**Universidad del Cauca**

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Programas de Maestría y Doctorado en Ingeniería Telemática**

**Seminario de Investigación**

**Detección Automática de Condiciones Agroclimáticas para Siembra de Cultivos en Zonas Tropicales y Subtropicales mediante Métodos de Ensamble**

**Iván Darío López Gómez**

Estudiante de Doctorado

23 de septiembre de 2016

1. **Introducción**

Un sistema climático es un conjunto de interacciones complejas entre la atmósfera, la superficie terrestre, el hielo y la nieve, los océanos y otros cuerpos de agua, y los seres vivos. Del conjunto de componentes del sistema climático, el atmosférico define las características del clima, pues las precipitaciones, la temperatura y los vientos son los factores que determinan las condiciones climáticas de un lugar. En este sentido el concepto de Variabilidad Climática ha cobrado una gran importancia a través de los años prácticamente en todos los sectores de la sociedad; la literatura en torno a este tema propone un gran número de definiciones formuladas a partir de diferentes puntos de vista. Una de las definiciones más adoptadas por la comunidad científica a nivel mundial, establece que la variabilidad climática es la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional [1], [2]. Dichos cambios están sujetos a diversas escalas de tiempo y actúan sobre todos los parámetros o variables meteorológicas: temperatura, presión atmosférica, precipitación, entre otras. Por otro lado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [3] usa este término para referirse solo al cambio atribuido directa o indirectamente a la actividad humana[[1]](#footnote-1), el cual altera la composición de la atmósfera mundial causando la variabilidad natural del clima durante períodos comparables.

La seguridad alimentaria, la agricultura y el cambio climático tienen interacciones complejas y dinámicas. Si bien la agricultura es vital para el logro de la seguridad alimentaria, los cambios de las condiciones climáticas pueden afectar gravemente la seguridad alimentaria de millones de personas que dependen de la agricultura. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, mundialmente conocida como FAO[[2]](#footnote-2) [4], la adaptación de los sistemas alimentarios a la variabilidad climática se convierte en un factor fundamental para fomentar la seguridad alimentaria, la mitigación de la pobreza y la gestión sostenible y conservación de los recursos naturales. En contraste con lo anterior, el impacto que produce una variación del clima es mayor en los países ubicados en las regiones tropicales y subtropicales, donde se encuentran las mayores situaciones problemáticas de pobreza y hambre; de esta manera la agricultura es uno de los sectores socioeconómicos que se ven mayormente afectados en este proceso [5].

1. **Planteamiento del Problema**

Dada la variedad de suelos y pisos térmicos que presenta Colombia, la más mínima variación del clima produce una alta vulnerabilidad alrededor de la producción en los cultivos, de los cuales depende el sustento de una gran parte de la población. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el país se ha visto afectado gravemente debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos especialmente durante las fases del Fenómeno El Niño y La Niña. Dentro de la agenda colombiana de adaptación al cambio climático se evaluó el riesgo agroclimático por sectores, el objetivo fue determinar los efectos de la variabilidad climática en la producción y rendimientos de cultivos agrícolas seleccionados, mediante la utilización de modelos agroclimáticos. Los resultados de este estudio mostraron que, en términos generales, los rendimientos de muchos cultivos, están expuestos a disminuir significativamente debido a las altas temperaturas, como consecuencia del estrés térmico e hídrico, del acortamiento de la estación de crecimiento y de la mayor presencia de plagas y enfermedades. El sector agrícola representa aproximadamente el 40% de las exportaciones en Colombia, en donde cerca del 21% de la población depende directamente de la agricultura como fuente de empleo. Por otro lado se espera que a 2050 se incremente la temperatura en 2.5°C y que las precipitaciones aumenten en un 2.5%; en consecuencia en más del 60% de las áreas actualmente cultivadas se verá un impacto de aproximadamente el 80% de los cultivos [6].

Teniendo en cuenta el contexto que motiva la presente propuesta de doctorado, cabe destacar que los avances y el desarrollo de la tecnología han establecido hitos relevantes para enfrentar la problemática anteriormente expuesta; y es precisamente desde el campo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) que se han propuesto estrategias para guiar la toma de decisiones en torno al estudio del impacto potencial del cambio climático en la producción agrícola. Principalmente los enfoques revisados están orientados hacia modelos de simulación para varios cultivos como: arroz, algodón, maíz, trigo, entre otros, cuyo objetivo es estudiar los cambios en el rendimiento del cultivo, las necesidades de riego, y otras respuestas a la variabilidad climática global; además de esto se han propuesto sistemas de soporte a la toma de decisiones y sistemas para el análisis de riesgos de temporada con el fin de estudiar el impacto potencial del cambio climático en la producción agrícola [7]. En el mismo sentido, la FAO ha propuesto una amplia gama de sistemas de datos como: una metodología de optimización de la adaptación dinámica de las explotaciones agrícolas (FADO); sistemas de alerta a mediano plazo para la seguridad alimentaria; un instrumento de previsión climática local (New LocClim); una herramienta para pronosticar el rendimiento de los cultivos (CMBox); entre otros.

A pesar de los aportes que ofrecen los enfoques mencionados anteriormente, aún existen factores que hacen que estos esfuerzos tengan un éxito limitado, esto debido al alto nivel de incertidumbre que arroja el problema en cuestión y a la naturaleza dinámica de las condiciones climáticas de un territorio específico. Con base en lo anterior, una rama de la Inteligencia Artificial (IA) como lo es el Aprendizaje Automático o Machine Learning [8] ofrece una importante alternativa al establecer diferentes algoritmos de aprendizaje supervisado, los cuales describen normalmente la tarea de buscar a través de un espacio de hipótesis para encontrar la más adecuada ofreciendo buenas predicciones con un problema en particular. En general, esta tarea es muy complicada y, ni siquiera teniendo la certeza de que en el espacio completo existe una buena solución, se puede estar seguro de encontrarla. En el campo del aprendizaje automático, los métodos combinados (métodos de ensamble) utilizan múltiples algoritmos de aprendizaje para obtener un rendimiento predictivo que mejore el que podría obtenerse por medio de cualquiera de los algoritmos de aprendizaje individuales que lo constituyen. La presente propuesta de investigación, pretende abordar la problemática de la adaptabilidad de cultivos a la variabilidad climática en zonas tropicales y subtropicales mediante la aplicación de métodos de ensamble. Al combinar esta ventaja con las fortalezas de otros algoritmos de aprendizaje, se aprovecha los puntos fuertes de los componentes del sistema híbrido, y se eliminan en gran medida las debilidades de los componentes individuales.

Finalmente, una vez descrito el contexto y la situación problemática que pretende abordar el presente proyecto de doctorado, se formula la pregunta de investigación: ¿Cómo detectar posibles condiciones agroclimáticas apropiadas para la siembra de cultivos teniendo en cuenta la variabilidad climática en zonas tropicales y subtropicales mediante la aplicación de las TIC?

1. **Conceptos Relevantes**

En esta sección se presentan algunos conceptos relevantes que se han tenido en cuenta para la formulación y desarrollo del presente trabajo. Dentro de estos conceptos están: Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones (DSS por sus siglas en inglés – Decision Support System), Aprendizaje Automático (ML por sus siglas en inglés – Machine Learning), Sistemas de Múltiples Clasificadores (MCS por sus siglas en inglés – Multiple Classifier Systems) y Agricultura Climáticamente Inteligente (CSA por sus siglas en inglés - Climate Smart Agriculture).

* 1. **Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones (DSS)**

sistema informático utilizado para servir de apoyo, más que automatizar, el proceso de toma de decisiones en el cual sus roles principales son realizar predicciones, exhibir capacidad de análisis y modelado, y finalmente soportar decisiones estructuradas y semi-estructuradas. Existen diferentes tipos de DSS orientados hacia: datos, conocimiento, documentos, comunicación, y de modelos; el relator aclara que para su propuesta se centrará en los dos primeros tipos [9].

* 1. **Aprendizaje Automático (ML)**

Explora el estudio y construcción de algoritmos que pueden aprender y hacer predicciones sobre diferentes conjuntos de datos; además da a las computadoras la capacidad de aprender sin ser programadas de forma explícita [10], [11].

* 1. **Sistemas de Múltiples Clasificadores (MCS)**

Combinación de algoritmos de aprendizaje que construyen diferentes clasificadores para etiquetar nuevas instancias dentro de uno o más conjuntos de datos [12]. En este sentido, dentro de ML existen nuevas técnicas que permiten incrementar la precisión de los clasificadores individuales mediante la combinación de varios de estos. Estas técnicas se conocen en la literatura científica como Sistemas de Múltiples Clasificadores (MCS), Métodos de Ensamble, Ensamble de Clasificadores, o Métodos Combinados de Aprendizaje; los cuales hacen parte de los Sistemas Inteligentes Híbridos (HIS). Existen diferentes formas de combinar clasificadores, sin embargo, las más utilizadas son: Boosting, Bagging y Random Forest; por otro lado, existen estrategias para combinar las salidas de cada clasificador como: Average, Voting, Stacking, Grading, Arbiter Trees,Combiner Trees, entre otras.

* 1. **Agricultura Climáticamente Inteligente (CSA)**

La CSA hace referencia a diferentes acciones para reorientar a los sistemas agrícolas que garanticen la seguridad alimentaria en un ambiente cambiante. Aquí, la adaptabilidad de cultivos juega un rol muy importante, ya que permite realizar ajustes al manejo de cultivos como respuesta a estímulos climáticos [13].

La CSA se compone de tres aspectos clave: 1) Fortalecer la resiliencia al cambio climático y la variabilidad. 2) Reducir la contribución de la agricultura al cambio climático (menos emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y más almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas). 3) Incrementar de forma sostenible la productividad e ingresos agrícolas. Finalmente existen elementos que interactúan entre sí para fortalecer la implementación de la CSA; tales elementos son: las políticas, los marcos de inversión, las estrategias, y las tecnologías.

Dentro de la CSA deben considerarse además los Escenarios de Cambio Climático, los cuales ofrecen una representación del clima que se observaría en la atmósfera en las diferentes épocas futuras. El Panel Internacional de Expertos en Cambio Climático (IPCC) plantea 4 escenarios probables (A1, A2, B1, y B2) en los cuales el comportamiento de diferentes elementos como la economía, la población, la tecnología, entre otros; varía de acuerdo a diferentes patrones que propician la aparición de tendencias influyentes en las condiciones de clima futuro. El relator enfatiza en que para su propuesta se deben tener en cuenta estos escenarios climáticos para que a partir de estos se puedan generar Escenarios Agroclimáticos.

Finalmente, el relator presenta las principales características del proyecto AVA, el cual se convierte en uno de los principales insumos de su propuesta, al contar con datos de adaptabilidad de cultivos en la zona de la cuenca alta del río Cauca, los cuales están divididos en varias dimensiones como: económica, productiva, biofísica, social, institucional, y ambiental.

1. **Brechas Encontradas**

Las repercusiones de la variabilidad climática actualmente afectan a una gran mayoría de países; esto es observable en una pluviometría irregular e impredecible, un aumento de la incidencia de tormentas y sequías prolongadas. Lo anterior también favorece la aparición de plagas y enfermedades que afectan a cultivos y animales. De esta manera la acelerada variación en el clima amenaza con disminuir el progreso en la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), en especial los relacionados con el hambre, la reducción de la pobreza y la sostenibilidad ambiental.

La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios sea mediante el uso de modelos computacionales que permitan analizar de forma sistemática los efectos del cambio climático sobre los cultivos de productos agrícolas [14]. En este sentido los sistemas de producción de cultivos actuales tendrán que adaptarse para satisfacer las necesidades cambiantes. Esta adaptación puede ser planificada mediante la toma de decisiones a nivel gubernamental; o autónoma a nivel del agricultor por medio de cambios principalmente en las prácticas agrícolas, los cuales pueden obedecer a procesos de ensayo y error, experiencia del agricultor o a causa de la adaptación planificada [15]. Como resultado de los anteriores factores se pueden resaltar cuatro áreas que pueden ser abordadas por proyectos de investigación: a) introducción de nuevos cultivos y eliminación de cultivos previos, b) desarrollo de nuevas variedades de los cultivos, c) evolución de las prácticas de manejo de los cultivos, y d) confrontación del cambio climático mediante la entrega de información más apropiada para el agricultor [16]. Los estudios encontrados se enfocan sólo en presentar estimaciones de producción (con base en históricos) o de la capacidad de adaptación de un cultivo (escenarios futuros de cambio climático) sin añadir otra información de valor que puede ser relevante para la toma de decisiones; por otra parte, no se realiza un análisis de los datos teniendo en cuenta diferentes dimensiones (económica, política, social, entre otras) y no considera la integración de fuentes de datos heterogéneas en la construcción de los conjuntos de datos de entrada.

1. **Objetivos**

* **Objetivo General.** Proponer un método de detección automática de escenarios agroclimáticos futuros, para determinar condiciones propicias en la siembra de diferentes cultivos en zonas tropicales y subtropicales.
* **Objetivos Específicos.**
  + Estructurar uno o más conjuntos de datos fusionando información de diferentes dimensiones para caracterizar escenarios agroclimáticos futuros.
  + Construir un MCS que permita detectar condiciones agroclimáticas apropiadas para la siembra de cultivos.
  + Evaluar experimentalmente el método propuesto por medio de un prototipo que utilice datos de diferentes zonas y cultivos pertenecientes a zonas tropicales y subtropicales del territorio colombiano.

1. **Avances**

En la presente propuesta se han obtenido los siguientes avances:

* Construcción del estado del arte: 85%
* Desarrollo de anteproyecto: 20%
* Búsqueda de conjuntos de datos: 35%
* Desarrollo de dos artículos científicos: 10%

Dado lo anterior, el mapeo sistemático de la literatura ha permitido detectar las brechas que fueron mencionadas en el numeral anterior. En el mismo sentido, a continuación, se presentan las temáticas más relevantes identificadas dentro de los trabajos consultados.

* 1. **Estado Actual del Conocimiento**

Varios autores han abordado la temática planteada en esta propuesta de investigación desde el enfoque de las ciencias de la computación; trabajos como [17] y [18], utilizan RNA para estimar variables climáticas en determinado clima; a su vez en [19], se identifican climas análogos que permitan establecer futuras condiciones en la zona de estudio. Por otra parte [20] y [21] se enfocan en identificar el porcentaje de agricultura urbana en determinada zona y cómo pueden influir los microclimas en estas condiciones.

El estudio referenciado en [22], utiliza modelos de simulación para establecer recomendaciones sobre adaptación de prácticas de manejo de cultivo; en el mismo sentido en [23] se realiza un análisis de vulnerabilidad y oportunidades de adaptación teniendo en cuenta la biodiversidad específica de un cultivo, es decir, la variabilidad genética que existe entre los individuos de una misma especie, en este caso el maíz. En dicho estudio se asocian escenarios futuros de clima (2021-2050) con modelos de simulación de flujo de agua en suelo, planta y atmósfera tomando en cuenta diferentes opciones para el calendario de riego. Por otra parte [24] utiliza información de escenarios futuros de clima con el fin de predecir la composición del vino en las posibles condiciones futuras, así como para ayudar a entender la capacidad de adaptación de nuevas variedades de uva, nuevas regiones vitícolas o prácticas enológicas. Los cítricos también son un cultivo de estudio, [25] propone analizar su adaptabilidad en zonas subtropicales de China utilizando una base de datos meteorológicos diarios de 1961 a 2008 pertenecientes a 273 estaciones de monitoreo, en combinación con datos de temperatura y precipitación simulados bajo el escenario de cambio climático SRES A2. A su vez [26] utiliza datos climáticos diarios de 1971 a 2000 correspondientes a 10 sitios especializados en la producción de trigo en Pakistán los cuales fueron categorizados en 4 zonas climáticas y en cada una de estas se modelaron variaciones de temperatura y concentración de dióxido de carbono bajo diferentes condiciones futuras de clima. De la misma forma [27] busca establecer por medio de una simulación, la capacidad de adaptación de diferentes variedades de arroz en la India aplicando diferentes configuraciones en la variabilidad de temperatura, CO2 y lluvias; para ello utilizan datos del periodo comprendido entre 1974 y 2000. Finalmente [28] hace referencia a la implementación de un simulador agroecológico de zonas (agro-ecological zones simulator, AZS), que es una plataforma para compartir datos y modelos entre científicos y responsables de políticas, lo que facilita el análisis de los impactos del cambio climático y la identificación de posibles estrategias de respuestas a través de análisis que comprenden diversos elementos: datos geo-referenciados de clima, suelo y terreno; evaluación de la idoneidad de cultivos y productividad del suelo; procedimientos para calcular el rendimiento potencial agronómicamente alcanzable, entre otros.

Dado lo anterior, esta propuesta plantea ofrecer una herramienta que con base en las condiciones climáticas en las que tradicionalmente se cultiva un producto agrícola, además de otra información socioeconómica, de suelos, calidad de agua, entre otros, pueda determinar en qué zonas es recomendable cultivar dicho producto; o si en la misma zona en la que se encuentra el agricultor es recomendable el cultivo de otro producto. Un ejemplo de lo anterior se refleja en la siembra de papaya en la meseta de Popayán, en años anteriores el cultivo de este producto no se consideraba viable por las condiciones agroclimáticas de la zona, sin embargo, actualmente ya se comienzan a ver cultivos de este tipo aprovechando las nuevas condiciones que se establecen a partir de la variabilidad climática.

1. **Referencias**

[1] T. J. Crowley y G. R. North, «Abrupt climate change and extinction events in Earth history», *Science*, vol. 240, n.o 4855, pp. 996-1002, may 1988.

[2] N. Oreskes, «Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change», *Science*, vol. 306, n.o 5702, p. 1686, dic. 2004.

[3] ONU, «Framework Convention on Climate Change», *Framework Convention on Climate Change*, 2014. .

[4] FAO, «Adaptación de la agricultura al cambio climático». 2002.

[5] S. Solomon, *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, 2007.

[6] C. Lau, A. Jarvis, y J. Ramírez, «Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) - Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático», Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1, 2013.

[7] J. W. Jones *et al.*, «The DSSAT cropping system model», *Eur. J. Agron.*, vol. 18, n.o 3, pp. 235-265, ene. 2003.

[8] A. P. Engelbrecht, *Computational Intelligence: An Introduction*. Wiley, 2007.

[9] P. G. W. Keen, «Decision support systems : a research perspective», Cambridge, Mass. : Center for Information Systems Research, Afred P. Sloan School of Management, Working Paper, 1980.

[10] R. S. Michalski, J. G. Carbonell, y T. M. Mitchell, *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*. Springer Science & Business Media, 2013.

[11] K. P. Murphy, *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT Press, 2012.

[12] Z.-H. Zhou, *Ensemble Methods: Foundations and Algorithms*. CRC Press, 2012.

[13] L. Palombi, R. Sessa, L. Palombi, y R. Sessa, *Climate-smart agriculture: sourcebook.* Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

[14] D. A. Stainforth *et al.*, «Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases», *Nature*, vol. 433, n.o 7024, pp. 403-406, ene. 2005.

[15] W. E. Easterling *et al.*, «Food, fibre and forest products», en *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. E. Hanson, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, pp. 273-313.

[16] R. B. Matthews, M. Rivington, S. Muhammed, A. C. Newton, y P. D. Hallett, «Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling», *Glob. Food Secur.*, vol. 2, n.o 1, pp. 24-28, mar. 2013.

[17] V. Moosavi, A. Talebi, M. H. Mokhtari, S. R. F. Shamsi, y Y. Niazi, «A wavelet-artificial intelligence fusion approach (WAIFA) for blending Landsat and MODIS surface temperature», *Remote Sens. Environ.*, vol. 169, pp. 243-254, nov. 2015.

[18] R. P. Rötter, T. R. Carter, J. E. Olesen, y J. R. Porter, «Crop-climate models need an overhaul», *Nat. Clim. Change*, vol. 1, n.o 4, pp. 175-177, jul. 2011.

[19] D. B. L. Marshall B. Burke, «Shifts in African crop climates by 2050, and the implications for crop improvement and genetic resources conservation», *Glob. Environ. Change*, vol. 19, n.o 3, pp. 317-325, 2009.

[20] M. Armar-Klemesu, «Urban agriculture and food security, nutrition and health».

[21] H. De Zeeuw, R. Van Veenhuizen, y M. Dubbeling, «The role of urban agriculture in building resilient cities in developing countries», *J. Agric. Sci.*, vol. 149, n.o Supplement S1, pp. 153–163, feb. 2011.

[22] P. B. P K Aggarwal, «Food, fibre and forest products», *Current*, pp. 273--313, 2007.

[23] E. Monaco, A. Bonfante, S. M. Alfieri, A. Basile, M. Menenti, y F. De Lorenzi, «Climate change, effective water use for irrigation and adaptability of maize: A case study in southern Italy», *Biosyst. Eng.*, vol. 128, pp. 82-99, dic. 2014.

[24] D. Cozzolino, W. U. Cynkar, R. G. Dambergs, M. Gishen, y P. Smith, «Grape (Vitis vinifera) compositional data spanning ten successive vintages in the context of abiotic growing parameters», *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 139, n.o 4, pp. 565-570, dic. 2010.

[25] Y.-D. Du, H.-L. Duan, y L.-S. Tang, «Adaptability of citrus in subtropics of China under future climatic scenario», *Chin. J. Ecol.*, vol. 29, n.o 5, pp. 833-839, ene. 2010.

[26] H. Sultana, N. Ali, M. M. Iqbal, y A. M. Khan, «Vulnerability and adaptability of wheat production in different climatic zones of Pakistan under climate change scenarios», *Clim. Change*, vol. 94, n.o 1-2, pp. 123-142, feb. 2009.

[27] D. K. Swain y A. Yadav, «Simulating the Impact of Climate Change on Rice Yield Using CERES-Rice Model.», *J. Environ. Inform.*, vol. 13, ene. 2009.

[28] R. Confalonieri, S. Bregaglio, M. Donatelli, F. Tubiello, y E. Fernandes, «Agroecological Zones Simulator (AZS): A Component-based, Open-access, Transparent Platform for Climate Change – Crop Productivity Impact Assessment in Latin America», presentado en Proceedings of the Sixth Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, 2012.

1. En algunos casos, para referirse al cambio de origen humano se usa también la expresión “cambio climático antropogénico”. [↑](#footnote-ref-1)
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [↑](#footnote-ref-2)