delicado régimen de precipitaciones y escorrentías, a través de la modificación de la microfísica de nubes, cambio del albedo en los glaciares, etc. La disponibilidad de agua de riego impactaría en los oasis del Oeste por la intensidad y concentración de sus actividades agrícolas, tal como la vitivinicultura. Sin embargo, si bien se pueden mencionar efectos potenciales aislados, no queda claro aún, cual sería; de inyectarse sulfatos en estratosfera baja en la región, el balance de impactos positivos (esperados por la reducción de la temperatura) y negativos. En vista del estado del arte de los modelos de mesoescala, se ha optado por utilizar el WRF (Weather Research Forecasting). WRF es un sistema de predicción numérica que permite simular procesos tales como transferencia radiativa, intercambios de agua superficie-atmósfera, calor latente, momento, transporte turbulento en la capa límite planetaria y microfísica de las nubes, tanto a escala sinóptica como a escala regional, con una resolución vertical adecuada para la troposfera alta y estratosfera baja. Este modelo ha sido producto de la colaboración de diversas instituciones, entre ellas el National Center of Atmospheric Research (NCAR), el National Center for Environmental Prediction (NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, Oklahoma University y la Federal Aviation Administration (FAA). Actualmente, el grupo GEAA (Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales), está llevando a cabo la puesta en marcha de WRF para explorar la capacidad de modelar el transporte de aerosoles. Importante: No se descarta la posibilidad de emplear otros modelos del tipo WRF.

## 2.1. Hipótesis

La aplicación a gran escala de la técnica de geoingeniería basada en el método de inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera, si bien reduciría la temperatura media global; provocaría un impacto neto negativo en la región cuyana debido a la alta vulnerabilidad del ecosistema de dicha zona.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para alcanzar los objetivos de investigación puede resumirse en los siguientes puntos:

### 3.1. Evaluación de la situación actual del microclima cuyano: “Escenario sin geoingeniería”

En primer lugar, se realizará un estudio del escenario climático actual de la región cuyana tomando como fuente de datos las salidas del modelo numérico de predicción meteorológico

WRF. La simulación de dicho modelo permitiría avanzar en el conocimiento de los efectos de aerosoles sobre los procesos atmosféricos.

### **3.2. Evaluación y estudio de un caso eventual: “Escenario con inyección natural de aerosoles de sulfato”**

La segunda etapa, radicaré en buscar y evaluar algún evento natural de inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera baja, por ejemplo una erupción volcánica (El Chichón, Monte Pinatubo, u otro caso del que se tenga datos accesibles). Esto nos permitirá dimensionar el diseño artificial.

### **3.3. Diseño artificial.**

La cuarta etapa, consistirá en modelar la inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera baja. Esta etapa se centrará en estudiar la microfísica de aerosoles de sulfato. La caracterización de los aerosoles estratosféricos de sulfato implicará la especificación de la distribución espacio-temporal, composición química, especie o tipo de emisión de sulfato a inyectar, tamaño y morfología de las partículas, índice de refracción, concentración de los aerosoles, propiedades ópticas, vida útil y tiempos de residencia en la estratosfera, balance de energía, origen o fuente de los aerosoles, etc.

### **3.4. Selección de posibles casos de inyección artificial y simulación en WRF: “Escenarios con geoingeniería”**

Se basará en determinar diferentes escenarios regionales posibles para la inyección de aerosoles de sulfato en la estratosfera baja en Cuyo, de modo de poder evaluar luego los impactos ambientales. Los escenarios deberían incluir, entre otros parámetros altura, intensidad, frecuencia, distribución geográfica de las emisiones y costo energético de la inyección. Cada escenario será simulado en WRF.

### **3.5. Análisis de impacto ambiental para cada escenario (con geoingeniería) y la sensibilidad de la Región de Cuyo**

La evaluación de impacto ambiental para cada uno de los casos seleccionados anteriormente, permitirá identificar especialmente las regiones más vulnerables o susceptibles al cambio climático en la Región cuyana y a la utilización del método de geoingeniería por inyección de aerosoles de sulfato estratosféricos.

### **3.6. Verificación de datos**

Para monitorear la situación ambiental y el proceso de investigación en general, se compararán las salidas del modelo WRF con los datos extraídos de las fuentes satelitales disponibles. Esta información será complementada con la derivada de estaciones meteorológicas, y trabajos del GEAA-PEPACG. Los resultados se contrarrestarán con los procedidos de investigaciones recientes tales como Antuña et al, 1993 [21]; Crutzen, 2006 [7]; IPCC, 2007a [1]; Rasch et al, 2008 [13], entre otros. Además, se emplearán otros instrumentos de verificación de datos como indicadores físicos o biológicos. La comprobación de datos, será una constante en todo el estudio.

#### 4. INSTRUMENTOS. FUENTES Y MEDIOS DE VERIFICACIÓN DE DATOS

**Fuentes satelitales disponibles:** Se pueden mencionar, el OMI (Ozone Monitoring Instrument) que proporciona mediciones de componentes importantes de la calidad del aire incluyendo el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) derivado del instrumento AVHRR a bordo del satélite NOAA [38, 39, 40, 41].

**Datos extraídos de estudios realizados disponibles en la literatura reciente.**

**Mediciones de algún indicador a determinar** (indicador biológico, físico, etc.)

**Mediciones meteorológicas:** Duración de la insolación o brillo solar; Temperatura del aire, del agua y del suelo; Presión atmosférica; Humedad; Velocidad y dirección del viento; Cantidad de precipitaciones. La Provincia de Mendoza, cuenta con mediciones de precipitaciones a cargo de la Red de Contingencia Climática y el Instituto de Desarrollo Rural, de donde se podría extraer dicha información; Cantidad de evaporación. Los datos podrían ser obtenidos de estaciones meteorológicas; Radiación solar; Radiosondeos; Otras mediciones meteorológicas a tener en cuenta, si hubiesen datos disponibles, son la condensación de núcleos nubosos (Cloud condensation nuclei o CCNs), la altura de la base de las nubes troposféricas o estratosféricas, entre otras.

**Modelo climático de mesoescala WRF (Weather Research Forecasting).**

**Otras herramientas computacionales, a determinar en el proceso de investigación, etc.**

#### 5. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera que los resultados obtenidos a partir del desarrollo del presente trabajo de investigación contribuyan a mejorar la teoría de fondo de la modificación artificial del clima y de la geoingeniería. También, los conocimientos derivados permitirán potenciar experimentos a pequeña escala de inyección de aerosoles de sulfato y dar lugar así a actividades interdisciplinarias.

Por otra parte, sus alcances serían primordiales para incentivar el diseño y aplicación de políticas climáticas, ya que proporcionarían una fuente de datos para el desarrollo de estrategias ambientales regionales. Complementariamente este estudio puede contribuir a conocer la influencia de las emisiones usadas en la lucha antigranizo como una experiencia de modificación artificial de la microfísica de nubes.

#### REFERENCIAS

- [1] IPCC, "IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*" (2007).
- [2] Keith DW; "Geoengineering the climate: History and prospect", *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 25, pp. 245–284 (2000).
- [3] Marchetti C, "On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem", *Clim. Change*, Vol. 1, pp. 59–8, (1977).
- [4] Budyko MI, "*Climate and Life*", Academic Press, Vol. 508 (1974).
- [5] Budyko MI, "*Climatic Changes*", American Geophysical Union, Vol. 261 (1977).



- [6] Dickinson RE, “Climate engineering: A review of aerosol approaches to changing the global energy balance”, *Climatic Change*, Vol. 33, pp. 279-290 (1996).
- [7] Crutzen PJ, “Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma?”, *Climatic Change*, Vol. 77, pp. 211–220 (2006).
- [8] Cattani E, Costa MJ., Torricella F., Levizzani V. y Silva AM, “Influence of aerosol particles from biomass burning on cloud microphysical properties and radiative forcing”, *Atmospheric Research*, Vol. 82, pp. 310 – 327 (2006).
- [9] Govindasamy B y Caldeira K, “Geoengineering Earth’s Radiation Balance to Mitigate CO<sub>2</sub>-Induced Climate Change”, *Geophysical Research*, Vol. 27, 2,141–144 (2000).
- [10] Govindasamy BG, Thompson S, Duffy P, Caldeira K y Delire C. “Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere”, *Geophysical Research*, Vol. 29, p. 2061 (2002).
- [11] Govindasamy B, Caldeira K y Duffy PB, “Geoengineering Earth’s radiation balance to mitigate climate change from a quadrupling of CO<sub>2</sub>”, *Global Planetary Change*, Vol. 37, pp. 157–168 (2003).
- [12] Wigley TML, “A combined mitigation /geoengineering approach to climate stabilization Science”, p. 314, pp. 452–454 (2006).
- [13] Rasch PJ, Tilmes S, Turco RP, Robock A, Oman L, Chen CC, Stenchikov L y Garcia RR, “An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 366, pp. 4007–4037 (2008).
- [14] Groisman PY, “Possible regional climate consequences of the Pinatubo eruption: an empirical approach”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, pp. 1603–1606 (1992).
- [15] Robock A y Mao J, Winter warming from large volcanic eruptions. *Geophysical Research Letter*, Vol. 19, pp. 2405–2408 (1992).
- [16] Robock A y Mao J. “The volcanic signal in surface temperature observations”, *Journal of Climate*, Vol. 8, pp. 1086–1103 (1995).
- [17] Graf HF, Kirchner I, Robock A y Schult I, “Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observations”, *Climate Dynamics*, Vol. 9, pp. 81–93 (1993).
- [18] Kirchner I, Stenchikov GL, Graf HF, Robock A y Antuña JC, “Climate model simulation of winter warming, summer cooling following the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 19039–19055 (1999).
- [19] Harris NRP, Ancellet G, Bishop L, Hofmann DJ, Kerr JB, McPeters RD, Prendez M, Randel W, Staehelin J, Subbaraya BH, Volz-Thomas A, Zawodny J y Zerefos CS, “Trends in Stratospheric and Tropospheric Ozone”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 1571–1590 (1997).
- [20] Trenberth KE y Dai A, “Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34 (2007).
- [21] Antuña JC, Pérez I y Marín D, “Efecto de los aerosoles estratosféricos de la erupción de El Chichón sobre la temperatura en superficie para el PMC”. *Atmósfera*, Vol. 7, pp. 241-247. (1994).
- [22] Joshi MM y Shine KP, “A GCM study of volcanic eruptions as a cause of increased stratospheric water vapour”, *Journal of Climate*, Vol. 16, pp. 3525–3534 (2003).
- [23] Tilmes S, Müller R y Salawitch R, “The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes”, *Science*, Vol. 320, pp. 1201–1204 (2008).
- [24] Baldwin M, Hirooka T, O'Neill A, Yoden S, Charlton AJ, Hio Y, Lahoz WA y Mori A. “Major Stratospheric Warming in the Southern Hemisphere in 2002: dynamical Aspects of the Ozone Hole Split”. SPARC Newsletter Vol. 20, pp. 24–26, (2003).
- [25] Shaw TA y Shepherd TG, “Raising the roof”, *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 12–13 (2008).
- [26] Caldeira K y Wood L, “Global and Arctic climate engineering: numerical model studies”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 366, pp. 4039–4056 (2008).
- [27] Rasch PJ, Crutzen PJ y Coleman DB, “Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size”, *Geophysical Research Letters*, Vol.35

- (2008).
- [28] Robock A, Oman L y Stenchikov GL. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO<sub>2</sub> injections. *Journal of Geophysical Research* 113 (2008).
- [29] Leivestad H y Muniz IP. “Fish kill at low pH in a Norwegian river”, *Nature*, Vol. 259, pp. 391-392 (1976).
- [30] Wood T y Bormann FH. “Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist”, *Ambio*, Vol. 4, pp. 169-171 (1975).
- [31] Shriner, DS. “Effects of simulated rain acidified with sulfuric acid on host-parasite interactions”. *Water, Air, y Soil Pollution*. Vol. 8, pp. 9-14 (1977).
- [32] Rao SS, y Dutka BJ. “Influence of acid precipitation on bacterial populations in lakes”, *Hydrobiologia*, Vol. 98, pp. 153-157 (1983).
- [33] Graveland J. “Effects of acid rain on bird populations”. *Environ. Rev*, Vol. 6, pp. 41-54. (1998).
- [34] Kravitz B, Robock A, Oman L., Stenchikov G. y Marquardt AB. “Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols”. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 114 (2009).
- [35] Civit B, Arena AP y Puliafito SP. “Factores de acidificación de para la región árida centro oeste Argentina”. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería, Mendoza. (2005).
- [36] Robock A, “Volcanics Eruptions and Climate”, *Reviews of Geophysics*, Vol. 38, pp. 191-219 (2000).
- [37] Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina: Informe sobre “El Cambio Climático en Argentina”, (2009).
- [38] Ackerman SA, Schreiner AJ, Schmit TJ, Woolf H, Jun Li y Pavolonis M, “Using the GOES Sounder to monitor upper level SO<sub>2</sub> from volcanic eruptions”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113 (2008).
- [39] Kristiansen NI, Stohl A, Prata AJ, Richter A, Eckhardt S, Seibert P, Hoffmann A, Ritter C, Bitar L, Duck TJ y Stebel K, “Remote sensing and inverse transport modeling of the Kasatochi eruption sulfur dioxide cloud”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115 (2010).
- [40] Randall VM, “Review: Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*”, Elsevier, Vol. 42, pp. 7823–7843 (2008).
- [41] Schneider DJ, Rose WI, Coke LR y Bluth Gregg JS, “Early evolution of a stratospheric volcanic eruption clouds observed with TOMS and AVHRR”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, pp. 4037-4050 (1999).