



## TITULO DE LA TESIS

DELIMITACIÓN DE MICRO REGIONES CON MAYOR POTENCIAL PARA PRODUCIR CAFÉ DE ALTA CALIDAD Y PERFILES DE TAZA DIFERENCIADOS, BAJO EL RETO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ

TESIS QUE PRESENTA **L.C.A. LORENA PIEDRA CASTILLO**  
PARA OBTENER EL GRADO DE **MAESTRA EN CIENCIAS**

Xalapa, Veracruz, México. Febrero 2019



### Aprobación final del documento de tesis de grado:

Delimitación de micro regiones con mayor potencial para producir café de alta calidad y perfiles de taza diferenciados, bajo el reto del cambio climático, en el centro del estado de Veracruz.

	Nombre	Firma
Director	Robert H. Manson	
Comité Tutorial	Andrés Lira Noriega	
	Mario Roberto Fernández Alduenda	Voto aprobatorio otorgado por: Dr. Mario Roberto Fernández Alduenda al trabajo de tesis titulado: DELIMITACIÓN DE MICRO REGIONES CON MAYOR POTENCIAL PARA PRODUCIR CAFÉ DE ALTA CALIDAD Y PERFILES DE TAZA DIFERENCIADOS, BAJO EL RETO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ. Nombre del estudiante: Lorena Piedra Castillo. Sello digital del voto aprobatorio: <<Üvá0oZlk5ÜQ:t,h28GVOA;].í¿IewBXaHxnyT Wjüb9NüBJñ2YyHjdB2Yl2síHRRüYA6N7u7Z+I7aGYA6Yu7IK.YK6:7.G6P YI.GYu+q.KYy.Z6G17+NYY+K+YyK.AOI7KYI+FgYA6Y+NZ+YI+N7A+AY qYy6KF7N6PYA6YZ+Ú+YA7F6K6G17+A.PéY4+Ó.Y6NYK6Z.YA6NYI+u4 7.YIN7uhZ7I.éY6GY6NYI6GZK.YA6NY6PZ+A.YA6Y,6K+IKOUYAB- Yu2BHüYKüUJBüYFJBÑ[ÑdQY+RdcJñd2YYYYZcJYFJUY )Yt;óotóoTY ÜtTójud+ÑÉÁcpmC[q4(Y?s1MíóúPñDrf-gFNIéeRK7LUSzI>> Fecha y hora de emisión del voto: Tue Feb 26 18:41:49 2019. Usted puede verificar la validez del sello digital en <a href="https://firmaelectronica-posgradoinecol.shinyapps.io/VERI/">https://firmaelectronica-posgradoinecol.shinyapps.io/VERI/</a>



### Aprobación final del documento de tesis de grado:

Delimitación de micro regiones con mayor potencial para producir café de alta calidad y perfiles de taza diferenciados, bajo el reto del cambio climático, en el centro del estado de Veracruz.

	Nombre	Firma
	Gerardo Hernández Martínez	
Jurado	Vinicio de Jesús Sosa Fernández	
	Maite Lascurain Rangel	
	Esteban Escamilla Prado	

Voto aprobatorio otorgado por: Dr. Esteban Escamilla Prado al trabajo de tesis titulado: DELIMITACIÓN DE MICRO REGIONES CON MAYOR POTENCIAL PARA PRODUCIR CAFÉ DE ALTA CALIDAD Y PERFILES DE TAZA DIFERENCIADOS, BAJO EL RETO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ. Nombre del estudiante: Lorena Piedra Castillo. Sello digital del voto aprobatorio: << b>>6D[á]1qpTed 7ñZhrWYw,ymlú5Üñ- UHís?ÜÑEvBxgQ,óvxébmóí,xéOxñCm88QéÜWgÓuÓúcOÓB3éÜWéuÓ ODNéDWdÓN3WkéON3éuc+NDébNúW3OÓcgébcDcébDNÜ1OÓDé OcaPéÜWécgcéOcgÓÜcÜé+ébWDaÓgWkéÜWéú;céÜÓaWDW3OÓ cÜNKjéUcfNéWgéDWúNéÜWgéOcuUÓNéOgÓufúÓONjéW3éWgéO W3úDNéÜWgéWkúcÜNéÜWéEWdcOD1;éÜ,léWñCó)xvéWñnx9m88xé b,xlQéúlóéaó)éw[éwh(ee(h[éweíKFPAG0ÁL3jfS.icgé(+kXMn2aóQ;ÓtRV J)Kuž9z8OCéoí>> Fecha y hora de emisión del voto: Tue Feb 26 23:00:36 2019. Usted puede verificar la validez del sello digital en <https://firmaelectronica-posgradoinecol.shinyapps.io/VERI/>



### Aprobación final del documento de tesis de grado:

Delimitación de micro regiones con mayor potencial para producir café de alta calidad y perfiles de taza diferenciados, bajo el reto del cambio climático, en el centro del estado de Veracruz.

	Nombre	Firma
Jurado	Victorino Morales Ramos	Voto aprobatorio otorgado por: Dr. Victorino Morales Ramos al trabajo de tesis titulado: DELIMITACIÓN DE MICRO REGIONES CON MAYOR POTENCIAL PARA PRODUCIR CAFÉ DE ALTA CALIDAD Y PERFILES DE TAZA DIFERENCIADOS, BAJO EL RETO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ. Nombre del estudiante: Lorena Piedra Castillo. Sello digital del voto aprobatorio: <<FW?bÑYÜ6sf;üéPw2[VDG,Ekha]OpqXO(7)ZñvMdt fcóNrwbM-WiRbYw-WC-IXRJrW:+NgZgyaCg4AW:+WZgCz8Wz+.g8A+kWC8AWZau8zWl8y+A CgaNWiazaWíz8:LCgzWCa)oW:+WaNyaWCaN: a:WüWí+zjgN+kW:+ Wya0aW:g)+zz+ACga:8k.Wuah8W+NWz+y8W:+NWCaZug8WCNgZSy gC8.W+AW+NWC+Ayz8W:+NW+kya:8W:+W;+zaCzL0W:wOW;RUXrw RMrWZrw-JbIWz-qriWyjbW)b[WáÓWslGfDGs2WáDsKAeQ+53I4uS8z_Éjmo1-BgrHTRNKC0yx:Úí9UnL_úaí>> Fecha y hora de emisión del voto: Tue Feb 26 18:30:17 2019. Usted puede verificar la validez del sello digital en <a href="https://firmaelectronica-posgradoinecol.shinyapps.io/VERI/">https://firmaelectronica-posgradoinecol.shinyapps.io/VERI/</a>

## **RECONOCIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo mediante la beca.

Al Dr. Robert Manson por ser mi director de tesis, y con ello ofrecerme su tiempo, espacio y las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este trabajo.

A mi comité tutorial, integrado por el Dr. Andrés Lira, el Dr. Mario Fernández y el Dr. Gerardo Hernández por sus consejos y dedicación durante la realización y revisión durante el proceso de mi trabajo.

A los miembros del jurado Dr. Vinicio Sosa, Dra. Maite Lascurain, Dr. Esteban Escamilla y Dr. Victorino Ramos por sus observaciones, valiosos comentarios y su gran apoyo para poder cumplir con esta meta.

A todo el personal de CAFECOL, Fany, Elvia, David, Jorge por su valioso apoyo, tiempo y espacio brindados durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Roger Guevara por su tiempo y apoyo con R y parte de la estadística necesaria para este trabajo.

Al Instituto de Ecología A.C. y a todos los que le dan vida, por brindar todo lo necesario para llevar a cabo mi maestría de forma satisfactoria.

## **DEDICATORIA**

A Dios por concederme la oportunidad de seguir avanzando en sus designios, por protegerme durante todo mi camino y darme las fuerzas necesarias para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mis hijos Kelly y Cristian, por proveer amor, esperanza y fe todos los días, son mi principal razón de existencia y quienes le dan sentido y alegría a mi vida.

A mis padres, Teresa y Carlos por ser un gran ejemplo de vida, los pilares que me enseñaron que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir las metas propuestas.

A mis hermanos, Verónica, Sandra, Roberto y Karla por apoyarme y acompañarme incondicionalmente a lo largo de estos dos años tan complicados e importantes para mí.

## **DECLARACIÓN**

Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por la L.C.A. Lorena Piedra Castillo como estudiante de la carrera de Maestro en Ciencias entre septiembre de 2016 y febrero de 2019, bajo la supervisión del Dr. Robert H. Manson.

Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

Candidato: Lorena Piedra Castillo

Director de tesis: Robert H. Manson

Cultivemos la ciencia por sí misma, sin considerar por el momento las aplicaciones. Estas llegan siempre, a veces tardan años, a veces, siglos.

Santiago Ramón y Cajal

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George Box

## Índice

<b>1. Introducción.....</b>	14
<b>2. Marco teórico.....</b>	16
2.1. Importancia del Café .....	16
2.2. Cafés especiales .....	20
2.2.1. Calidad de los cafés especiales.....	20
2.3. Café y cambio climático.....	23
2.4. Modelos de nicho ecológico y café .....	25
<b>3. Objetivos e Hipótesis.....</b>	29
3.1. Objetivo general:.....	29
3.2. Objetivos particulares: .....	29
3.3. Hipótesis:.....	30
<b>4. Materiales y métodos .....</b>	31
4.1. Área de estudio.....	31
4.2. Proceso de modelado de nicho ecológico para producción de café de alta calidad y perfiles de taza distintos .....	33
4.2.1. Obtención de datos .....	34
4.2.1.1. Datos de distribución.....	34
4.2.1.2. Variables ambientales.....	46
4.2.1.3. Selección de variables ambientales .....	48
4.2.2. Generación de modelos de nicho ecológico .....	49
4.2.2.1. Parametrización y validación de los modelos .....	49
4.2.2.2. Proyección de los modelos en diferentes periodos de tiempo .....	51
4.2.2.3. Selección del umbral de corte (binarización) en los modelos .....	51
4.2.3 Análisis estadístico de los datos .....	52
<b>5. Resultados y Discusión.....</b>	53
5.1 Modelo de zonas óptimas para la producción de café de calidad .....	53
5.2 Modelo de zonas óptimas para la producción de distintos perfiles de taza .....	56
5.3 Efecto de las regiones cafetaleras (zonas geográficas) en los perfiles de sabor .....	66
5.4 Efectos del cambio climático sobre la producción de café de alta calidad .....	76
5.5 Efectos del cambio climático sobre la producción de distintos perfiles de taza .....	83
<b>6. Conclusiones .....</b>	94

## Índice de Cuadros

CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS AGROCLIMÁTICAS DE LAS REGIONES CAFETALERAS EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ.....	32
CUADRO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS ATRIBUTOS SENSORIALES DE ACUERDO CON EL PROTOCOLO DE CATACIÓN SCAA (FERNÁNDEZ 2015) .....	35
CUADRO 3. PUNTAJE EN TAZA Y CLASIFICACIÓN FINAL DE CAFÉS SEGÚN LA SCAA (2015). ....	36
CUADRO 4. TERMINOLOGÍA UTILIZADA PARA DESCRIBIR LA FRAGANCIA, AROMA Y SABOR DE PERFILES DE CAFÉ EN UN PROCESO DE CATACIÓN Q (SCAA 2015).....	37
CUADRO 5. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ DE LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ Y QUE FUERON SOMETIDAS A EVALUACIÓN EN EL CENTRO AGROECOLÓGICO DEL CAFÉ (CAFECOL) POR CATADORES Q. ....	39
CUADRO 6. PRINCIPALES VARIEDADES DE CAFÉ DE LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ Y SOMETIDAS A EVALUACIÓN EN CAFECOL. ....	39
CUADRO 7. PRINCIPALES PROCESOS DE BENEFICIADO EN LAS MUESTRAS DE CAFÉ SOMETIDAS A EVALUACIÓN EN CAFECOL.....	40
CUADRO 8. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES BIOCLIMÁTICAS GENERADAS POR EL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA (UNAM) UTILIZANDO LA BASE CLIMATOLÓGICA DIARIA 1902-2011 DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL CONFORME A LA METODOLOGÍA ANUCLIM. ....	47
CUADRO 9. SUPERFICIE CON APTITUD CLIMÁTICA POR REGIONES, PARA EL CULTIVO DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN REGIONES CAFETALERAS DEL CENTRO DE VERACRUZ. ENTRE PARÉNTESIS SE MUESTRA EL PORCENTAJE QUE REPRESENTA RESPECTO A LA SUPERFICIE TOTAL POR REGIÓN. ....	54
CUADRO 10. VALORES DE COMBINACIONES DE TRANSFORMACIÓN DE VARIABLES (FC'S), MÚLTIPLO REGULARIZADOR (RM), NÚMERO DE VARIABLES AMBIENTALES UTILIZADAS, CRITERIO DE INFORMACIÓN DE AKAIKE (AIC) Y ÁREA BAJO LA CURVA (AUC) DE LOS DATOS DE ENTRENAMIENTO Y DE VALIDACIÓN, UTILIZADOS EN LA PARAMETRIZACIÓN DE LOS MODELOS DE PERFILES AROMÁTICOS Y DE SABOR DE CAFÉ..	56
CUADRO 11. SUPERFICIE DE ÓPTIMA IDONEIDAD CLIMÁTICA PARA SEIS PERFILES DE TAZA EN REGIONES CAFETALERAS DEL CENTRO DE VERACRUZ.....	57
CUADRO 12. VARIABLES CLIMÁTICAS DE MAYOR SIGNIFICANCIA, EN ORDEN DE IMPORTANCIA, PARA LA GENERACIÓN DE CADA UNO DE LOS MODELOS DE PERFILES DE TAZA. ....	58
CUADRO 13. SUPERFICIE CON APTITUD CLIMÁTICA POR REGIONES, PARA EL CULTIVO DE CAFÉ DE CALIDAD EN EL CENTRO DE VERACRUZ, PROYECTADA AL AÑO 2039 BAJO ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y PORCENTAJES DE PÉRDIDA RESPECTO A LA SUPERFICIE HISTÓRICA.....	77
CUADRO 14. SUPERFICIE CON APTITUD CLIMÁTICA POR REGIONES, PARA EL CULTIVO DE CAFÉ DE CALIDAD EN EL CENTRO DE VERACRUZ, PROYECTADA AL AÑO 2039 BAJO ESCENARIO DE ALTAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (RCP 8.5) Y PORCENTAJES DE PÉRDIDA RESPECTO A LA SUPERFICIE HISTÓRICA. ....	79
CUADRO 15. SUPERFICIE DE NUEVAS ZONAS CON APTITUD CLIMÁTICA PARA EL CULTIVO DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN LA ZONA ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5). ....	82
CUADRO 16. SUPERFICIE DE NUEVAS ZONAS CON APTITUD CLIMÁTICA PARA EL CULTIVO DEL CAFÉ ARÁBIGO EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE ALTAS EMISIONES DE GEI (RCP 8.5).....	82
CUADRO 17. SUPERFICIE CON APTITUD CLIMÁTICA ÓPTIMA PARA SEIS PERFILES DE TAZA EN REGIONES CAFETALERAS DEL CENTRO DE VERACRUZ, PROYECTADA AL AÑO 2039 BAJO ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (RCP 4.5) Y PORCENTAJES DE PÉRDIDA RESPECTO A LA SUPERFICIE HISTÓRICA. ....	84
CUADRO 18. SUPERFICIE CON APTITUD CLIMÁTICA ÓPTIMA PARA SEIS PERFILES DE TAZA EN REGIONES CAFETALERAS DEL CENTRO DE VERACRUZ, PROYECTADA AL AÑO 2039 BAJO ESCENARIO DE ALTAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (RCP 8.5) Y PORCENTAJES DE PÉRDIDA RESPECTO A LA SUPERFICIE HISTÓRICA. ....	84

## Índice de Figuras

FIGURA 1. RENDIMIENTO DE CAFÉ CEREZA EN MÉXICO DEL CICLO 1980 AL CICLO 2017. (SIAP, 2016) .....	18
FIGURA 2. MAPA DE LAS SIETE REGIONES CAFETALERAS EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ, LOS MUNICIPIOS ASOCIADOS Y LAS PARCELAS DE CAFÉ UBICADAS EN ELLAS.....	32
FIGURA 3. DIAGRAMA DE TRABAJO EN EL PROCESO DE MODELACIÓN DE ZONAS DE ALTA CALIDAD DEL CAFÉ EN EL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ USANDO MaxEnt.....	33
FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE NÚMERO DE MUESTRAS DE CATAZIONES DE CAFÉ POR LOCALIDAD EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ.....	38
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE VARIEDADES DE CAFÉ SOMETIDAS A EVALUACIÓN, EN LAS REGIONES CAFETALERAS UBICADAS EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ.....	40
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS DE BENEFICIADO DE CAFÉ SOMETIDAS A EVALUACIÓN, EN LA REGIÓN CAFETALERA DEL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ. ....	41
FIGURA 7. GRÁFICO DE SEDIMENTACIÓN (SCREE POT) DE LOS AUTOVALORES (EIGENVALUE) DE CADA FACTOR (BARRAS AZULES) Y LA VARIANZA ACUMULADA (CUMULATIVE VARIABILITY) DEL TOTAL DE FACTORES QUE CONFORMAN EL ANÁLISIS (LÍNEA ROJA). .....	42
FIGURA 8. CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES ORGANOLÉPTICAS DE CAFÉ Y LOS DOS PRINCIPALES FACTORES GENERADOS POR UN ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	43
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ SOMETIDAS A EVALUACIÓN, EN LA REGIÓN CAFETALERA DEL CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ. ....	45
FIGURA 10. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA (1960 – 2000) PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	55
FIGURA 11. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA CARAMELO EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	60
FIGURA 12. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA CHOCOLATE EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	61
FIGURA 13. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA FLORAL EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	62
FIGURA 14. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA FRUTAL EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	63
FIGURA 15. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA NUEZ EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	64
FIGURA 16. APTITUD CLIMÁTICA HISTÓRICA PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFILES DE TAZA ESPECIADO EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ. ....	65
FIGURA 17. GRÁFICO DE ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS NO SIMÉTRICAS (NSCA) DE LOS DESCRIPTORES DE PERFILES SIGNIFICANTES QUE REPRESENTA LA PROYECCIÓN SOBRE LOS EJES DE LOS FACTORES F1 Y F2 DE LAS MUESTRAS CORRESPONDIENTES A LAS REGIONES CAFETALERAS DEL CENTRO DE VERACRUZ. ....	68
FIGURA 18. GRÁFICO DE ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS NO SIMÉTRICAS (NSCA) QUE REPRESENTA LA PROYECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE CATAS DE CAFÉ CORRESPONDENTES A LOS DIFERENTES PROCESOS DE BENEFICIADO: DESMUCILAGINADO (TRIÁNGULOS), ENMIELADO (ROMBOS) Y NATURAL (PUNTOS) SOBRE LOS EJES DE LOS FACTORES F1 Y F2. ....	69
FIGURA 19. GRÁFICO DE ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS NO SIMÉTRICAS (NSCA) QUE REPRESENTA LA PROYECCIÓN DE LAS MUESTRAS CORRESPONDENTES AL PROCESO DE BENEFICIADO LAVADO SOBRE LOS EJES DE LOS FACTORES F1 Y F2.....	70
FIGURA 20. GRÁFICO DE ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS NO SIMÉTRICAS (NSCA) QUE REPRESENTA LA PROYECCIÓN DE LAS MUESTRAS CORRESPONDENTES A LAS REGIONES CAFETALERAS: ATZALAN (TRIÁNGULOS) Y CÓRDOBA (ROMBOS), HUATUSCO (CUADRADOS), IXHUALTÁN (CÍRCULOS) Y TEZONAPA (ASTERISCOS) SOBRE LOS EJES DE LOS FACTORES F1 Y F2.....	71
FIGURA 21. GRÁFICO DE ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS NO SIMÉTRICAS (NSCA) QUE REPRESENTA LA PROYECCIÓN DE LAS MUESTRAS CORRESPONDENTES A LAS REGIONES CAFETALERAS: COATEPEC (TRIÁNGULOS) Y ZONGOLICA (ROMBOS) SOBRE LOS EJES DE LOS FACTORES F1 Y F2.....	72
FIGURA 22. MAPA PERCEPTUAL DE LOS GRUPOS DESCRIPTIVOS DE PERFIL DE TAZA.....	73
FIGURA 23. MAPA PERCEPTUAL DE LOS GRUPOS DESCRIPTIVOS DE PERFIL DE TAZA, CON SOBREPOSICIÓN DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (LÍNEA VERDE) Y PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (LÍNEA VIOLETA) (1960 – 2000).....	75
FIGURA 24. APTITUD CLIMÁTICA FUTURA (2039) PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ, EN UN ESCENARIO DE BAJA EMISIÓN DE GASES (RCP 4.5) .....	78
FIGURA 25. APTITUD CLIMÁTICA 2039 PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ, BAJO ESCENARIO DE BAJA EMISIÓN DE GASES (RCP 8.5) .....	80

FIGURA 26. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ DE ALTA CALIDAD EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	83
FIGURA 27. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA CARAMELO EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	86
FIGURA 28. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA CHOCOLATE EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	87
FIGURA 29. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA FLORAL EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	88
FIGURA 30. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA ESPECIADO EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	89
FIGURA 31. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA FRUTAL EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	90
FIGURA 32. CAMBIOS EN LAS ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ CON PERFIL DE TAZA NUECES EN REGIONES EN LA ZONA CENTRO DE VERACRUZ ANTE UN ESCENARIO DE BAJAS EMISIONES DE GEI (RCP 4.5) Y UNO DE ALTAS EMISIONES (RCP 8.5). ES POSIBLE APRECIAR QUE HAY ZONAS QUE GANAN, PIERDEN O QUE QUEDAN SIN CAMBIOS (PERSISTENTES).....	91
FIGURA 33. MAPA PERCEPTUAL DE LOS GRUPOS DESCRIPTIVOS DE PERFIL DE TAZA, CON SOBREPOSICIÓN DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (LÍNEA VERDE) Y PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (LÍNEA VIOLETA) RCP 4.5 (2039). .....	92
FIGURA 34. MAPA PERCEPTUAL DE LOS GRUPOS DESCRIPTIVOS DE PERFIL DE TAZA, CON SOBREPOSICIÓN DE ISOLÍNEAS DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (LÍNEA VERDE) Y PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (LÍNEA VIOLETA) EN ESCENARIO RCP 8.5 (2039). .....	93

## **Resumen**

El cultivo más importante en la zona montañosa del centro del estado de Veracruz es el café de sombra. El café de esta zona ha sido un referente a nivel nacional, reconocido y apreciado por la calidad de su café y perfiles de taza diferenciados. Sin embargo, desde hace 30 años, el sector cafetalero atraviesa por constantes crisis debidas a ciclos de sobreproducción, bajos precios y la afectación por la roya. Además, existe también un consenso general de que el cambio climático tendrá efectos negativos tanto en la producción como en la calidad a diferentes escalas territoriales. Esta situación podría traer como consecuencia la reconversión productiva poniendo en riesgo la continuidad y tradición de este cultivo en el estado y el resto del país, así como posibles afectaciones a la biodiversidad debida a la eliminación de este sistema agroforestal. La producción de café de calidad podría representar una salida importante para los productores, ya que el mercado de cafés especiales cuenta con precios más altos y estables. Sin embargo falta información importante para los productores en su decisión de ingresar o no en este nuevo mercado, en particular no se sabe qué tan vulnerable puede ser el cultivo en el centro del estado de Veracruz ante el cambio climático (CC). La principal finalidad de este estudio fue identificar aquellas microrregiones que cuentan con las condiciones climáticas óptimas para la producción de café de alta calidad, las que son aptas para la producción de perfiles diferenciados y dónde existe mayor riesgo por efectos negativos ante escenarios climáticos futuros. Para este trabajo se utilizaron datos de catas de café, modelos de nicho ecológico de MaxEnt y los escenarios de cambio climático del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

De acuerdo a los modelos generados usando 139 catas de café de catadores Q con puntaje de evaluación mayor o igual a 83 puntos y depurados para eliminar sesgos. Las áreas con la aptitud climática adecuada para producir café de alta calidad bajo el escenario de clima histórico, se ubican a lo largo de la cadena montañosa del estado, con una superficie total de 79,905 ha con condiciones óptimas para producir café de calidad y 74,087 ha de aptitud climática media para producir café de calidad. Las regiones de Coatepec, Córdoba y Huatusco son las que presentan la mayor superficie con óptima aptitud climática. Los modelos generados para los distintos perfiles de taza indican que éstos pueden obtenerse en todas las zonas cafetaleras, sin embargo, existen zonas cafetaleras con un predominio característico de ciertos perfiles de taza debido a combinaciones particulares de las condiciones climáticas, principalmente temperatura y precipitación. En cuanto a los efectos del cambio climático sobre la producción de café de alta calidad, se espera que para el año 2039 se reduzca la superficie un 42% o 68% con condiciones óptimas para el cultivo de café de calidad bajo escenario de bajas (RCP 4.5) y altas (RCP 8.5) emisiones de gases de efecto invernadero, respectivamente. Se espera además que el efecto sea más negativo en las zonas de menor altitud bajo ambos escenarios.

Por otro lado, en ambos escenarios de cambio climático y prácticamente en todas las regiones cafetaleras pudiera darse el caso de nuevas zonas con aptitud climática óptima para cultivo de café de alta calidad en zonas de mayor altitud. En estas existe un riesgo de la conversión de los últimos remanentes del bosque mesófilo de montaña en la región a fincas de café. Discuto la relevancia de estos resultados para la toma de decisiones en el estado, así como estrategias de manejo en las fincas que podrían ayudar mitigar los impactos del cambio climático sobre la producción de café de calidad en Veracruz.

## **1. Introducción**

El café es un producto de gran importancia para la economía de muchos países tropicales. Millones de personas en el mundo viven de su cultivo y mundialmente ha sido y es un producto generador de empleo. Este cultivo se introdujo en México a finales del siglo XVIII convirtiéndose en uno de los principales productos de la economía nacional y se consolidó como uno de los productos agrícolas de mayor importancia en el comercio. Sin embargo, actualmente el sector cafetalero atraviesa por constantes crisis debidas a la caída en los precios, además, existe un consenso general de que el cambio climático tendrá efectos negativos tanto en la producción como en la calidad a diferentes escalas territoriales, ya sea a nivel local, regional y/o nacional. Esta situación podría traer como consecuencia la reconversión productiva poniendo en riesgo la continuidad y tradición de este cultivo en México, así como posibles afectaciones a la biodiversidad debida a la eliminación de cobertura vegetal. El mercado de café de especialidad podría representar una importante estrategia para los productores, ya que tiene precios más altos y estables en comparación con el café convencional.

En una economía como la actual, las necesidades de obtener productos de calidad que se adecúen a normas, exigencias y estándares son la base de la comercialización de cualquier producto. En el caso del café, muchos autores tratan de explicar la calidad desde el punto de vista de su disciplina particular. En cuanto al sistema de producción, Benítez et al (2003) y Tobasura (2006) mencionan que la apreciación de calidad, solo se ha buscado mediante la identificación y fortalecimiento del cultivo a través de los cafés especiales, bajo criterios de sostenibilidad. Para Wang (2012), la calidad del grano del café es el resultado de los procesos de cosecha y poscosecha porque influye significativamente en su composición química. Por otra parte, la evaluación sensorial del café es la que permite identificar los defectos presentes en la bebida, medir la intensidad de una característica sensorial como la acidez o el dulzor, y también calificar el sabor, el aroma y la calidad global del producto.

México es un país que cuenta con las condiciones agroecológicas adecuadas para la producción de café de alta calidad, dada su ubicación geográfica y toda una historia y tradición en el cultivo. En particular, el estado de Veracruz ha sido un referente a nivel nacional, reconocido y apreciado por la calidad del café y perfiles de taza diferenciados; Este estado ocupa el segundo lugar en producción de café en el país, siendo las regiones de Córdoba y Coatepec las más reconocidas por su calidad en el mercado internacional (Mestries, 2006; ASERCA, 2002). Sin embargo, también

es uno de los estados más vulnerables al cambio climático (Carranza-Edwards et al 2004; Ortíz Pérez y Méndez Linares, 2003).

Además de mitigar sus propias emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el reto del sector agrícola en general, y el sector cafetalero en particular, es el de adaptarse a un clima más variable. El café es un cultivo de tradición histórica, social, cultural y económica en el estado de Veracruz, ligado a un gran número de familias. En este contexto la principal finalidad de este estudio es conocer aquellas regiones que cuentan con las condiciones climáticas óptimas para la producción de café de alta calidad, identificar qué regiones son aptas para la producción de café con perfiles diferenciados, así como identificar dónde existe mayor riesgo de efectos negativos ante escenarios climáticos futuros, utilizando datos de catacaciones de café y modelos de distribución de especies.

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Importancia del Café**

El café es uno de los productos agrícolas de mayor importancia en el comercio internacional. Es considerado como la segunda bebida más consumida en el mundo, después del agua; se produce en más de 60 países y su producción depende de alrededor de 25 millones de familias cafetaleras en todo el mundo (ICO, 2006). En México, de acuerdo con reportes de SAGARPA para el año 2007, el sector cafetalero empleaba a más de 500 mil productores, de los cuales dependen cerca de 3 millones de personas y ocupa cerca de 690 mil hectáreas de 12 entidades federativas y 391 municipios. Además, la cafetalera genera un valor en el mercado de alrededor de \$20 mil millones de pesos por año (Moguel y Toledo, 2004; SAGARPA, 2013) e involucra exportaciones por \$897 millones de dólares/año. Es importante notar también que México es el segundo productor de café orgánico del mundo, 10% de la superficie destinada a esta actividad sustentable (SAGARPA, 2016). A nivel nacional, Veracruz se ha destacado ocupando el segundo lugar en producción de café cereza. De acuerdo con cifras del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el año 2017, se reportó un total de 141 mil 665 ha sembradas, con una cosecha de 191,946 ton, generando más de 100 mil empleos principalmente durante la cosecha. Existen diez regiones productoras de café en el estado: en la zona norte, Chicontepec y Papantla; en la zona centro se encuentran Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba, Tezonapa y Zongolica; y en la zona sur, Los Tuxtlas; de éstas, tradicionalmente han destacado Córdoba y Coatepec, reconocidas por su calidad en el mercado internacional. La cafetalera del estado se distingue por ser principalmente de pequeños productores o minifundistas, ya que más de 90% de las fincas tienen una superficie menor a tres hectáreas, en las que se mantienen sistemas de policultivo y rústicos. Un aspecto importante de la cafetalera de Veracruz es el hecho que el café se comercializa casi en su totalidad en cereza, debido a que los productores no llevan a cabo el proceso de beneficiado, vendiéndolo principalmente a los intermediarios que generalmente van hasta las fincas a comprar el producto y evitándose así gastos de transporte.

Aunado a su importancia socioeconómica, los cafetales mexicanos son muy relevantes por sus beneficios ambientales, ya que coinciden con zonas de bosque mesófilo de montaña, también conocido como bosque de niebla, considerado un ecosistema con uno de los mayores niveles de biodiversidad por unidad de superficie en el país y tal vez en el mundo (Ramamoorty, 1993). Muchos estudios han mostrado que los cafetales de sombra tienen la capacidad de conectar y amortiguar los remanentes de este tipo de bosque, además de proporcionar hábitat a muchas de las

especies que lo comprenden debido a su cobertura vegetal compleja y diversa, particularmente notable en los sistemas de cultivo rústicos o en los policultivos tradicionales o incluso comerciales (Jiménez y Gómez-Pompa, 1982; Escamilla y Díaz, 2002; Manson, et al 2008). Aparte de la conservación de la biodiversidad, estos cafetales también pueden ayudar a conservar servicios ambientales importantes como la polinización, el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, el almacenamiento de carbono, la regulación de la cantidad y calidad de agua y la provisión de refugios y alimento para murciélagos y aves dispersoras de semillas (Beer et al 2003; Jose, 2009; Manson et al 2008; Moguel & Toledo, 1999, Cortes-Delgado & Sosa 2014). Sin embargo, el cultivo del café está en crisis con cada vez más de su superficie en riesgo de ser reconvertido a usos de suelo más intensificados, lo cual resultaría en la pérdida de muchos de estos beneficios ambientales.

A pesar de la importancia del café, desde hace varios años el sector cafetalero está inmerso en profundas crisis por la caída de precios en el mercado internacional, un severo castigo a la exportación de café mexicano, bajo el argumento de deterioro en la calidad (Escamilla *et. al.* 2003) y las afectaciones por la roya del café. Las consecuencias de estas crisis son diversas y sus repercusiones impactan desfavorablemente al sector (UACH, 2005). Estos importantes retos amenazan cada vez más el cultivo y la productividad del café en México, poniendo en riesgo su continuidad. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA, en 2016 en México se sembraron poco más de 727 mil hectáreas de café, siendo el quinto cultivo con mayor superficie sembrada en el país después del maíz, sorgo, frijol y caña de azúcar. En ese año la producción ascendió a poco más de 1.03 millones de toneladas de café cereza obteniendo un rendimiento aproximado de 1.5 ton/ha. Sin embargo, la producción de café en México ha disminuido a pesar de que la superficie sembrada se ha incrementado, pues se pasó de cosechar 2.8 ton/ha en 1980 a 1.4 ton/ha en 2017, en la Figura 1 se muestra la variación del rendimiento a través del tiempo. En comparación con otros países de América Latina, México tiene rendimientos más bajos ya que el cultivo se da primordialmente en condiciones de montaña, con una mala combinación de fertilización inadecuada, plantas viejas y altos costos de producción (Pohlan et al 2006).



Figura 1. Rendimiento de café cereza en México del ciclo 1980 al ciclo 2017. (SIAP, 2016)

Esta caída en la productividad durante las últimas décadas se ha debido entre otras causas a la disminución en el precio internacional del grano y la desaparición del Instituto Mexicano del Café (INMECAFE), lo que provoca que el productor se descapitalice, debido a que no existe una estrategia de diversificación productiva, quedando las fincas en condición de semiabandono hasta que el precio vuelve a repuntar. Otras causas son el agotamiento de los cafetos y la edad avanzada de las plantaciones, el manejo inadecuado de la poda de cafetos y la regulación de sombra, la deficiente protección fitosanitaria y la limitada aplicación de abonos, los altos costos que enfrentan los productores y finalmente, a las plagas como la roya, que actualmente afecta al cultivo y que la Organización Internacional del Café (OIC) señala como la peor afectación desde que ésta hizo su aparición en Centroamérica en el año de 1976. Además de estas amenazas para la producción del café se confirma que el planeta está sufriendo un cambio climático, con aumentos de temperatura y cambios en los patrones de precipitación desfavorables para la producción del grano (Läderach et al 2013). Estos cambios tendrán efectos muy diversos en cada región cafetalera, principalmente en los sitios de menor altitud, lo que provocaría una reducción de las áreas aptas para producción de café, además de un incremento en el riesgo de aumento de plagas y enfermedades en los cafetos (Ovalle-Rivera et al 2015).

En general los expertos consideran que la crisis del café está condicionada por el mercado internacional, por las condiciones desiguales de competencia entre los productores y por la baja rentabilidad de las fincas (Bartra 1996; Jiménez y Gómez-Pompa 1982; Nolasco 1985; Nestel 1995; Giovannucci y Juárez 2006; Pohlan et al 2006; Escamilla 2007). Es importante señalar que,

en el mercado internacional, en la etapa final de la cadena, el café se clasifica como un *commodity*, o sea, un bien genérico. Es por ello que el bajo precio que obtiene el productor se debe principalmente a la ausencia de una diferenciación, lo que provoca que el precio de mercado sea más bajo que el de aquellos productores que sí la hacen.

Ante esta problemática, diversas organizaciones de productores de café han desarrollado desde la década de los ochenta, alternativas productivas y de manejo de los cafetales que les han permitido enfrentar estas crisis e incursionar en mercados no convencionales donde se obtienen mejores precios e ingresos por su café. Estos son los casos de los mercados especializados de café orgánico, de comercio justo, de café bajo sombra o café amigable con las aves, denominación de origen (como el Café Veracruz y Café Chiapas), y más recientemente de café de especialidad en el sector de calidad. Los ejemplos más exitosos de los cafés diferenciados son el café orgánico y el comercio justo, en donde México ha tenido una destacada participación con productores de Chiapas y Oaxaca (Escamilla, 2007), pero es importante hacer notar que un café diferenciado no es necesariamente un café de alta calidad. Debido a esto, los cafés certificados podrían perder nicho de mercado, ya que está constituido fundamentalmente por consumidores sensibles a los problemas de los países en vías de desarrollo, y con un nivel de vida que les permite pagar el café 15 ó 20% más caro (Sosa et al 2004). Sin embargo, en las últimas décadas ha habido cambios acelerados en las formas de consumir café, por lo que la tendencia actual es hacia el consumo de cafés sustentables y de alta calidad demandado principalmente por los países consumidores (Hernández Fujigaki, 2010). Es por eso por lo que hay cada vez más interés en los nichos especiales de café en los que se ofrezcan un producto de alta calidad basado en procesos de catación y que permitan la trazabilidad del producto. Esto requiere un buen manejo de la finca y el control de los factores que intervienen durante todo el proceso del café para lograr un producto de calidad (Sosa et al 2004).

## 2.2. Cafés especiales

La denominación de cafés especiales es relativamente nueva, habiendo nacido a comienzos de la década de los sesenta como una respuesta a los consumidores de café principalmente de Estados Unidos en búsqueda de una bebida de mayor calidad en un mercado donde el producto se encontraba homogenizado (Valencia, 2007). El término se refiere a una amplia gama de cafés que tienen características definidas por distintos grupos de consumidores, asociadas, la mayoría de ellas a objetivos sociales o ambientales (Cano et al 2012). En términos generales los cafés especiales son aquellos valorados por los consumidores por sus atributos consistentes, verificables y sostenibles, por los cuales están dispuestos a pagar precios superiores, que redunden en un mejor ingreso y un mayor bienestar de los productores, siendo ésta una de las principales características.

Según la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA, 2004), los cafés especiales pueden agruparse en las siguientes categorías:

- **Cafés de origen:** provienen de una región con cualidades ambientales y culturales únicas debido a que crecen bajo condiciones climáticas óptimas, poseen características sensoriales y organolépticas que permiten obtener una taza de alta calidad.
- **Cafés sostenibles:** son cultivados por comunidades que tienen un serio compromiso con la protección del ambiente, a través de la producción limpia y la conservación de la biodiversidad a y a la vez promueven el desarrollo social de las familias que los producen. Dentro de esta categoría se encuentran el café orgánico, comercio justo, café bajo sombra o amigable con las aves.
- **Cafés de preparación:** son cafés con una apariencia especial por su tamaño y forma, lo que los hace apetecidos en el mercado internacional. Dentro de estos se encuentran los cafés selectos y café caracol, muy apreciados por la alta acidez en taza.

### 2.2.1. Calidad de los cafés especiales

La definición de calidad en el café ha evolucionado a través del tiempo y hoy en día esta definición varía a lo largo de la cadena de producción hasta el consumidor. A nivel del productor o cafeticultor la calidad del café es una combinación entre el nivel de producción y el precio; para los importadores, está vinculada al tamaño del grano, ausencia de defectos, cantidad y consistencia disponible, características físicas y precio; para los tostadores depende del contenido de humedad, las características de origen, precio, compuestos bioquímicos y calidad organoléptica; a nivel del

consumidor, es valorado por su aroma, sabor, efectos sobre la salud, procedencia geográfica y calidad organoléptica (Leroy et al 2006). La alta calidad del café es un rasgo sumamente complejo que se describe por una sensación agradable, combinación equilibrada de sabor, cuerpo y acidez en ausencia de defectos, siendo el sabor el parámetro más importante para el consumidor (Puerta, 1996; Sunarharum *et al* 2014; Leroy *et al* 2006). Los métodos de análisis sensorial y la evaluación del perfil de taza son herramientas útiles y de gran importancia en la caracterización de la calidad de diferentes tipos de café. Uno de los métodos empleados en la evaluación sensorial es la prueba de “cupping” (cata o catación, como se ha quedado el término por costumbre), desarrollada por la SCAA (2015), la cual se basa en un análisis sensorial cuantitativo y descriptivo de la bebida, que realiza un equipo de jueces seleccionados y entrenados (Borém et al 2012). Sin embargo, la capacitación y actualización de un panel de catadores es costoso. Actualmente existen tres metodologías para la catación de café que son reconocidas internacionalmente: el “Licensed Grader” del Intercontinental Exchange Inc. (ICE), el “Coffe Taster Certificate” (SCAA, 2015) y el “Licensed Q-Grader” del Coffe Quality Institute (CQI, 2013<sup>a</sup>). La más relevante en términos del número de países participantes es la Licencia Q-Grader, con más de 2700 catadores de café en 61 países (Fernández, 2015).

La variación en la calidad intrínseca del café está determinada por factores genéticos y ambientales (Camargo et al 1992; Fajardo-Peña y Sanz-Uribe, 2003, Leroy et al 2006). Hay cuatro factores ambientales relacionadas con la calidad de bebida del café (altitud, pluviometría, suelo y sombra) y dos factores genéticos (producción y tamaño del grano) (Avelino et al 2002). El tamaño, forma, color y composición química del grano influyen en la calidad del café, además resalta que el tamaño de grano presenta una relación positiva con la calidad de la taza del café (Regalado, 2006). El café es uno de los productos agrícolas más complejos intrínsecamente y susceptibles a las condiciones del clima, en donde la influencia de los factores naturales lo hace tan diferente uno del otro. Es gracias a estas características agroclimáticas, Veracruz se ha consolidado como ganador del certamen Taza de Excelencia durante cinco años consecutivos, por su calidad, y características particulares y distintivas de fragancia, aroma, sabor y acidez.

Se sabe que los cafetos crecen más lento a temperaturas más bajas. Las cerezas que contienen las semillas maduran gradualmente, es decir, temperaturas más bajas permiten una maduración más lenta, y esto a su vez, que el grano tenga una mayor densidad resultando en sabores más complejos que contribuyen a aumentar la calidad de la bebida. De acuerdo con un estudio realizado por Lara y Vaast (2007), la altitud puede influir significativamente en la composición bioquímica, la calidad

física y organoléptica de la taza de café. Rogers et al., (1999) citado por Binotto et al (2011) encontraron una relación en la disminución de ácido quínico con el desarrollo del grano, el cual está relacionada con el contenido de ácido clorogénico, influyendo directamente en la calidad de la bebida. Es quizá debido a esto que el manejo de cafetales bajo sombra, al regular el microclima de la finca, permite que el café se desarrolle lentamente alcanzando contenidos de ácidos y azúcares adecuados para obtener una taza de mejor calidad. Para determinar la influencia que tiene el grado de madurez de la cereza del café en la calidad en taza, Puerta (2000) evaluó la calidad del café preparado con mezclas de café cereza maduro e inmaduro, los resultados indicaron que a partir de 2.5% de café verde se rechazaron desde el 30% de las tazas por defectos como sucios, fermento, stinker (“hediondo”), tierra y sabores desagradables. Marín et al (2003) evaluaron el efecto de los diferentes estados de desarrollo del fruto de café variedad Colombia encontrando que las tazas mejor calificadas fueron preparadas en su totalidad con frutos maduros; también verificaron los resultados obtenidos por Puerta (2000), donde adicionalmente los frutos inmaduros inducen sabores y aromas a fermentos.

Durante varios años se han realizado investigaciones encaminadas a estudiar los factores que influyen en la calidad y el sabor del café. Los compuestos no volátiles presentes en los granos de café y durante la preparación de la bebida son importantes para la calidad sensorial del café y se han relacionado con aspectos positivos y negativos del sabor. Por ejemplo, los carbohidratos son precursores de las notas olfativas percibidas como “dulces”: así las notas de caramelo y chocolate, surgen de las reacciones de Maillard entre los azúcares y los aminoácidos al calentarse los granos durante el proceso de tostado. Específicamente en la última década, la investigación se centra en los grupos volátiles específicos importantes para el aroma del café como las pirazinas, furanos y tioles (Pickard et al 2013, Pickard et al 2014, Bicchi et al 2011, Petisca et al 2014, Quintanilla-Casas et al 2015) de acuerdo con los estudios permiten identificar los orígenes del café. De acuerdo con Bertrand et al (2012) el perfil afrutado-floral y la calidad del aroma están muy relacionados con las cetonas y etanal, compuestos volátiles que podrían considerarse como indicadores del café de tierras altas y por lo tanto de temperaturas menores.

Mejorar y preservar la calidad organoléptica del café es un desafío actual para los países productores del grano, que ven en el mercado de cafés especiales una gran oportunidad de mejorar su negocio y garantizar su supervivencia (Läderach et al 2006). La investigación al respecto es dispersa, aunque ha contribuido a definir y priorizar en cada fase el proceso productivo y aportes significativos para mejorar la calidad de la bebida.

Ejemplos de las investigaciones llevadas a cabo en este aspecto, incluyen la caracterización de los sistemas de producción en la denominación de origen protegida “Café de Colombia”, y dos casos particulares del mismo país como las subdenominaciones de origen Café de Nariño y Café de Santander. También la identificación de nichos ambientales de café de alta calidad en Nicaragua, (2012) con miras hacia la obtención de una denominación de origen, la caracterización de fincas cafeteras por calidad de la bebida y algunas condiciones ambientales agronómicas (2010) llevada a cabo en Colombia, y finalmente, en México los principales trabajos realizados en cuanto a cafés de especialidad han sido en los estados de Veracruz y Chiapas, para llevar a cabo la denominación de origen Café Veracruz y el estudio para la determinación de las sub denominaciones de origen del Café Veracruz (Pérez Portilla, 2005). En el estado de Chiapas se tienen la denominación de origen Café Chiapas y estudios sobresalientes sobre café orgánico y comercio justo, por ejemplo: estrategia de mejoramiento de la producción cafetalera de la organización de Campesinos Ecológicos de la Sierra Madre de Chiapas: caracterización de la bebida de café (Pérez Portilla, 2011), Café Orgánico: producción y certificación en México (Sosa, et al 2004) y Producción y calidad del café orgánico en México (Escamilla, 2006), entre otros. En Guatemala se ha impulsado la producción de café para mercados especiales, proyecto en el que instituciones no gubernamentales apoyaron la producción de café para mercados especiales dirigidos al segmento de calidad. Estos esfuerzos comenzaron a principios de los noventa y se profundizaron en los últimos años, implementando acciones para mejorar la calidad del café y promover los cafés de calidad en el mercado internacional (Pappa, 2003). Estos estudios se han llevado a cabo sobre regiones delimitadas política y/o culturalmente que determinan una zonificación agroecológica de mayor productividad. La zonificación agroecológica es el enfoque más conocido de las ciencias agrícolas, es un tipo de modelado espacial que se apoya en el conocimiento de expertos sobre los límites fisiológicos de un cultivo para clasificar y representar espacialmente la aptitud de la tierra con respecto a un determinado uso (Pérez y Geissert, 2006), con base en variables edáficas, topográficas y un número limitado de variables ambientales (Bunn, 2015). Sin embargo, este tipo de modelado tiene una serie de limitaciones inherentes a la escala de los datos utilizados, principalmente para las variables derivadas de los suelos (Alonso et.al 2008).

### 2.3. Café y cambio climático

Como se señala en varios informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007<sup>a</sup>; IPCC, 2007b), la comunidad científica internacional expresa que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero tiene como resultado cambios en la variabilidad climática diaria, estacional, interanual y a lo largo de decenios. Los informes del IPCC también

señalan que los estudios científicos sugieren que es de esperar “cambios en la frecuencia, intensidad y duración de fenómenos climáticos extremos”. La variabilidad climática y la ocurrencia de eventos extremos (heladas, granizos, sequías) resultan en perjuicios muy importantes para el sector agrícola incluyendo el cultivo de café (Camargo, 2010), con repercusiones sociales, ambientales y económicas de gran magnitud (BID-CEPAL, 2012). Algunas investigaciones demuestran que diferentes cultivos en muchas partes del mundo serán afectados por el cambio climático, lo que ocasionará importantes impactos sobre el abastecimiento de alimentos (Lobell et al 2008; Läderach et al 2010b).

En este contexto, se ha indicado específicamente el impacto progresivo sobre la producción de café, los medios de vida de los productores y los impactos sobre los servicios ambientales inherentes a los sistemas agroforestales de la región mesoamericana (Läderach *et al* 2010). En México Bellon et al (2011) concluyeron que los mayores impactos serán sobre los pequeños agricultores y algunos otros han demostrado que México es particularmente sensible a cambios en la disponibilidad del agua y en los patrones climáticos (Magaña y Conde, 2000; Conde et al 1997; Mendoza *et al* 1997; Liverman *et al* 1994). Es así como mediante el análisis de diversos escenarios que contemplan posibles variaciones en los factores bioclimáticos (temperatura y precipitación), el modelado computacional ha permitido a los investigadores ofrecer algunas pautas para la adaptación y/o mitigación de los posibles efectos.

Dada la relación directa de las etapas fenológicas del café con los factores ambientales, es de suma importancia la estimación de vulnerabilidad del cultivo ante escenarios de cambio climático, ya que se prevé un alto riesgo para el cultivo en cuanto a:

- Calidad: debido al aumento de temperaturas el café madura más rápidamente provocando una baja calidad debida a malos sabores.
- Rendimiento: si ocurren fenómenos climáticos tales como temperaturas muy elevadas durante periodos cruciales para la vida del cultivo (la floración o el llenado de los frutos, por ejemplo) el rendimiento será adversamente comprometido sobre todo si se presentaran escasas precipitaciones.
- Plagas y enfermedades: las temperaturas elevadas no solo favorecerán la proliferación de ciertas plagas y enfermedades, sino que también resultarán en su expansión hacia otras regiones donde antes no se presentaban.

Estos cambios tendrán efectos muy diversos para el sector cafetalero en cada región del planeta, principalmente en los sitios de menor altitud, lo que provocaría una reducción de las áreas aptas para producción de café. Algunos de los estudios llevados a cabo en el estado de Veracruz para conocer los posibles efectos del cambio climático en el sector cafetalero fueron: evaluación de la sensibilidad al cambio de aptitud, utilizando modelos de circulación general para el año 2020 y 2050, combinados con datos de temperatura y precipitación (Monterroso, 2007). Este estudio mostró que habrá un incremento de entre 1° (2020) y 4°C (2050), con lo que se esperaría que 27% de la superficie de café cultivada en el estado de Veracruz sea muy apta, 30% apta y 37% no apta. Una investigación realizada por Villers (2009) sobre la floración, fructificación y desarrollo del fruto del café en Veracruz, consistió en construir diferentes escenarios utilizando datos de temperatura y precipitación, sus resultados señalan que las variaciones en la precipitación y temperatura afectarán las fases fenológicas del cultivo. Finalmente, Läderach en 2011 cuantifica en el estado de Veracruz el impacto del cambio climático en la idoneidad de la tierra para producir café con ciertas características de acidez. Un aspecto importante de este tipo de estudios es la precisión de la información climática. Comúnmente se ha utilizado la base de datos de Worldclim que es una de las de mayor resolución existente, sin embargo, como afirman Hijmans et al (2005) la alta resolución de sus interpolaciones no implica que la calidad de los datos sea alta en todos los lugares debido a que en algunas regiones se usó un menor número de estaciones meteorológicas, lo que provoca que no se capte adecuadamente la variabilidad espacial. Sin embargo, existen trabajos más recientes en México (Conde et al 2011; Cuervo-Robayo et al 2013, Fernández et al. 2014) en los que se utilizaron los registros de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional para generar la climatología base y nuevos escenarios de cambio climático a muy alta resolución espacial y que incorporan el efecto topográfico, consiguiendo mejorar la calidad de los datos de WorldClim.

#### 2.4. Modelos de nicho ecológico y café

El enfoque de nicho ecológico supone que una especie, en este caso el café de alta calidad, se puede encontrar en, o introducir a, lugares donde las condiciones del ambiente son adecuadas. Suponiendo que el café de alta calidad se produce en regiones con aptitud climática idónea, sería posible estimar la aptitud climática a partir del modelo de nicho, solo utilizando variables climáticas.

En los últimos años se han venido usando cada vez más ciertas técnicas matemáticas-estadísticas (modelos) para estimar el nicho ecológico en los esfuerzos de mapear zonas de óptimo crecimiento de cultivos en general. Estas herramientas permiten estudiar la distribución geográfica de las especies e identificar aquellos factores que las limitan (Peterson et al 2011). En general, los modelos de nicho ecológico relacionan datos de presencia de las especies con una serie de parámetros ambientales para generar una estimación de la distribución potencial de una especie con base en las condiciones climáticas y otras variables físicas que favorecen la presencia de la especie. Estos métodos para identificar las áreas de distribución, son conocidos como modelos de distribución de especies, como herramientas útiles que ayudan a identificar dónde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requerimientos ecológicos adecuados o benéficos para las especies en estudio (Pearson 2007). En las últimas dos décadas se han desarrollado varios modelos que ayudan a comprender algunas de las dimensiones ambientales y ecológicas en las que se encuentra un taxón, principalmente aquellas relacionadas con factores abióticos (precipitación, temperatura, suelos, entre otras). El desarrollo de algoritmos matemáticos permite, cada vez más, modelar con mayor precisión el nicho ecológico.

Entre los diferentes algoritmos de modelado, podemos mencionar principalmente a BIOCLIM (Busby 1991), GARP (Stockwell y Peters 1999) y Maxent (Phillips et al 2006). Cada uno de ellos presenta un acercamiento diferente al problema del modelado del nicho ecológico, y han sido utilizados para predecir la idoneidad de áreas para cultivos. Sin embargo, Maxent se utiliza con mayor frecuencia en estudios para la zonificación de cultivos un mejor crecimiento y rendimiento, por ejemplo, el aguacate en Michoacán, México (Campos, 2012), maracuyá, granadilla o granada china y gulupa en Colombia (Ocampo, et al 2011) y de la castaña o nuez de Brasil en Perú (Consorcio Quiri – Shiwi, 2016). Además, Maxent ha sido el de mayor utilización para el análisis de distribución potencial del cultivo de café (Argotty, 2015; Oriana et al 2015; Läderach et al 2012; Morales et al 2011; Läderach et al 2016), ya que es considerado como el modelo de mayor precisión (Elith et al 2006; Hijmans y Graham, 2006) y por ende útil en generar información relevante para la toma de decisiones a nivel finca.

Otro uso de los modelos de distribución de especies es el evaluar el impacto del cambio climático sobre el espacio geográfico de las especies (Jeschke & Strayer, 2008; Peterson, 2006). Este tipo de modelado emplea climas futuros predichos con base en la combinación de modelos de circulación general atmósfera-océano y reportes de diferentes escenarios. (Real et al 2010). Maxent ha sido utilizado principalmente para evaluar los posibles impactos del cambio climático

sobre la superficie dedicada actualmente al cultivo de café. Estos estudios utilizan los datos de clima actual y de ubicación del cultivo de café como insumo para Maxent y son proyectados a diferentes escenarios de cambio climático, no obstante que, se han enfocado en los efectos que tendrá sobre la productividad. Sin embargo es escaso el uso que ha tenido en determinar zonas óptimas para la producción de café de alta calidad, y aún más, con datos de catacaciones como insumo para la generación de modelos de idoneidad. Algunos ejemplos de su uso con este cultivo incluyen: evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático y desarrollar estrategias de adaptación para familias de cafeteros en Mesoamérica como parte de un marco integrado (Baca et al 2014); escenarios del impacto del cambio climático en zonas cafetaleras de El Salvador (Länderach et al 2012); posibles impactos del cambio climático sobre poblaciones silvestres de *Coffea arabica* (Davis et al 2012); y en el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático en zonas con producción del café (Länderach et al 2016)

El café es el cultivo más importante en la zona montañosa del centro del estado de Veracruz y ha sido un referente a nivel nacional, reconocido y apreciado por la calidad de su café y perfiles de taza diferenciados, además de ocupar el segundo lugar en producción. Por otro lado, las fincas de café de sombra comprenden la zona boscosa más importante en esta región, clave para minimizar los efectos de la fragmentación, además fomenta la conectividad y la conservación de la biodiversidad (Cabrera García, 2015). Dada la importancia de este cultivo en el estado, se requiere de un conocimiento profundo que proporcione a los productores una aproximación a los tipos de afectaciones sobre producción y calidad que pueden presentarse en condiciones de los posibles escenarios climáticos futuros. Por lo que han llevado a cabo en diferentes proyecciones de tiempo a futuro (2020, 2050, 2080). Un ejemplo es la utilización de modelos econométricos por Gay (2004) para evaluar los efectos de la variabilidad climática y económica utilizando datos de temperatura, precipitación y salario de los productores. Los resultados obtenidos pronostican una disminución entre 73 y 78% de la producción para 2050, por lo que concluye que sería arriesgado ignorar los efectos del cambio climático para la producción de café en Veracruz.

El reto principal de esta investigación es utilizar modelos y mapas de mejor resolución y mayor calidad en los datos con la finalidad de lograr la identificación de regiones cafetaleras, utilizando métodos científicos que den resultados confiables y consistentes para la toma de decisiones y el desarrollo de los nichos agroecológicos con potencial para la obtención de café de especialidad en el segmento de calidad en el centro del estado de Veracruz. Se incluye también los más recientes escenarios de cambio climático para poder evaluar sus posibles impactos sobre la producción de

este importante cultivo para el futuro cercano (2039) en dos diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: escenario de emisiones bajas (RCP 4.8) y escenario de emisiones altas (RCP 8.5), con el fin de señalar al sector el rango de posibles impactos esperados si productores y tomadores de decisiones no actúan con firmeza y con el fin de anticipar, y no simplemente reaccionar, ante este reto.

### **3. Objetivos e Hipótesis**

#### **3.1. Objetivo general:**

Delimitar regiones con alto potencial para producir café de alta calidad y perfiles de taza diferenciados en la zona centro del estado de Veracruz, por medio de técnicas geoestadísticas, multivariadas y de modelado de nicho ecológico, evaluando los posibles impactos del cambio climático (CC)..

#### **3.2. Objetivos particulares:**

1. Determinar zonas con alto potencial de producción de café de alta calidad ( $> 83$  puntos en la escala del SCA), usando como variables cuantitativas de respuesta los resultados de las evaluaciones de calidad de cataciones de café.
2. Determinar zonas de alto potencial para producir café con perfiles de taza diferenciados, usando variables cualitativas de cataciones de café
3. Identificar los factores climáticos de mayor influencia en las características sensoriales del café.
4. Evaluar el impacto potencial del CC sobre la producción de cafés de alta calidad y perfiles de taza diferenciados, usando dos escenarios de CC para 2039.
5. Identificar, a través de la relación entre los mapas de calidad y el perfil de taza, las regiones cafetaleras, que podrían ser sujetos a cambios positivos o negativos en la calidad de café producido en el futuro, debido al CC.

### 3.3. Hipótesis:

- H1. Existen áreas de alto potencial para producir café de alta calidad, claramente identificables y que estarán distribuidas de manera homogénea debido a las condiciones ambientales en las regiones cafetaleras de la zona centro del estado de Veracruz.
- H2. Existen áreas dentro de las regiones cafetaleras con perfiles de taza diferenciados claramente identificables. Estas áreas no estarán distribuidas de manera homogénea en la zona centro del estado de Veracruz.
- H3. Existen tanto factores climáticos como ambientales que son identificables y que tendrán mayor influencia en los modelos basados en las características sensoriales del café.
- H4. El impacto del CC no será homogéneo en las regiones de mayor idoneidad para producción de café de alta calidad o perfiles de taza distintos teniendo impactos peores en zonas altitudinales bajas. En general, las zonas para la producción de alta calidad del café podrían reducirse por el CC.

## **4. Materiales y métodos**

### **4.1. Área de estudio**

La investigación se llevó a cabo en el territorio de la zona centro del estado de Veracruz, conformada por las regiones cafetaleras de Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba, Ixhuatlán, Tezonapa y Zongolica (Figura 2). Estas regiones fueron delimitadas por el Centro Agroecológico del Café, A.C. (CAFECOL) con base principalmente en límites municipales y características agroclimáticas (temperatura y precipitación). En el Cuadro 5 se muestran las principales características climáticas y la superficie de cada una de estas regiones. La zona centro del estado ha sido reconocida como la segunda en importancia a nivel nacional para la producción de café (Pineda et. al. 2005) y sus productores han sido ganadores del Certamen Taza de Excelencia durante seis de los últimos siete años (2012-2018). Es delimitado en la parte norte por el municipio de Misantla cerca de los 19°58' N y en la parte sur por el municipio de Zongolica cerca de los 18°32'N y comprende altitudes que van desde los 300 a 1500 m. Existen condiciones climáticas contrastantes a lo largo de la región, incluyendo lluvioso tropical, seco y templado seco. Cuenta con una precipitación promedio anual de 1717 mm, y temperaturas medias anuales de 18 a 25°C. En esta zona se encuentran alrededor de 60,000 productores y 100,000 ha de cultivos (Censo Cafetalero ASERCA-SAGARPA, 1992), lo que representa el 90% de los productores y 93% de la superficie cafetalera del estado de Veracruz. Siendo el café uno de los principales productos de origen agrícola que se comercializan en los mercados internacionales y a menudo supone una gran contribución a los rubros de exportación de las regiones productoras (SAGARPA, 2015), es el cultivo que más aporte realiza a la conservación de los ecosistemas y a la producción de servicios ambientales en la zona centro del estado (Manson et al 2008). Sin embargo, Veracruz es uno de los estados más vulnerables al cambio climático (Gay et al 2006), dada su ubicación en el Golfo de México y la entrada de tormentas tropicales cada vez más fuertes, así como al hecho de que más del 72% de la superficie estatal ha sido transformada para usos agropecuarios y urbanos, lo cual amplifica los impactos de dichas tormentas (Tejeda et al 2008).

Cuadro 1. Características agroclimáticas de las regiones cafetaleras en la zona centro del estado de Veracruz

Región	Superficie total (ha)	Superficie cafetalera (ha)	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
Atzalan	205,943.85	8,387.37	100 - 1400	1400 - 2000	18 - 23
Misantla	198,853.85	9,851.68	350 - 1350	1400 - 1600	19 - 23
Coatepec	306,266.55	18,670.00	700 - 1150	900 - 1800	17 - 22
Córdoba	152,016.55	19,634.89	340 - 1556	1720 - 2100	17 - 24
Huatusco	121,654.04	21,697.40	600 - 1550	1000 - 2000	17 - 24
Tezonapa	73,951.71	16,041.81	300 - 1380	1500 - 3000	20 - 25
Zongolica	60,686.42	8,414.27	300 - 1470	1500 - 2400	18 - 25
<b>TOTAL</b>	<b>1,119,372.97</b>	<b>102,697.42</b>			

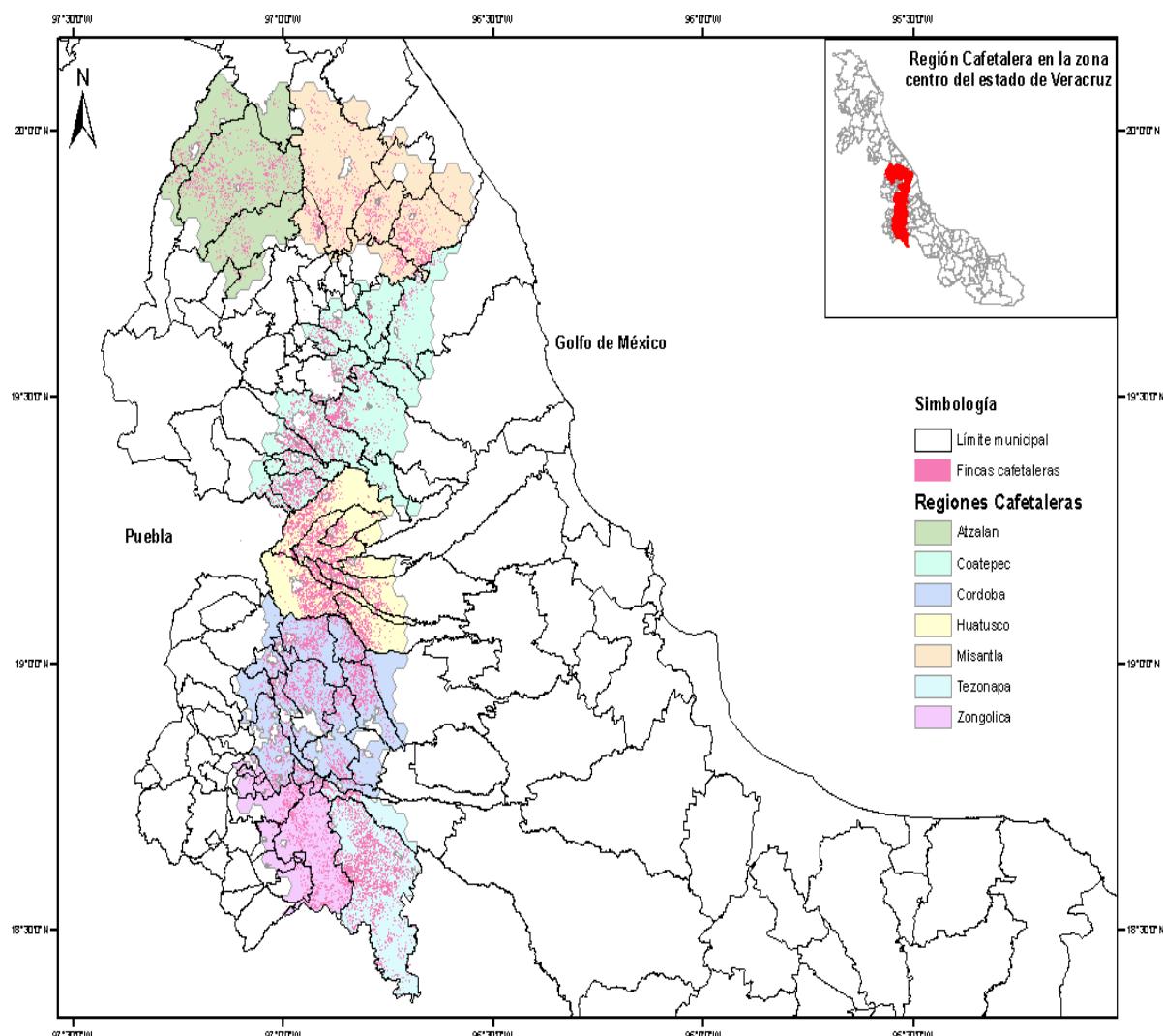


Figura 2. Mapa de las siete regiones cafetaleras en la zona centro del estado de Veracruz, los municipios asociados y las parcelas de café ubicadas en ellas.

#### 4.2. Proceso de modelado de nicho ecológico para producción de café de alta calidad y perfiles de taza distintos

Para este estudio se siguió una versión modificada de los procedimientos establecidos para generar los modelos de distribución de especies (Fig. 3), que se puede resumir en tres pasos principales: 1) la recopilación de datos de presencia de café de alta calidad resultado de catacaciones como variable de respuesta, y la obtención de capas de las variables ambientales en el área de estudio como factores independientes para los análisis, 2) el ajuste de los modelos de predicción de idoneidad de presencia del café de alta calidad, y 3) la predicción de la idoneidad de presencia del café de alta calidad y cambios en su distribución histórica/actual y bajo diferentes escenarios de cambio climático.

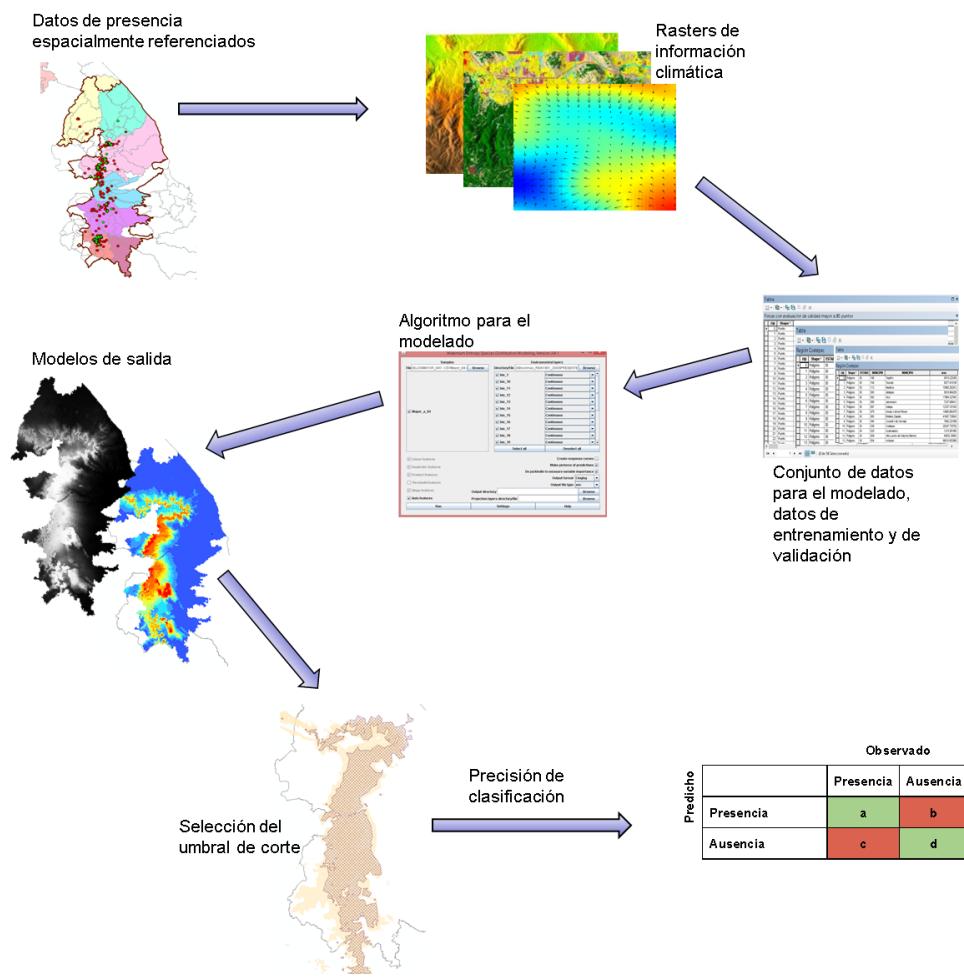


Figura 3. Diagrama de trabajo en el proceso de modelación de zonas de alta calidad del café en el centro del estado de Veracruz usando MaxEnt.

#### 4.2.1 Obtención de datos

La primera parte del proceso de modelado consiste en la preparación de los datos sobre los que se va a trabajar. Este proceso requiere de la depuración de los datos de presencia del cultivo de interés, en este caso café de alta calidad, sin errores de georreferenciación, así como la recopilación de información ambiental informativa en cuanto a variables limitantes del nicho ecológico.

##### 4.2.1.1 Datos de distribución

Los datos para el análisis de la calidad del café, así como los descriptores de perfiles de taza se obtuvieron de la base de datos de catas de café de fincas de la zona centro del estado de Veracruz, con la que actualmente cuenta el Centro Agroecológico del Café A.C. (CAFECOL). Esta base de datos contiene un aproximado de 1,198 cataciones de diferentes métodos de evaluación correspondientes al estado de Veracruz, distribuidas de la siguiente manera en las regiones cafetaleras: 42 muestras de Atzalan, 408 de Coatepec, 139 de Córdoba, 115 de Huatusco, 17 de Misantla, 20 de Tezonapa y 457 de Zongolica. De éstas se hizo una depuración inicial, seleccionando aquellas generadas a través del protocolo de la Asociación de Cafés Especiales (SCA por sus siglas en inglés), y dejando 512 registros sin huecos de información. Dada la amplia distribución mundial de la Licencia Q-Grader de la SCA, la selección de este método permitirá comparaciones más amplias de los resultados presentados, además de reducir la variación en ellos debido a la mezcla de diferentes métodos de catación.

En las cataciones del SCA se evalúan 10 atributos en tres pasos, para 5 tazas por muestra: 1) se evalúa la fragancia del café en seco; 2) se toma la muestra cuando su temperatura estaba entre 60°C y 70°C, y 3) se prueba la muestra cuando tenía una temperatura aproximada a la temperatura ambiente. Mediante este protocolo con un panel de tres catadores, se evaluaron importantes atributos del café como: fragancia / aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzura, defectos y puntaje total (Cuadro 2). Los atributos de sabor son puntajes positivos de calidad, mientras que los defectos son puntajes negativos que denotan sensaciones desagradables de sabor. El puntaje general se basa en la experiencia de sabor individual del catador. Estos atributos son clasificados en una escala de 16 puntos que representa los niveles de calidad con un incremento de un cuarto de punto entre valores numéricos de 6 a 9 (SCAA, 2015).

Cuadro 2. Descripción de los atributos sensoriales de acuerdo con el protocolo de catación SCAA (Fernández 2015).

Atributo	Definición	Escala de evaluación
Fragancia/ aroma	Es la propiedad que se percibe mediante la inhalación por la cavidad nasal u oral del café en seco (fragancia) y una vez que se adiciona agua (aroma)	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Sabor	Impresión combinada de todas las sensaciones gustativas y los aromas retro nasales que van de la boca a la nariz.	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Sabor residual, resabio o posgusto	Cualidades positivas del gusto (sabor y aroma) que emanan de la parte posterior del paladar y permanecen después de que el café ha sido expulsado o tragado.	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Acidez	Acidez del café. Contribuye a la vivacidad del café, dulzor y al carácter de fruta fresca.	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Cuerpo	Es la sensación que se describe generalmente como textura del líquido en la boca.	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Uniformidad	Se refiere al sabor constante de las diferentes tazas de la misma muestra.	Es la suma de la evaluación individual de las tazas: 2 puntos si es uniforme 0 puntos si no es uniforme Máximo 10 puntos
Balance	Consistencia, es la forma en la que se complementan o contrastan los atributos de sabor, sabor residual, acidez y cuerpo	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Taza Limpia	Ausencia de impresiones negativas desde la primera hasta la última ingestión de café.	Es la suma de la evaluación individual de las tazas: 2 puntos si es uniforme 0 puntos si no es uniforme Máximo 10 puntos
Dulzura	Sensación de dulzor en el café	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Puntaje del catador	Calificación integrada de la muestra según como la percibe el catador	6 a 10, en intervalos de 0.25 puntos
Defectos	Aspectos negativos o mal sabor que restan calidad al café	0 a -20. Se restan 2 puntos por cada taza defectuosa si es ligero y 4 si es muy intenso.
Puntuación total	Suma total de los puntajes de cada uno de los atributos menos los defectos.	Calificación máxima 100 puntos

Teóricamente la escala de evaluación anterior varía desde un valor mínimo de 0 hasta un valor máximo de 10 puntos. La puntuación final se calcula sumando primero las puntuaciones individuales dadas a cada uno de los atributos para obtener una “puntuación total” y después los defectos se restan de la puntuación total para llegar a una “puntuación final”.

En el Cuadro 3 se muestra una forma de describir el rango de calidad del café de acuerdo con la puntuación final que ha mostrado ser significativa.

Cuadro 3. Puntaje en taza y clasificación final de cafés según la SCAA (2015).

Puntaje final	Descripción de la especialidad	Clasificación
95 – 100	Ejemplar o único	Especialidad Súper Premium
90 – 94	Extraordinario	Especialidad Premium
85 – 89	Excelente	Especialidad
80 – 84	Muy bueno	Premium
75 – 79	Bueno	Calidad Usualmente Buena
70 – 74	Pasable	Calidad Media
60 – 70		Grado de Mercado
50 – 60		Comercial
40 - 50		Debajo de grado
< 40		Fuera de grado

Buena parte de estos atributos de calidad dependen de algunos factores inherentes a la planta y al entorno natural en que se cultiva (aroma, sabor, sabor residual, cuerpo, acidez), y de otros asociados con la manera como el caficultor realiza el proceso post cosecha (taza limpia, uniformidad, defectos). Entre los elementos naturales que determinan los atributos de calidad del café sobresalen la especie y variedad, la altitud y la latitud en que se encuentra el cultivo, que determinan la temperatura promedio, así como las características de la tierra y del clima (Escarraman et al 2007). Esos atributos pueden también ser modificados por los procesos de producción del café, que pueden potenciarlos o afectarlos negativamente.

Para el caso de los perfiles descriptivos de taza existe un catálogo de descriptores basado en Lenoir y Guermonprez (1997). Los descriptores se agrupan en categorías llamados subgrupos descriptores y se clasifican en cuatro grupos de aromas (enzimáticos, caramelización, destilación seca y contaminaciones) que abarcan doce subgrupos: florales, frutales, vegetales, caramelos, chocolate, nueces, especiados, pirolíticos, resinosos, fermentados, fenólicos y terrosos (ver Cuadro 4).

Cuadro 4. Terminología utilizada para describir la fragancia, aroma y sabor de perfiles de café en un proceso de catación Q (SCAA 2015).

<b>Grupo</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Descriptor</b>
<b>Enzimáticos</b>	Florales	Rosa de Damasco
		Flor de cafeto
		Miel
	Vegetales	Papa
		Pepino
		Chícharo
	Frutales	Limón
		Chabacano
		Manzana
		Naranja
<b>Caramelizados</b>	Caramelos	Mantequilla
		Cacahuate tostado
		Caramelo
	Chocolates	Chocolate
		Vainilla
		Pan tostado
	Nueces	Almendras tostadas
		Nuez de Castilla
		Avellanas tostadas
<b>Destilación seca</b>	Especiados	Semilla de cilantro
		Pimienta negra
		Clavo de olor
		Canela
		Anís
	Pirolíticos	Malta
		Café tostado
		Tabaco
	Resinosos	Grosella negra
		Miel de maple
		Cedro
		Menta
<b>Contaminaciones</b>	Fermentados	Arroz basmati
		Pulpa de café
		Carne de res cocida
	Fenólicos	Humo
		Medicinal
		Hule
	Terrosos	Terroso
		Paja
		Cuero

Otra fase de depuración de los datos consistió en asegurar que la información sobre los registros de las fincas cafetaleras de donde proviene el café sometido a catación y que nos interesa modelar, se pudiera ubicar espacialmente, permitiendo así relacionarla con los datos ambientales recabados para el sitio donde se ubica el cultivo. De los 512 registros correspondientes al estado de Veracruz que fueron evaluados mediante protocolo SCA, se logró obtener la referencia geográfica de 448 registros (87.5 % de los datos) que corresponden al mismo número de fincas. La información con la que se cuenta corresponde a 111 localidades de 37 municipios, cuya distribución se muestra en la Figura 4.

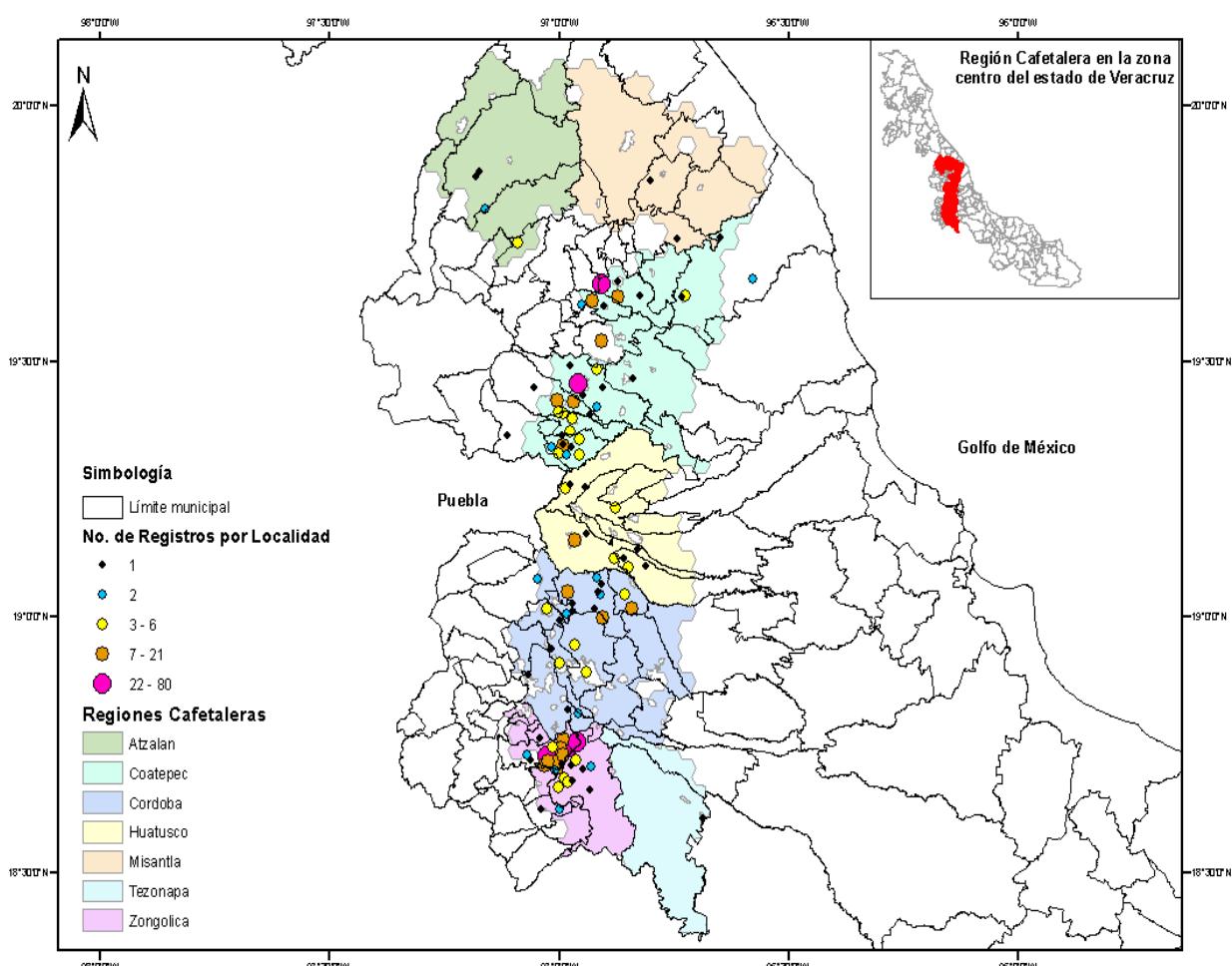


Figura 4. Distribución de número de muestras de cataciones de café por localidad en la zona centro del Estado de Veracruz

La referencia geográfica a nivel de finca se obtuvo de diferentes maneras: 66% de los datos (338 fincas) se georreferenció mediante la revisión del censo cafetalero del estado de Veracruz, con el cual se ubicaron las parcelas cuando los datos de nombre de la finca, localidad, municipio

y nombre del productor coincidían con los datos de la muestra sometida a catación, el 10% (50 fincas) de los datos referenciados se obtuvo por contacto directo con el productor o intermediario que sometió a evaluación la muestra de café, y finalmente, 12% (60 fincas) se obtuvo con el apoyo de la Fundación Fondo para la Paz, I.A.P., misma que colabora con productores en el municipio de Tequila, Veracruz.

En la siguiente fase de depuración, de los 448 datos restantes evaluamos la variación en las cataciones Q obtenidas de diferentes años (Cuadro 5), e involucran diferentes variedades (Cuadro 6 y Figura 5) y procesos de beneficiado (Cuadro 7 y Figura 6).

Cuadro 5. Distribución temporal de las muestras de café de la zona centro del estado de Veracruz y que fueron sometidas a evaluación en el Centro Agroecológico del Café (CAFECOL) por catadores Q.

Año	No. Muestras	No. Muestras georeferenciadas
2012	91	50
2013	166	147
2014	3	3
2015	93	93
2016	121	120
2017	38	35
<b>TOTAL</b>	<b>512</b>	<b>448</b>

Cuadro 6. Principales variedades de café de la zona centro del estado de Veracruz y sometidas a evaluación en CAFECOL.

Variedad	No. Muestras	No. Muestras georeferenciadas
Típica	314	251
Bourbon	93	93
Caturra	45	45
Garnica	22	26
Mundo Novo	12	12
Pacamara	5	2
Catimor	19	18
Geisha	2	1
<b>TOTAL</b>	<b>512</b>	<b>448</b>

Cuadro 7. Principales procesos de beneficiado en las muestras de café sometidas a evaluación en CAFECOL.

Proceso	No. Muestras	No. Muestras georeferenciadas
Natural	62	61
Desmucilaginado	70	18
Enmielado	18	14
Lavado	362	355
<b>TOTAL</b>	<b>512</b>	<b>448</b>

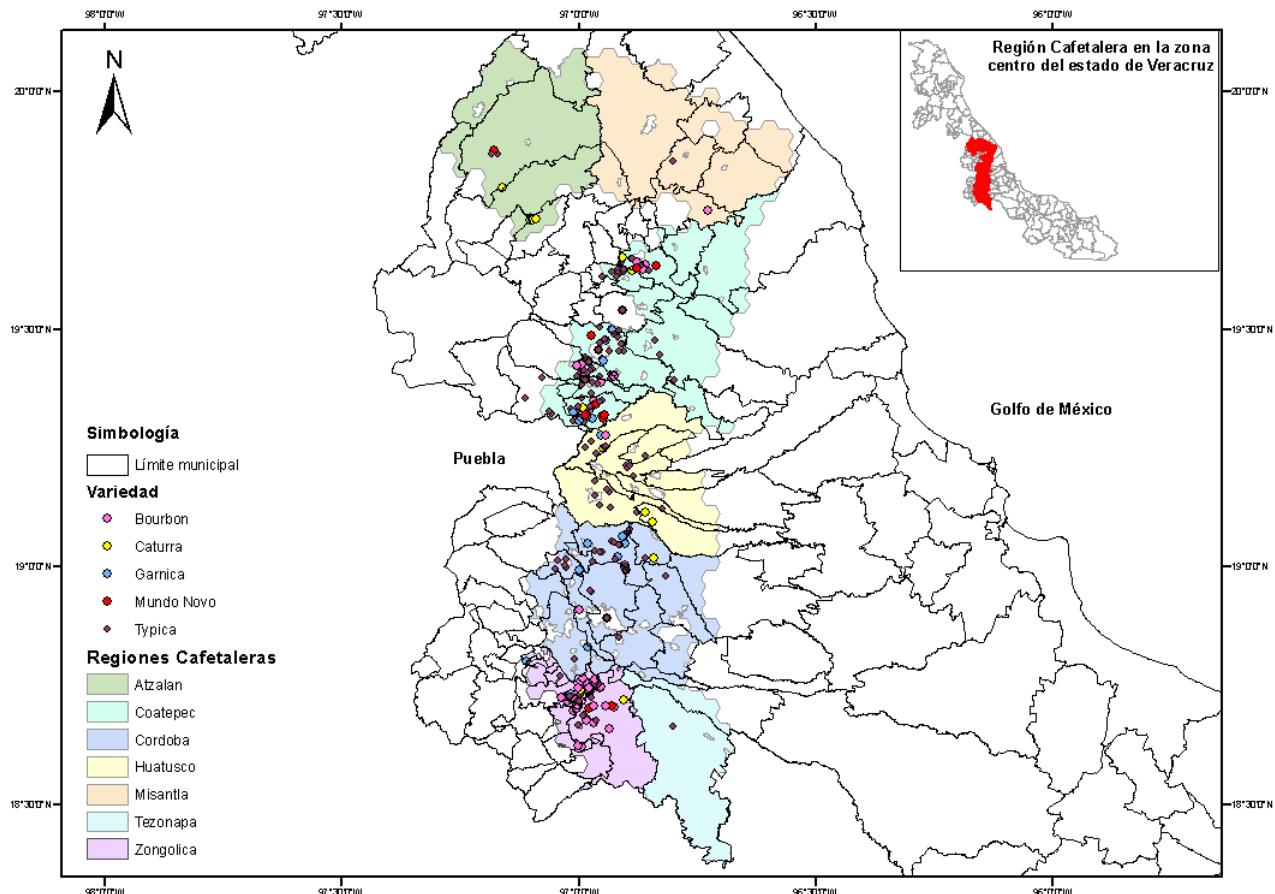


Figura 5. Distribución de variedades de café sometidas a evaluación, en las regiones cafetaleras ubicadas en la zona centro del estado de Veracruz

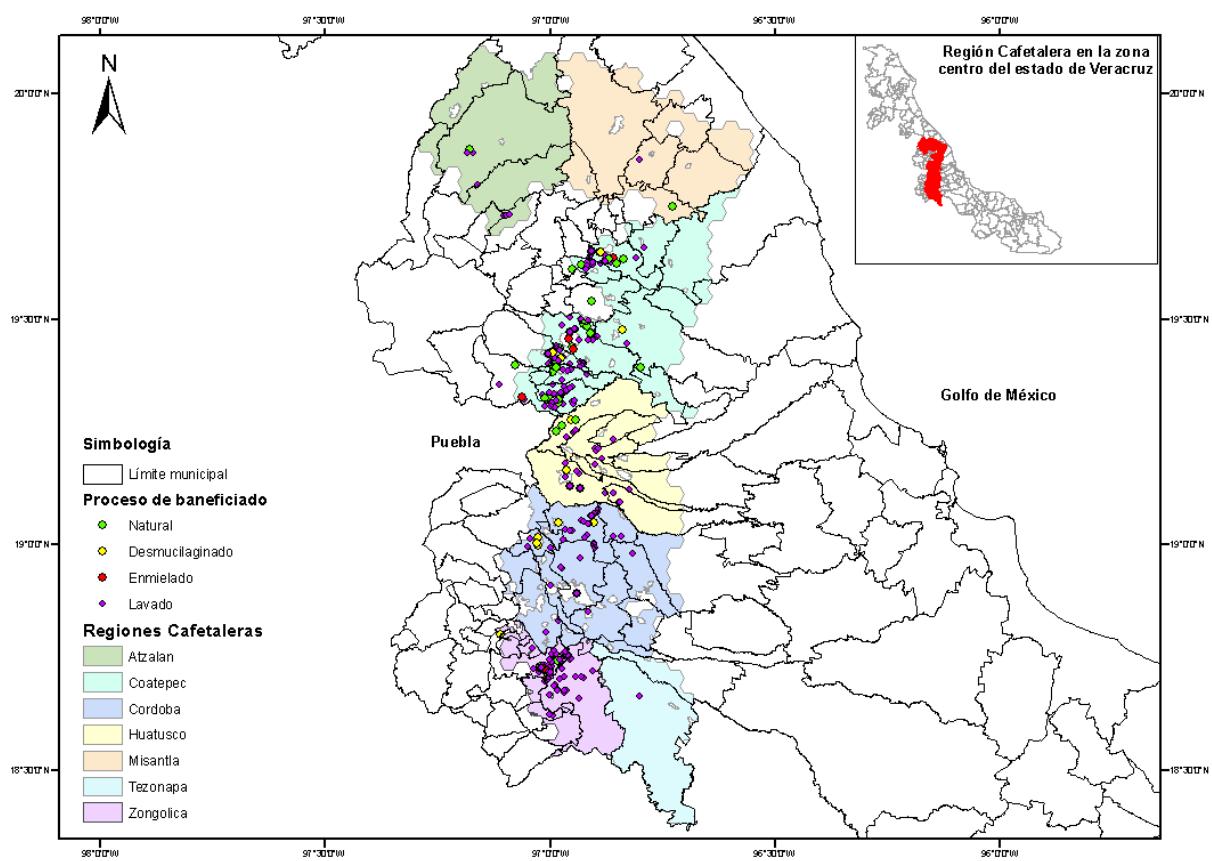


Figura 6. Distribución de los principales procesos de beneficiado de café sometidas a evaluación, en la región cafetalera del centro del estado de Veracruz.

Para esta fase de depuración se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe un efecto de las variedades y el método de procesamiento sobre las evaluaciones de calidad de café. Decidimos que el año cuando se realizó la catación no debe haber afectado la calificación recibida por la muestra. El análisis se realizó por separado para cada uno de los atributos: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance y puntaje del catador, considerando un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Estos análisis mostraron que hubo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) de las variedades sobre las evaluaciones de las variables organolépticas, excepto en el puntaje del catador ( $p = 0.081$ ). Las medias de los valores de los atributos con efectos significativos correspondientes a las variedades se compararon usando la prueba post-hoc de Tukey para determinar cuáles difieren entre sí. No se observó un efecto significativo del método de procesamiento en los puntajes de los atributos.

La variedad Geisha tuvo una evaluación de calidad significativamente más alto que el resto de las variedades, por lo que se decidió eliminar de la base de datos los registros correspondientes a esta variedad reduciendo el tamaño de muestra de 448 a 447 registros. En cuanto a los tipos de procesos de beneficiados del café, el proceso enmielado es el que tiene una diferencia estadísticamente significativa ( $p = 0.05161$ ) con mejores evaluaciones en algunas variables organolépticas, por ejemplo, dulzor. Sin embargo, no se tiene evidencia suficiente para determinar si esta diferencia es importante por lo que se decidió mantener las muestras con este tipo de beneficiado en los análisis.

Para determinar cuáles son las variables que más influyen en el puntaje de catación se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las evaluaciones de las variables organolépticas fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, dulzura, taza limpia y puntaje del catador, usando correlaciones de Pearson. Con este análisis se encontró que la variabilidad de los datos puede explicarse con el primer componente que reúnen el 64.04% de la variabilidad total y se conforman de la siguiente manera:

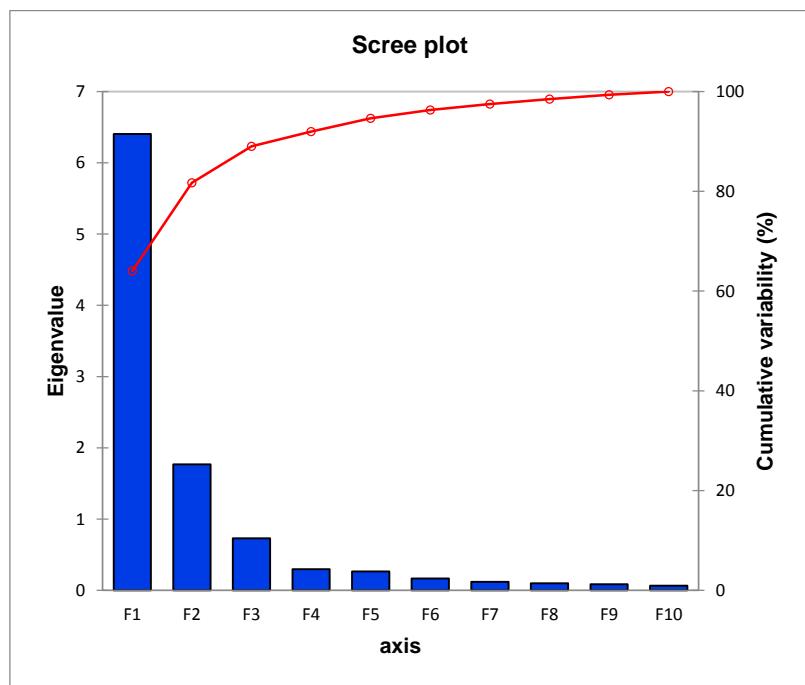


Figura 7. Gráfico de sedimentación (scree pot) de los autovalores (eigenvalue) de cada factor (barras azules) y la varianza acumulada (cumulative variability) del total de factores que conforman el análisis (línea roja).

El gráfico de sedimentación (scree pot) se utiliza principalmente para determinar cuántos factores deben retenerse para el análisis. Típicamente el gráfico muestra la clara ruptura entre la pronunciada pendiente de los factores más importantes y el descenso gradual de los restantes. Así, puede observarse que la componente uno (F1) recoge 64.04% de la variabilidad, mientras que la componente F2 explica 17.67% de la variabilidad total y por eso no fue retenido en el análisis.

En cuanto a la relación de los factores con cada uno de los atributos analizados, el factor F1 tiene una fuerte relación positiva con los atributos sabor, sabor residual, puntaje del catador, balance, acidez, cuerpo y fragancia/aroma, que en conjunto tienen una contribución del 91.9% hacia este factor, por otro lado, el componente F2 tiene una relación negativa con estos mismos atributos y positiva con taza limpia, uniformidad y dulzura. Siendo taza limpia y dulzura las variables de mayor aporte a este eje (Figura 8).

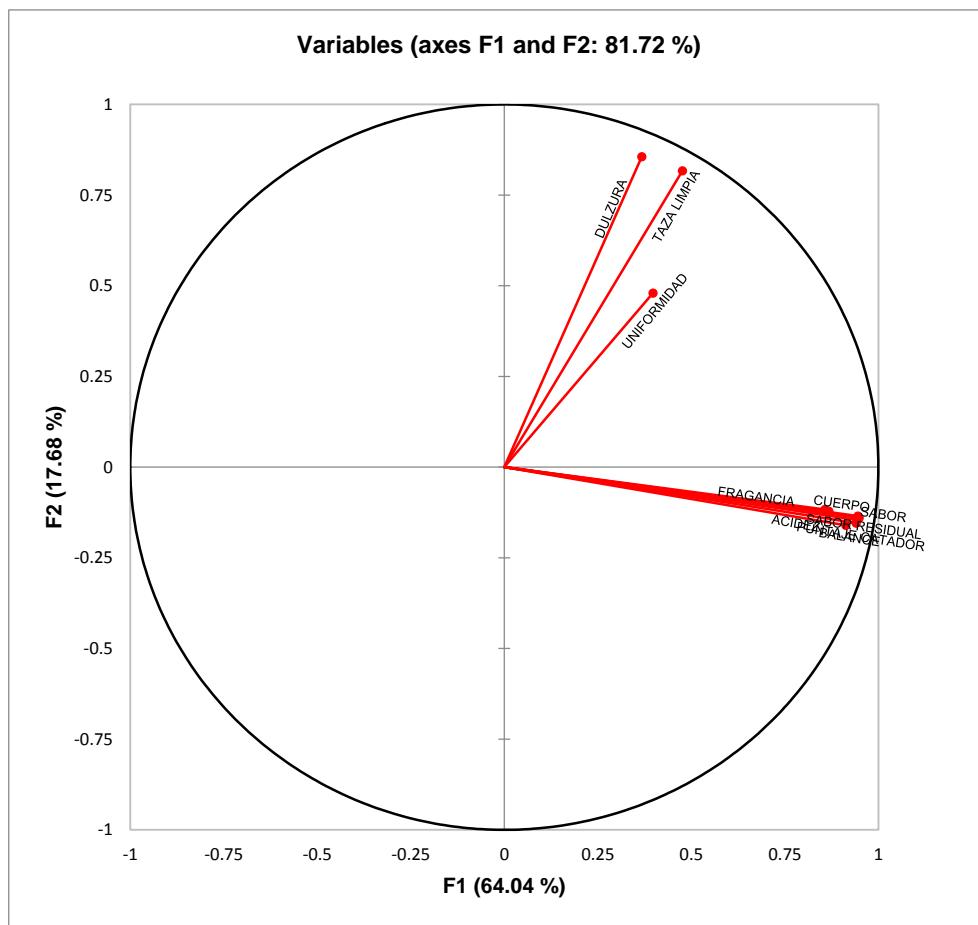


Figura 8. Correlación entre las variables organolépticas de café y los dos principales factores generados por un análisis de componentes principales.

Como parte del proceso de depuración, este análisis fue de utilidad para determinar que las variables de mayor importancia para definir el puntaje en la evaluación de calidad del café a través de procesos de catación son: sabor, sabor residual, acidez, cuerpo y fragancia/aroma, que se consideran características inherentes a la calidad de la planta y las condiciones climáticas de su entorno, lo que representa la calidad intrínseca del café, así como balance y puntaje del catador que representan la impresión que en conjunto tienen estas variables sobre quien realiza la catación. Estos atributos mostraron que los puntajes de los atributos de catación están significativa y positivamente correlacionados ( $r^2$  entre 0.713 y 0.924), es decir, los cafés de mayor puntuación tienden a presentar puntajes más altos en estos atributos y viceversa.

Con estos resultados, y como último filtro de depuración, se decidió conservar aquellos registros cuya evaluación de calidad es igual o mayor a 83 puntos (que tienen puntuaciones altas en los atributos que representan la calidad intrínseca del café) para generar los modelos de zonas de producción de café de especialidad, reduciendo así el tamaño de la muestra de 447 a 139 registros de cataciones para análisis. Los cafés con este puntaje se describen como muy buenos y pueden clasificarse como cafés de especialidad según el Cuadro de clasificación de la SCA, libres de una gran variación en la calidad debido a factores fuera del alcance de este estudio, como el manejo de la nutrición en la finca, así como los procesos de cosecha y el beneficiado y más afines a variables ambientales como determinantes de la calidad intrínseca del café. La distribución geográfica de los registros finales seleccionados en la zona centro del estado de Veracruz se muestra en la Figura 9.

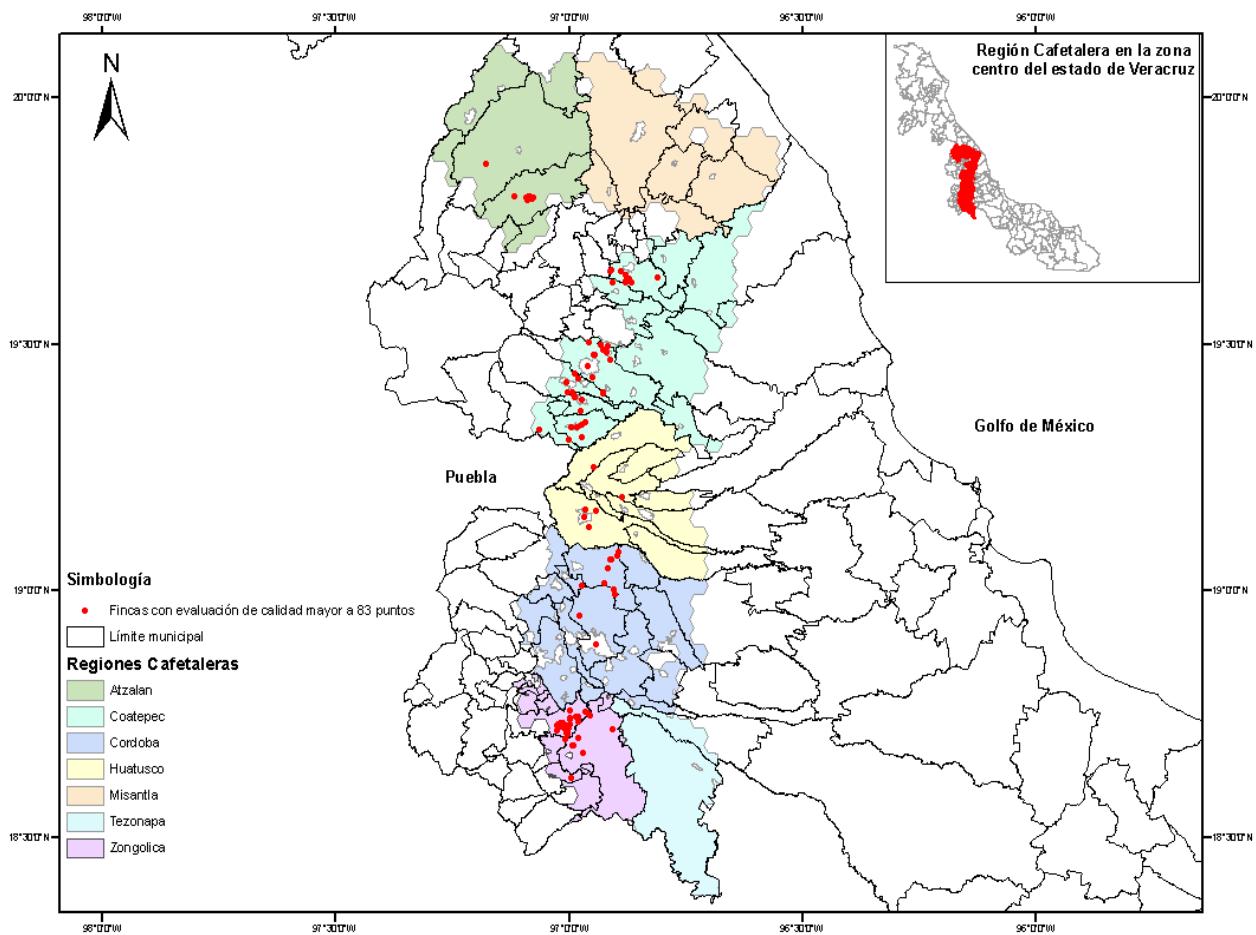


Figura 9. Distribución de las muestras de café sometidas a evaluación, en la región cafetalera del centro del estado de Veracruz.

Es importante mencionar que, para tener mayor representatividad de muestras y evitar sesgos en los modelos en la región de Atzalan, debido a los pocos datos disponibles de esta zona en la base original, durante el mes de marzo de 2018 se hizo un recorrido para la colecta de muestras directamente con productores de la zona para su posterior evaluación en el laboratorio de catación de CAFECOL. De esta manera se obtuvieron un total de 13 muestras adicionales, de las cuales seis obtuvieron un puntaje de evaluación igual o mayor a 83 puntos, mismos que ya están incluidos en la base depurada de 139 registros.

#### 4.2.1.2 Variables ambientales

##### ➤ Datos de clima histórico

Para construir los modelos de distribución, además de los registros de presencia de catacaciones de cafés sobresalientes en términos de calidad, fue necesario obtener capas de información ambiental del área de estudio. Los datos climáticos para este estudio se obtuvieron de las superficies climáticas de México generadas por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, a través de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), disponible en [www.uniatmos.atmosfera.unam.mx](http://www.uniatmos.atmosfera.unam.mx). Esta información proviene de los datos climatológicos de la base diaria del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo de 1902-2011, que cuenta con 5,227 estaciones con datos de temperatura máxima, 5,225 con temperatura mínima y 5,320 con precipitación. Las variables se encuentran en formato raster (ASCII) con una resolución espacial de 30 arcos de segundo por píxel (aproximadamente 1 km<sup>2</sup>), generadas a partir de la interpolación de los datos usando un sistema de referencia geográfico (latitud/longitud) y datum WGS84.

Dentro de esta base de datos se recogen también parámetros bioclimáticos que se calcularon por estación a partir de la base climatológica diaria 1902-2011 del Servicio Meteorológico Nacional conforme a la metodología ANUCLIM (<http://www.rforge.net/doc/packages/climates/html/bioclim.html>) también utilizada en WorldClim (<http://www.worldclim.org/bioclim>) (ver Cuadro 8). Dichos parámetros bioclimáticos son de utilidad para estudiar la relación entre el clima y la distribución de los seres vivos y fueron en origen creadas para representar tendencias, estacionalidad y factores ambientales extremos o limitantes (Busby 1991).

Cuadro 8. Descripción de las variables bioclimáticas generadas por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM) utilizando la base climatológica diaria 1902-2011 del Servicio Meteorológico Nacional conforme a la metodología ANUCLIM.

Código	Nombre
Bio01	Temperatura media anual
Bio02	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima)
Bio03	Isotermalidad ((Bio2 / Bio7) * 100)
Bio04	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)
Bio05	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio06	Temperatura mínima del mes más frío
Bio07	Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6)
Bio08	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio09	Temperatura media del trimestre más seco
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio12	Precipitación total anual
Bio13	Precipitación del mes más húmedo
Bio14	Precipitación del mes más seco
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio19	Precipitación del trimestre más frío

#### ➤ Datos de clima futuro

En este trabajo se usó como fuente de datos climáticos el horizonte temporal del futuro cercano (2039), ya que es más confiable y relevante para la toma de decisiones de productores versus horizontes temporales mayores. Estas capas raster consideran dos forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones (RCP, por sus siglas en inglés) que representan las concentraciones contrastantes (bajas y altas) de gases de efecto invernadero del ensamble REA (Reliability Ensemble Averaging) de 15 Modelos de Circulación General (MGC) del estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional” (INECC, 2012) con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de 30 arcos de segundo por píxel (aproximadamente 1 km<sup>2</sup>), para los cuales se incorporó el efecto de la topografía:

- RCP 4.5 (emisiones bajas)
- RCP 8.5 (emisiones altas)

#### 4.2.1.3 Selección de variables ambientales

Elegir un número de variables adecuado y que contengan la información más relevante para la especie o cultivo de interés es una fase importante y compleja del proceso de generación de los modelos que influye especialmente en las proyecciones al futuro (Harris et al 2013). Por este motivo, fue necesario analizar previamente la correlación existente entre las variables para evitar incluir variables correlacionadas en el mismo modelo, lo que aportaría información redundante afectando negativamente la capacidad predictiva del modelo. La reducción de variables puede realizarse mediante algún método multivariado de análisis de factores como el análisis de componentes principales (Miller, 2010). Sin embargo, dado que es difícil la interpretación biológica de los distintos componentes o ejes resultantes, otras técnicas utilizadas son: análisis de correlación entre variables, análisis de remuestreo BootStrap y análisis de inflación de varianza (*variance inflation factor* en inglés). Una vez comparados estos métodos de selección de variables, se decidió utilizar el análisis de bootstrap, conforme al método propuesto por Cruz-Cárdenas et al (2014).

Para construir los modelos fue necesario disponer de datos de presencias y ausencias observadas que informan sobre la distribución actual del café de alta calidad. Como se mencionó anteriormente, la base de datos final cuenta con 139 registros de evaluación de calidad mayor a 83 puntos que fueron considerados como datos de presencia y 120 registros georreferenciados, cuya evaluación de calidad fue menor a 83 puntos y considerados como ausencias. Esta base de datos de ausencias es el resultado de filtrar espacialmente, con una distancia mínima de 1 km entre muestras, todos aquellos registros con evaluación de calidad menor a 83 puntos. Con estos datos se generó una matriz de calidad de café. La matriz contiene 120 filas de ausencias (etiquetado como 0) más 139 filas de presencias (etiquetados como 1). El número de columnas fue de 21, que incluye las 19 variables bioclimáticas más una de altitud y una que indica la presencia o bien la ausencia de café de alta calidad. Se recomienda el uso de datos de presencia y ausencia (en la medida de lo posible), ya que al usar ambos se proporciona más y mejor información sobre prevalencia que solo los datos de presencia (Elith et al 2011). En este caso, la variable dependiente es binaria (valores 0 ó 1), por lo que se aplicó una regresión binomial para la matriz de presencias-ausencias, considerando todas las covariables como predictoras. Una vez hecho esto, se aplicó un muestreo bootstrap de 1000 iteraciones al modelo predictivo resultante de dicha regresión. De acuerdo con Austin & Tu (2004b) este número de repeticiones es apropiado para obtener modelos predictivos parsimoniosos. De acuerdo con la información de la biblioteca bootStepAIC del software R (R Development Core Team, 2010), el

procedimiento seguido es el siguiente: 1) se simuló un nuevo conjunto de datos tomando una muestra con reemplazo de las filas de la matriz, 2) el modelo predictivo se ajustó utilizando el conjunto de datos en el paso 1, aplicando un proceso “forward” (se inicia con todas las covariables y se excluyen de forma secuencial hasta que se alcance el nivel de significancia), se estableció una  $p=0.01$  para la eliminación de una covariable a partir del modelo. Diez variables climáticas fueron seleccionadas por su significancia en el modelo: isotermalidad (bio3), estacionalidad de la temperatura (bio4), temperatura media del trimestre más húmedo (bio8), temperatura media del trimestre más seco (bio9), temperatura media del trimestre más cálido (bio10), temperatura media del trimestre más frío (bio11), precipitación del mes más húmedo (bio13), precipitación del mes más seco (bio14), estacionalidad de la precipitación (bio15) y precipitación del trimestre más frío (bio19).

#### 4.2.1 Generación de modelos de nicho ecológico

Con la finalidad de evitar sesgos en las zonas con muchas muestras de catacaciones, se realizó un filtrado espacial de los datos con una distancia mínima de 1 km entre muestras, generando así dos diferentes subconjuntos de datos, con 68 y 73 registros respectivamente. Posteriormente, con cada uno de estos subconjuntos y las variables bioclimáticas seleccionadas en la sección 4.2.1.3 se procedió a la parametrización o construcción de los modelos de nicho ecológico o idoneidad de hábitat para el café de alta calidad, y a su posterior validación.

##### 4.2.2.1 Parametrización y validación de los modelos

La construcción de los modelos se realizó utilizando el paquete ENMeval (Muscarella et al 2014) en el software R versión 3.4.3 (R Core Team 2014), que facilita la construcción y evaluación de modelos con Maxent. ENMeval proporciona varios recursos que ayudan en la parametrización de los modelos: cuenta con diferentes métodos para dividir datos de entrenamiento y de prueba, ejecuta una serie de modelos con diferentes combinaciones de transformaciones de las variables originales (*feature classes* en inglés o FC's) y diferentes valores del múltiplo regularizador (RM) y finalmente, proporciona seis métricas de evaluación para caracterizar el rendimiento del modelo. Estas métricas de evaluación se pueden usar para comparar modelos, y dependiendo de los criterios de evaluación elegidos por el usuario, podrían

seleccionarse las configuraciones de rendimiento óptimo. Específicamente ENMeval no realiza la selección de parámetros para el modelo (Muscarella et al 2014), sino que facilita la selección del mejor modelo, de acuerdo con los datos utilizados, a través de las métricas de evaluación.

Se utilizó el método de división de bloques (*blocks* en inglés) que divide los datos en cuatro bloques según las líneas de latitud y longitud que separan los puntos con información de presencias. Este método es adecuado en estudios que incluyen transferencia espacial o temporal de los modelos y en aquellos en los que se puedan encontrar condiciones ambientales no análogas, como en los de cambio climático (Muscarella et al 2014). Con este paquete se probaron combinaciones de FC's y RM para la construcción de modelos. Los modelos se construyeron usando combinaciones de RM de 0.5 a 4 con incrementos de 0.5 con combinaciones de FC's: L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT (donde L = lineal, Q = cuadrático, H = bisagra y P = producto) (Muscarella et al 2014; Radosavljevic y Anderson 2014). Esta combinación de parámetros generó 48 modelos, entre los cuales se eligió aquel con la menor tasa de omisión de “presencia mínima de entrenamiento” y con delta del criterio de información de Akaike ( $\Delta AIC$ ) menor que dos (Burnham y Anderson 2004; Muscarella et al 2014; Radosavljevic y Anderson 2014). El modelo resultante se utilizó para analizar los efectos del cambio climático en el nicho ecológico futuro del café de alta calidad.

Después, se corrieron los modelos con el algoritmo Maxent versión 3.4.1. Todos los modelos de distribución utilizaron los datos de presencia seleccionados y 10,000 puntos de “background” que representan las condiciones ambientales de la región de estudio (Phillips and Dudík 2008). Para evitar un sesgo geográfico en los modelos, se utilizaron los mismos puntos de “background” generados por ENMeval durante la parametrización de los modelos para evitar cualquier fuente potencial de variación debido a las diferencias en los datos de entrada. El conjunto de datos de presencia se dividió aleatoriamente siguiendo criterios de distribución espacial, en muestras de entrenamiento y de validación, la proporción utilizada fue 70-30, es decir, 70% de los datos se emplean para calibrar el modelo y 30% para validarla (Pearson 2007).

#### 4.2.2.2 Proyección de los modelos en diferentes períodos de tiempo

Los modelos generados para el presente estudio se pueden proyectar bajo condiciones climáticas correspondientes a diferentes períodos de tiempo, ya sea al pasado o al futuro. Estos escenarios futuros constituyen diferentes supuestos de emisiones de gases de efecto invernadero y permiten generar las predicciones de las variables ambientales en el futuro y predecir la distribución futura de las especies mediante el uso de modelos de distribución de especies. Para proyectar los modelos hacia escenarios de clima futuro se usó la función “clamping”, que es la configuración predeterminada en Maxent en caso de extrapolación, es decir, que las variables ambientales y funciones se encuentran restringidas a los valores encontrados durante el entrenamiento. De esta manera se evita que algunas zonas del área de estudio en donde las variables bioclimáticas puedan cambiar drásticamente en el futuro, tengan un impacto significativo en las proyecciones (es decir, en los valores de idoneidad predichos por el algoritmo).

#### 4.2.2.3 Selección del umbral de corte (binarización) en los modelos

Los umbrales de corte son los valores usados para transformar las predicciones continuas de idoneidad, predichas por el modelo, en datos de presencia/ausencia (mapas binarios, es decir, 0 y 1). Los mapas binarios posibilitan el cálculo de áreas y cambio en la distribución potencial. El umbral generalmente se establece en función del objetivo del estudio, procurando minimizar los errores de comisión y omisión.

En este caso se seleccionó el umbral del valor mínimo de entrenamiento (*minimum training presence* en inglés) para transformar esta probabilidad en un valor binario, es decir, a partir de la probabilidad mínima calculada para un punto de presencia se hace una clasificación asignando valores de uno a probabilidades mayores y valores de cero a probabilidades menores a ese punto de referencia. La elección de este umbral de corte es porque se considera que los puntos de presencia utilizados tienen buena precisión geográfica y coinciden con las calidades y perfiles de taza bajo estudio.

Los mapas muestran la idoneidad desde el punto de vista ambiental para la producción de café. Dependiendo de la calidad y perfil de taza de los puntos utilizados para calibrar el modelo

(presencias), se puede hipotetizar que el valor de idoneidad predicho corresponde con alguno de estos niveles de calidad y perfil de taza. En teoría se podría adjudicar el valor continuo de cada pixel (donde 0 es la menor idoneidad y 1 es la máxima), no obstante, dado que el objetivo final del trabajo es determinar las zonas en las que se prevé que exista producción de café de alta calidad así como perfiles de taza diferenciados, se trabajó con mapas binarios. Los modelos resultantes se usaron para analizar los efectos del cambio climático en el nicho ecológico futuro.

#### 4.2.2 Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos de calidad se realizó por separado para las variables cuantitativas (puntaje) y cualitativas (perfil de taza) conforme a la metodología de Catación Descriptiva (Fernández Alduenda et al 2014; Fernández Alduenda 2015).

##### 4.2.3.1. Análisis de datos cualitativos

Para identificar los descriptores significantes se realizó una prueba de independencia de Chi-cuadrada . La Chi-cuadrada global permitió identificar la formación de subgrupos en el conjunto de datos completo; un análisis de correspondencias no simétricas permitió visualizar la relación entre las muestras y los descriptores, así como un análisis de correspondencia no métrico (NMDS) que permitió identificar si existe agrupación por regiones o por proceso de beneficiado.

El NMDS es una técnica de estadística multivariada que trata de representar en un espacio geométrico de pocas dimensiones las proximidades existentes entre un conjunto de datos. Es un método de ordenación adecuado para datos que no son normales o que están en una escala discontinua y que permite apreciar gráficamente el grado de semejanza de un conjunto de individuos u objetos. En el análisis se consideró la medida del estrés, que es la más utilizada para evaluar el nivel de aceptabilidad de los resultados obtenidos de una configuración específica que reproduce la matriz de distancias observadas (Ózdamar 2004). La correlación de perfiles de sabor y puntuaciones de calidad fue analizada con un coeficiente de regresión vectorial (RV), para identificar la relación entre ambos datos. Este coeficiente puede ser usado como una medida de la similitud de dos conjuntos de datos.

## **5. Resultados y Discusión**

### **5.1 Modelo de zonas óptimas para la producción de café de alta calidad**

El modelo de zonas de producción de café de especialidad se parametrizó con la combinación de LQ y un multiplicador de regularización (RM) igual a 0.5, con un conjunto de cinco variables ambientales (bio1, bio10, bio11, bio13, bio18). La delta de AIC para este modelo fue de 0, mientras que el área bajo la curva (AUC) para el conjunto de datos, toma un valor de 0.948 para los datos de entrenamiento y de 0.936 para los datos de validación.

De acuerdo a los modelos descritos en la sección previa, las áreas con la aptitud climática adecuada para producir café de especialidad bajo el escenario de clima histórico, se ubican a lo largo de la cadena montañosa del estado (Fig. 10), desde Zongolica en el Sur recorriendo la región de Córdoba y Huatusco hasta llegar a la región de Coatepec y Atzalan en el norte, con una superficie total de 79,905 hectáreas con condiciones óptimas y 74, 087 ha de aptitud climática media para producir café de calidad. Las regiones de Coatepec, Córdoba y Huatusco son las que presentan la mayor superficie con óptima aptitud climática, mientras que la región de Atzalan es la que presenta la menor superficie con aptitud climática óptima (Cuadro 9). Estos resultados son consistentes con los encontrados por Läderach (2012), quien afirma que las áreas más aptas están concentradas en las partes altas de los estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas.

Es importante resaltar que un buen manejo de la sombra, de la nutrición del suelo y de variedades de café podría permitir a productores en zonas de aptitud climática baja y media crear las condiciones micro-climáticas necesarias para la producción de café de alta calidad. En este sentido, las tendencias reportadas aquí podrían servir como una guía, quizá indicando dónde podría ser necesario cuidar más estos aspectos del manejo del cafetal en el futuro y así adaptar mejor al cambio climático.

Actualmente se sabe que uno de los factores que más influye y se refleja en las características de “calidad en taza” del café, es la aplicación de técnicas y tecnologías de producción agroecológica (Mancilla 2012). Una de estas técnicas de producción y conservación más importantes, es la implementación del sombrío en el cafetal, el cual ha sido determinado desde sus inicios por factores agronómicos del cultivo, y que se ha transformado en una tradición cultural típica de ciertas zonas, sin tener plena conciencia del efecto que genera la aplicación de esta técnica en el cafetal. Algunos de estos efectos primarios en la atmósfera del cafetal

pueden ser, la regulación de la temperatura, lo cual trae como consecuencia el alargamiento de la vida útil de la plantación, la regulación de la producción y el control de algunas plagas y enfermedades. Así mismo, algunos de los efectos secundarios son producto de la interacción de varios efectos primarios, tal es el caso de la influencia que ejerce sobre la disponibilidad de agua en las plantas de café a partir de la regulación de la temperatura ambiente, la disminución en la radiación que evapora el agua, la conservación del agua contenida en la hojarasca que produce y la disminución de la evaporación de las plantas (Jasso 2019; Mancilla 2012).

Cuadro 9. Superficie con aptitud climática por regiones, para el cultivo de café de alta calidad en regiones cafetaleras del centro de Veracruz. Entre paréntesis se muestra el porcentaje que representa respecto a la superficie total por región.

Región	Superficie con aptitud climática 1960-2000 (ha)			TOTAL
	Óptima	Media	Baja	
Atzalan	115 (0.1%)	7,143 (7%)	19,346.3 (19%)	26,604 (26.2%)
Coatepec	20,164 (15%)	27,010 (20.7%)	20,366 (15.6%)	67,541 (51.6%)
Córdoba	36,744 (34%)	9,767 (9%)	10,229 (9.6%)	56,740 (53%)
Huatusco	22,623 (32%)	9,143 (11%)	9,026 (11%)	40,792 (49.5%)
Misantla	2,928 (3 %)	6,622 (6%)	10,411 (9%)	19,962 (18%)
Tezonapa	2,814 (6%)	5,332 (9%)	3,769 (6%)	11,915 (20%)
Zongolica	14,162 (28%)	9,068 (18%)	6,755 (13%)	29,985 (59%)
<b>TOTAL</b>	<b>79,905 (13%)</b>	<b>74,087 (11.5%)</b>	<b>99,550 (15.5%)</b>	<b>253,542 (39.5%)</b>

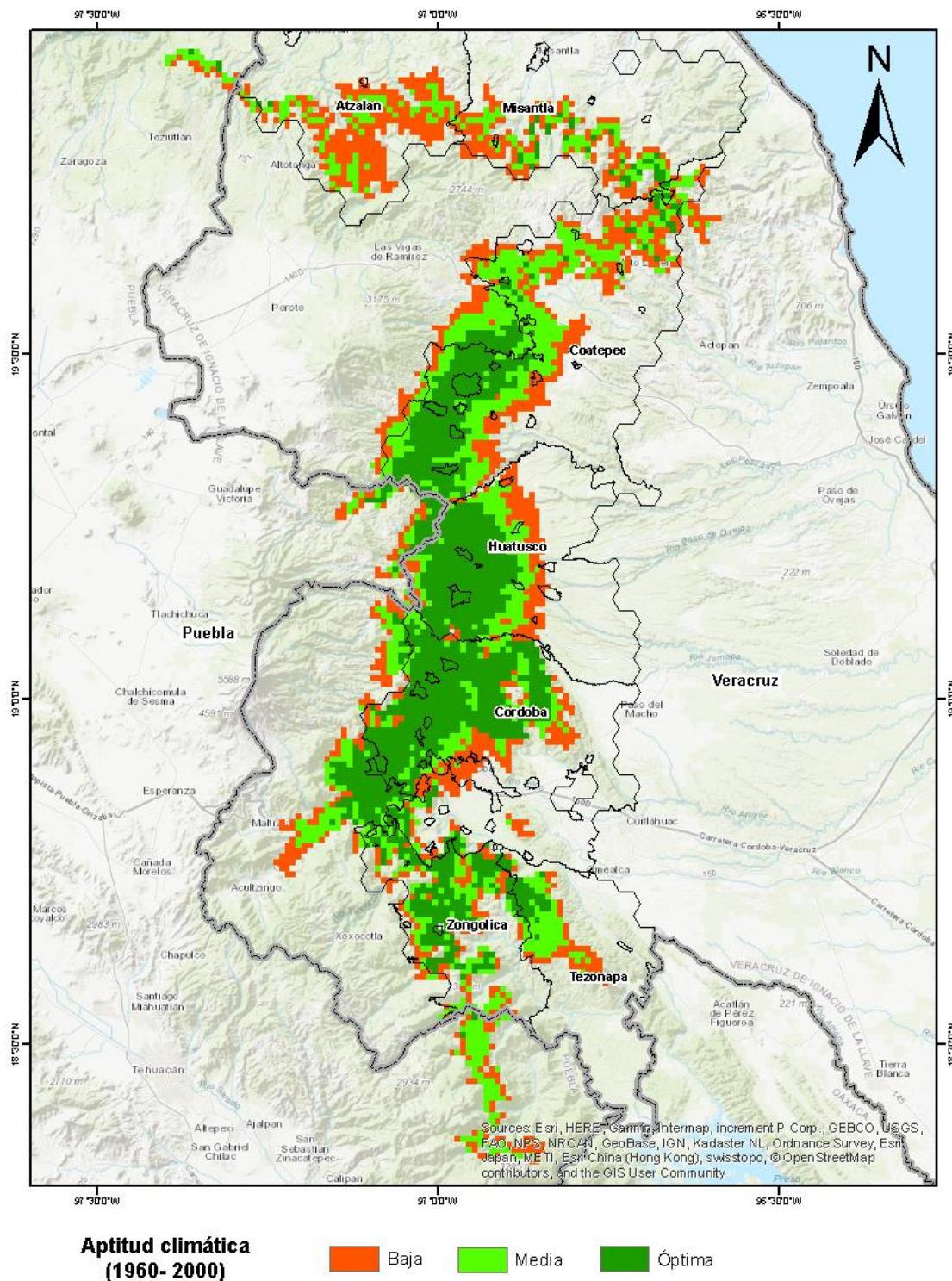


Figura 10. Aptitud climática histórica (1960 – 2000) para la producción de café de alta calidad en la zona centro de Veracruz.

Si bien existe una tendencia general de encontrar mejores condiciones climáticas hacia altitudes más elevadas, la detección de zonas de aptitud climática óptima en mayores altitudes debe tomarse con precaución, ya que podrían ser zonas con uso de suelo forestal.

Estos resultados contradicen el planteamiento de la hipótesis 1, en la que de acuerdo con los conocimientos *a priori* que se tienen del cultivo de café en el estado de Veracruz, se hubiese esperado que la aptitud climática fuese si no igual, muy similar en todas las regiones cafetaleras del estado, es decir, se esperaba una distribución homogénea de las superficies con aptitud climática. Sin embargo, esto no sucede así y existe una diferenciación tanto en aptitudes como en superficies delimitadas por los modelos generados para la producción de café de alta calidad.

## 5.2 Modelo de zonas óptimas para la producción de perfiles de taza diferenciados

Los modelos de zonas de producción de perfiles diferenciados se parametrizaron de acuerdo con los datos mostrados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Valores de combinaciones de transformación de variables (FC's), múltiplo regularizador (RM), número de variables ambientales utilizadas, criterio de información de Akaike (AIC) y área bajo la curva (AUC) de los datos de entrenamiento y de validación, utilizados en la parametrización de los modelos de perfiles aromáticos y de sabor de café.

<b>Perfil aromático/ sabor</b>	<b>FC's</b>	<b>RM</b>	<b>No. de Variables ambientales</b>	<b>ΔAIC</b>	<b>AUC entrenamiento</b>	<b>AUC validación</b>
Caramelo	LQ	0.5	13	0	0.9883	0.9335
Chocolate	LQ	0.5	11	0	0.9379	0.9336
Especiado	LQ	0.5	11	0	0.9152	0.9073
Floral	LQ	0.5	15	0	0.9386	0.9268
Frutal	LQ	0.5	10	0	0.9402	0.9326
Nueces	LQHP	1.5	11	0	0.9458	0.9376

Estos parámetros son un buen indicador del comportamiento de los modelos, así la variación en el criterio de información de Akaike ( $\Delta AIC$ ) es un indicador de la complejidad del modelo. Este parámetro fue igual a 0 para todos los modelos de perfiles de taza generados, lo que significa que son modelos poco complejos. El área bajo la curva (AUC) da cuenta de capacidad de clasificación o predictiva del modelo, valores por arriba de 0.7 se consideran muy buenos resultados; en el caso de los modelos generados para los diferentes perfiles de taza el AUC tanto

de los datos de entrenamiento y de validación tienen valores por arriba de 0.9, lo que nos indica que son modelos predictivos muy confiables.

De acuerdo con los modelos generados, las regiones de Coatepec, Córdoba y Huatusco son las que presentan la mayor superficie de óptima aptitud climática para obtener los diferentes perfiles en taza, mientras que la región de Misantla y Tezonapa son las que presentan una menor superficie de aptitud climática (Cuadro 11). Los distintos perfiles de taza pueden obtenerse en todas las zonas cafetaleras, sin embargo, como se sabe a través del historial en las catacaciones, existen zonas cafetaleras con un predominio característico de ciertos perfiles de taza debido a combinaciones particulares de las condiciones climáticas (Cuadro 12), principalmente temperatura y precipitación, situación que se refleja en los modelos obtenidos para seis diferentes perfiles de taza en la zona centro del estado (Figuras 11 a 16).

Cuadro 11. Superficie de óptima idoneidad climática para seis perfiles de taza en regiones cafetaleras del centro de Veracruz.

Región	Superficie climática óptima(ha)					
	Chocolate	Caramelo	Floral	Frutal	Especiado	Nuez
Atzalan	809.46	2,015.63	1,752.88			
Coatepec	22,666.88	28,876.51	26,243.61	28,206.06	27,424.91	16,942.87
Córdoba	26,512.13	17,493.02	9,158.11	21,122.50	26,128.11	30,734.22
Huatusco	21,628.10	18,942.14	10,475.13	21,416.61	21,692.07	20,053.06
Misantla						
Tezonapa	231.32			150.24	0.24	81.08
Zongolica	10,349.60	8,395.04	6,892.54	11,672.02	3,034.25	4,148.03
TOTAL	82,197.49	75,722.34	54,522.27	82,567.43	78,279.58	71,959.26

Cuadro 12. Variables climáticas de mayor significancia, en orden de importancia, para la generación de cada uno de los modelos de perfiles de taza.

<b>Perfil de taza</b>	<b>Variable Climática de mayor significancia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje de contribución al modelo</b>
Caramelo	Bio14	Precipitación del mes más seco	14.8
	Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	13.8
	Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	13
	Bio12	Precipitación total anual	8.6
	Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6)	7.2
Chocolate	Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	12.4
	Bio12	Precipitación total anual	12.2
	Bio13	Precipitación del mes más húmedo	10.2
	Bio9	Temperatura media del trimestre más seco	9.4
	Bio2	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima)	6.9
Especiado	Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	14.3
	Bio4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100)	10.5
	Bio17	Precipitación del trimestre más seco	10.5
	Bio2	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima)	10.4
Florales	Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	15
	Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	14.2
	Bio12	Temperatura media anual	10.8
	Bio19	Precipitación del trimestre más frío	8.2
	Bio2	Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima)	9.3
	Bio11	Temperatura media del trimestre más frío	7.7
	Bio1	Temperatura media anual	6.8
Frutal	Bio9	Temperatura media del trimestre más seco	36.6
	Bio17	Precipitación del trimestre más seco	29.1
	Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	22.3
	Bio12	Temperatura media anual	20.8
Nueces	Bio14	Precipitación del mes más seco	22.8
	Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	12.2
	Bio12	Precipitación total anual	12.1
	Bio17	Precipitación del trimestre más seco	9.3
	Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo	8.7

Cada una de estas variables climáticas y sus combinaciones afecta la fenología del cafeto, dando como resultado diferentes maneras de formación y llenado del fruto, lo que a su vez conlleva a diferencias en calidad y sabor en taza. Así, por ejemplo, a medida que la temperatura se incrementa, el café madura más rápido provocando una calidad y sabor inferior en la taza, comparados con cafés que en un ambiente menos cálido necesitan más tiempo para la maduración del fruto. De acuerdo con un estudio realizado por Bertrand et al (2012), se demostró que alrededor de la mitad de los compuestos volátiles detectados parecen estar vinculados a factores climáticos experimentados durante el desarrollo del grano de café. Este estudio reveló que la composición de los compuestos volátiles varía con la temperatura durante el desarrollo de las semillas y, en particular, que los climas cálidos favorecen la acumulación de compuestos volátiles asociados a la aparición de sabores desagradables, con esto demostraron que las condiciones de temperatura prevalecientes durante el desarrollo del fruto de café tienen un efecto importante en la calidad de la bebida.

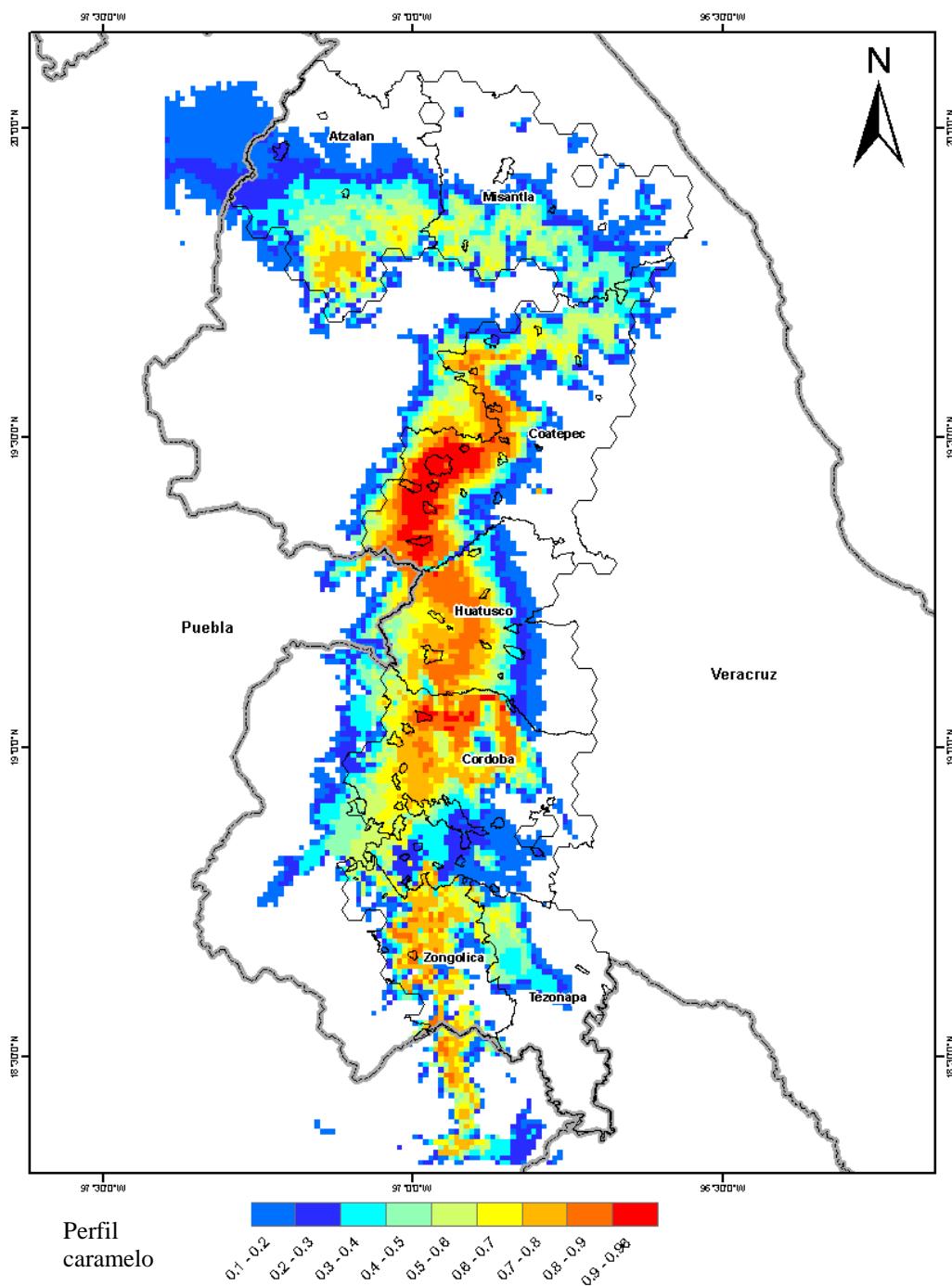


Figura 11. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza caramelito en la zona centro de Veracruz.

De acuerdo con el modelo de perfiles acaramelados, la regiones con valores más altos de idoneidad para producción de este tipo de perfil es Coatepec, seguida de Huatusco y Córdoba, las cuales presentan también una mayor superficie de alta idoneidad, mientras que Atzalan es la región con menor superficie de alta idoneidad.

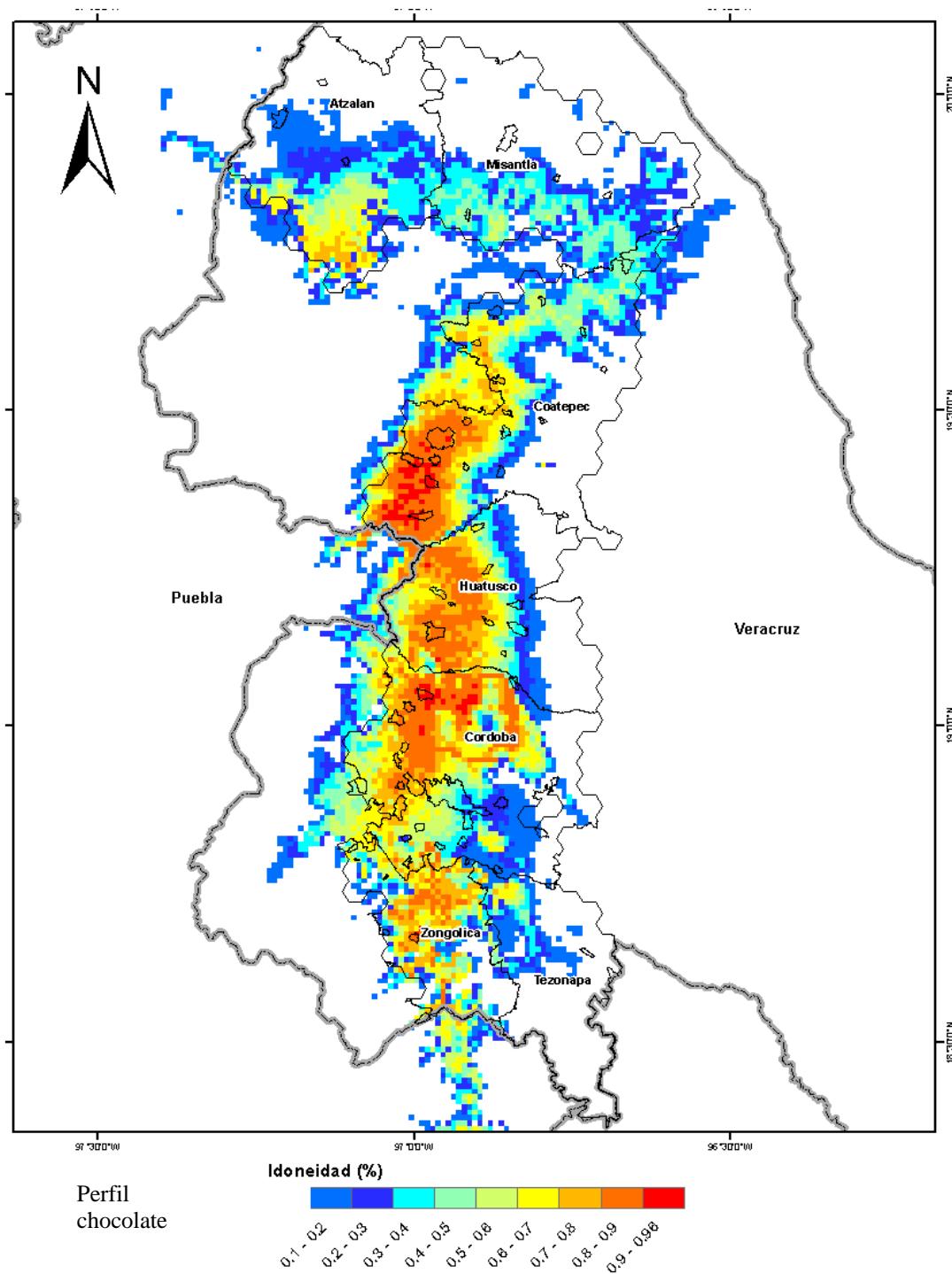


Figura 12. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza chocolate en la zona centro de Veracruz.

De acuerdo con el modelo de perfiles achocolatados, Coatepec, Huatusco y Córdoba son las regiones con valores más altos de idoneidad para producción de este tipo de perfil, las cuales presentan también una mayor superficie, mientras que Atzalan es la región con menos superficie de alta idoneidad.

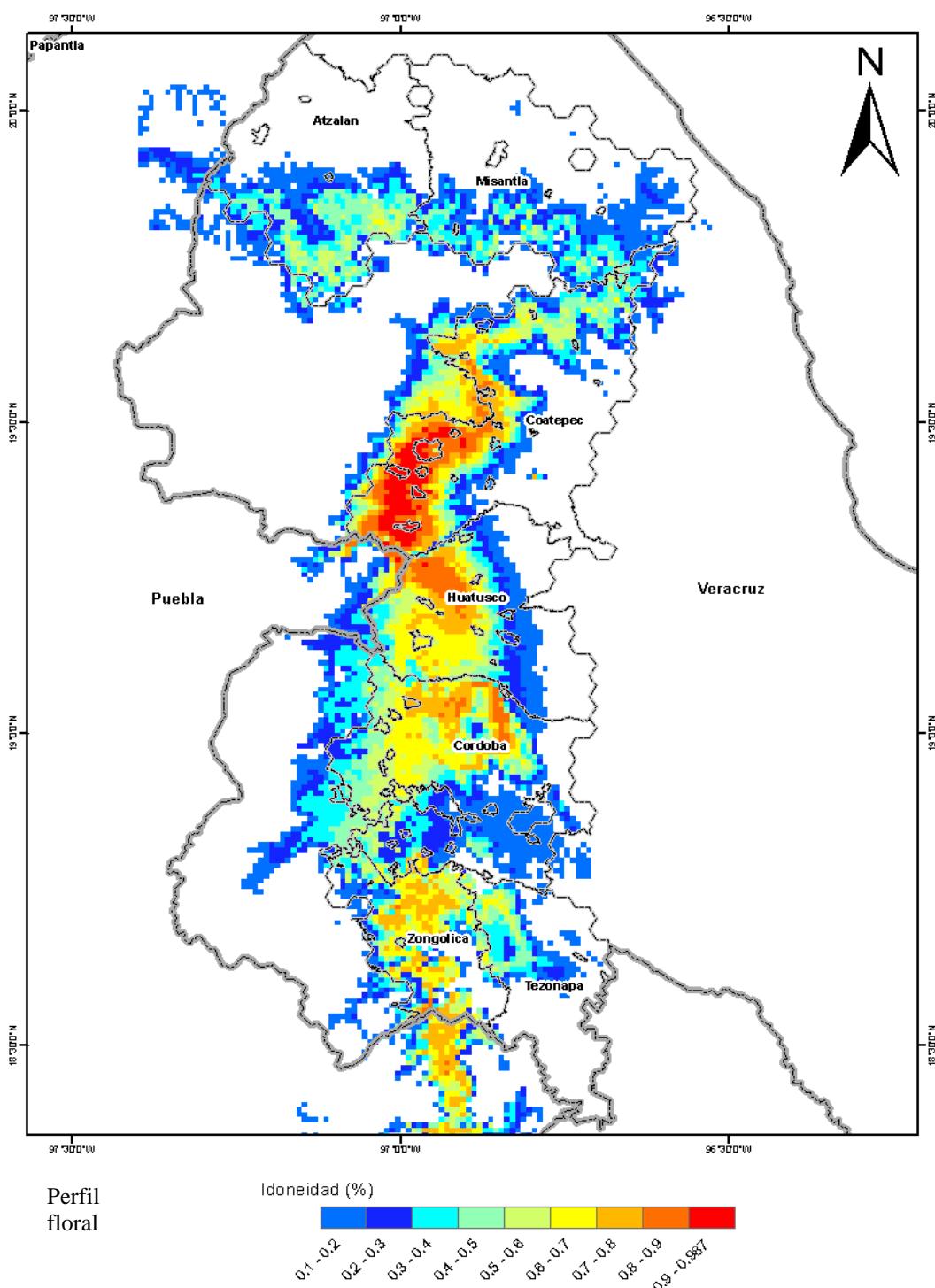


Figura 13. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza floral en la zona centro de Veracruz.

De acuerdo con el modelo de perfiles florales, las regiones con mayor idoneidad para producción de este tipo de perfil son Coatepec, Huatusco y Córdoba (principalmente en los municipios de Ixhuatlán y Tepatlaxco) y en menor grado, algunas zonas de las regiones Tezonapa y Misantla.

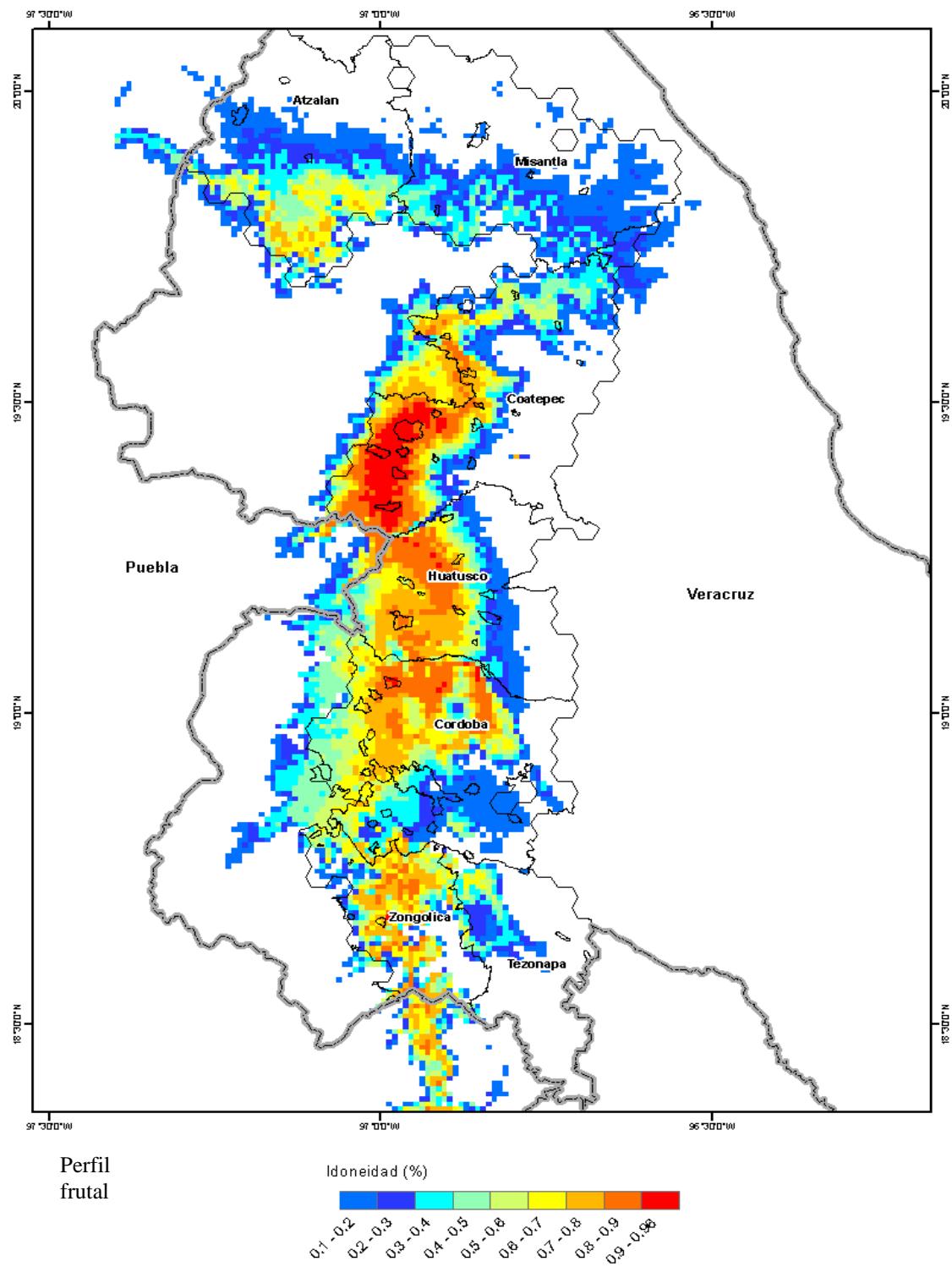


Figura 14. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza frutal en la zona centro de Veracruz.

De acuerdo con el modelo de perfiles frutales, la región con mayor idoneidad para producción de este tipo de perfil es Coatepec, seguida de Huatusco y Córdoba las cuales presentan también una mayor superficie de alta idoneidad, mientras que Atzalan es la región con menos superficie de alta idoneidad.

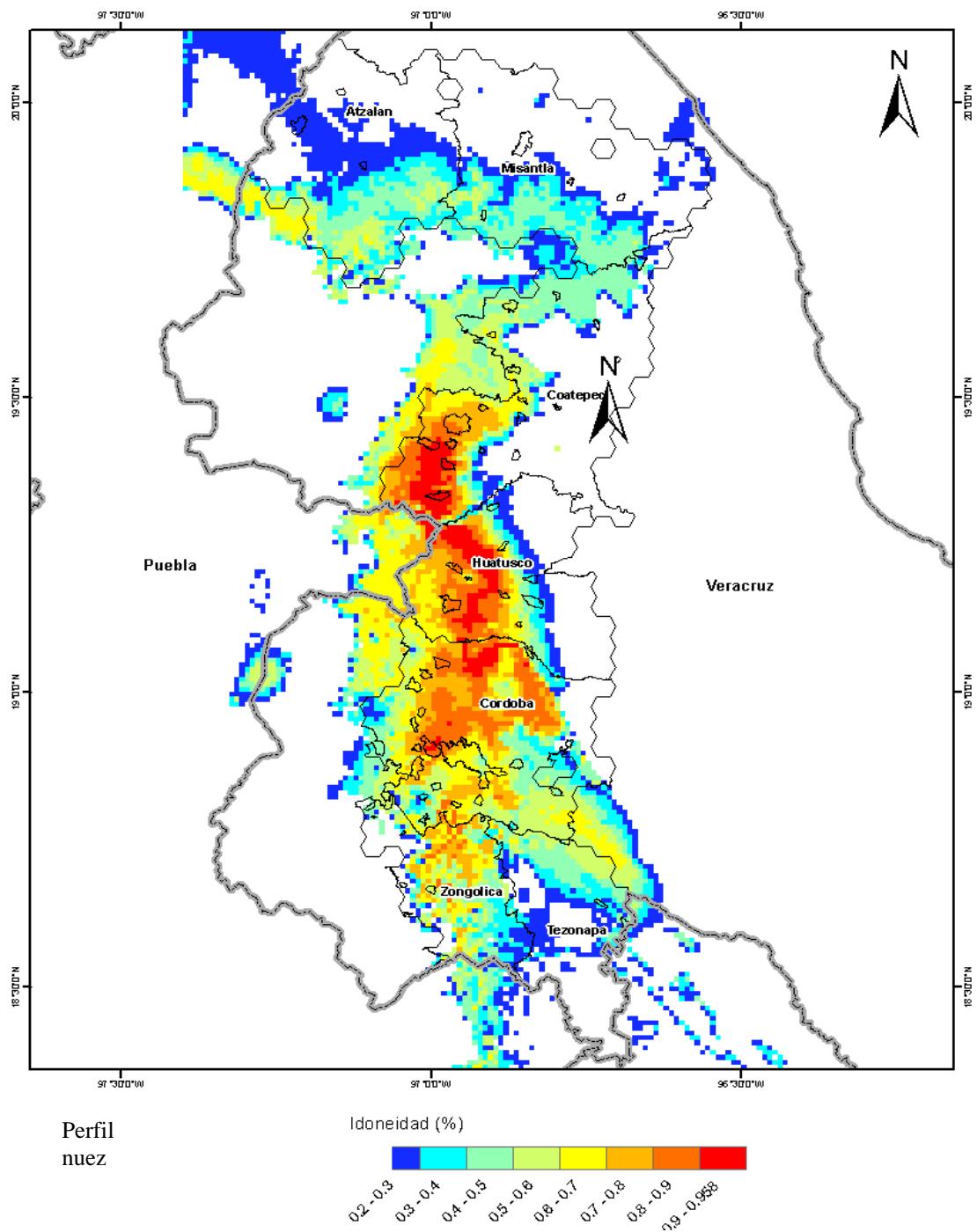


Figura 15. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza nuez en la zona centro de Veracruz.

De acuerdo con el modelo de perfiles de taza nuez, la región con mayor idoneidad para producción de este tipo de perfil es Córdoba, seguida de Huatusco y Coatepec, mientras que en la región de Atzalan, el modelo no delimitó superficie de alta idoneidad.

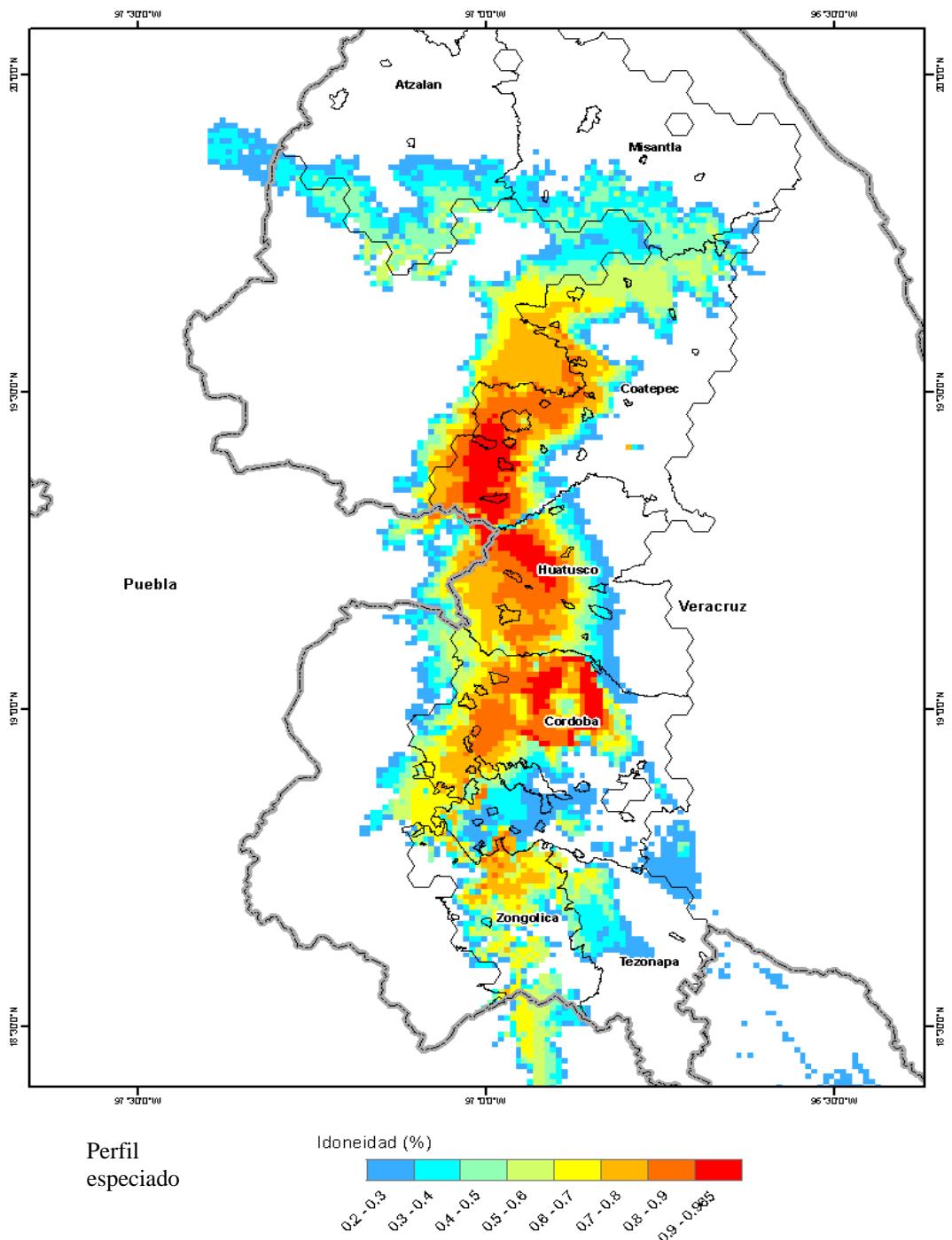


Figura 16. Aptitud climática histórica para la producción de café con perfiles de taza especiado en la zona centro de Veracruz.

Las zonas con mayor superficie de alta idoneidad para la producción de café con perfiles de taza especiados son Coatepec, Huatusco y Córdoba, mientras que las regiones con menor superficie de alta aptitud climática para la producción de este tipo de perfiles son Tezonapa, Atzalan y Misantla. La zona norte de la región de Zongolica presenta valores relativamente altos de idoneidad para la producción de estos perfiles.

El número de variables climáticas significativas seleccionadas para la generación de los modelos fue de 5, excepto para el perfil de taza especiado con menor número de variables climáticas significativas (4) y el perfil floral con un mayor número de variables significativas (7) (ver cuadro 12). La variable de mayor importancia para la generación de estos modelos fueron las variables derivadas de temperatura, por lo que podría decirse que es la temperatura la variable que determina qué zonas son aptas para la producción de perfiles diferenciados. De acuerdo con Bertrand et al (2012) la acidez, calidad total, carácter afrutado-floral y la calidad del aroma, están muy relacionados con las cetonas y etanal, compuestos volátiles que podrían considerarse como indicadores del café de tierras altas y por lo tanto de temperaturas menores. De acuerdo con las hipótesis planteadas, se esperaba que la delimitación de regiones para producción de perfiles diferenciados fuera de manera no homogénea, es decir que existiera una marcada diferenciación entre las zonas productoras para perfiles de taza particulares. Sin embargo, los modelos muestran que, a pesar de haber una mayor idoneidad de ciertas regiones para la producción de perfiles diferenciados, en todas las regiones se tienen condiciones climáticas necesarias para producir todos los perfiles de taza analizados en este trabajo.

### 5.3 Efecto de las regiones cafetaleras (zonas geográficas) en los perfiles de sabor

La prueba de independencia determinó que existe una relación significativa entre los subgrupos de perfiles de café y las muestras de catas. El valor observado de  $\chi^2 = 4618.302$  tiene un valor de  $p < 0.0001$ , con un valor crítico de  $\chi^2$  de 2458.771 ( $df = 447$ ,  $\alpha = 0.05$ ). Un análisis general de  $\chi^2$  mostró que para que un grupo descriptor sea significativo ( $p < 0.05$ ) la  $\chi^2$  del subgrupo debería estar por encima del valor  $\chi^2 = 769.717$  ( $df = 447$ ). Los subgrupos más representativos son los chocolates (1035.985,  $df = 447$ ,  $p = 0.0001$ ), los florales (891.688,  $df = 447$ ,  $p = 0.0001$ ) y los frutales (886.088,  $df = 447$ ,  $p = 0.0001$ ). Los subgrupos menos comunes entre las muestras son nueces, caramelos y especiados.

Con el análisis de los residuales ajustados de la prueba de independencia, fue posible inferir cuáles son los subgrupos estadísticamente significativos en las regiones analizadas. Así se tiene que en la región de Atzalan se presentan notas florales, frutales, caramelos y nueces, teniendo mayor significancia las notas caramelos y frutales; en la región Coatepec pueden encontrarse todos los subgrupos descriptores sin embargo, resultaron más significativas las notas chocolates, frutales, florales y especiados; de igual manera en la región Córdoba pueden

encontrarse todos los subgrupos descriptores, resultando de mayor significancia las notas florales y frutales, seguidas de notas achocolatadas para ambas regiones. En Huatusco las notas achocolatadas son las de mayor significancia, seguidas de notas frutales y nueces. En la subregión de Ixhuatlán resultaron significantes las notas florales, frutales y nueces; en la región de Zongolica sobresalen las notas florales, frutales y chocolates, mientras que para la región de Tezonapa resultaron significativas las notas frutales.

Este análisis señala que, los perfiles chocolates, nueces y caramelos resultaron ser los más representativos de las regiones cafetaleras en el centro del estado, sin embargo, esto puede deberse a que las notas de caramelo y chocolate surgen de las reacciones de Maillard (complejo conjunto de reacciones químicas producidas al calentar los alimentos) entre los azúcares y los aminoácidos, además que el tostado ligero produce aromas dulces, de cacao y nueces (Bhumiratana et al 2011), por lo que podría decirse que los perfiles chocolates, nueces y caramelos están más relacionados con el proceso químico que ocurre durante el tostado a partir de precursores comunes en el café versus factores ambientales que fue el enfoque de este estudio. Sin embargo, debido al hecho de no contar con la información necesaria para interpretar la variabilidad en estos perfiles, no podemos ahondar más en esta discusión.

El análisis de correspondencia no simétrico (NSCA) se realizó con la finalidad de observar si existe alguna agrupación según los diferentes tipos de beneficiado o las regiones de acuerdo con los perfiles de taza. Este análisis muestra que 78.22% de la variación total está representada por los primeros dos factores. La inercia para el Factor 1 (F1) es de 60.47% y para el Factor 2 (F2) de 17.74%. Los perfiles de mayor contribución al eje F1 son los chocolates (60%) y los frutales (33.2%), seguido de los florales (5.6%). En conjunto estos tres subgrupos contribuyen con el 98.8% al factor F1. Los subgrupos florales, frutales y especiados se ubican en el cuadrante negativo de F1, mientras que los subgrupos nuez, caramelo y chocolates se ubican en el cuadrante positivo de F1. Esto puede ser un indicador de que estos grupos, especialmente el perfil floral y de chocolate, difieren entre sí en cuanto a características y posiblemente condiciones agroclimáticas necesarias para su adecuado desarrollo (Avelino et al 2005; Skovmand et al 2009).

En cuanto al factor F2, los subgrupos de mayor contribución son: caramelo (62.3%), frutal (19.5%) y chocolate (16.6%). Los subgrupos en el cuadrante positivo de F2 son los chocolates, frutales, frutales y especiados; mientras que en el cuadrante negativo para este factor se encuentran los subgrupos nuez y caramelo.

La Figura 17 muestra el gráfico NSCA de los descriptores en F1 y F2, lo que resulta de mayor utilidad que el análisis numérico de cada factor. Se observa que el cuadrante superior derecho está representado exclusivamente por el perfil achocolatado, mientras que en el cuadrante superior izquierdo predomina el perfil frutal, con representación de florales y especiados; y en el cuadrante inferior derecho se encuentran los perfiles nuez y caramelo. Esto indicaría que la variabilidad de las muestras pudiera explicarse con base en estos perfiles que son los de mayor contraste.

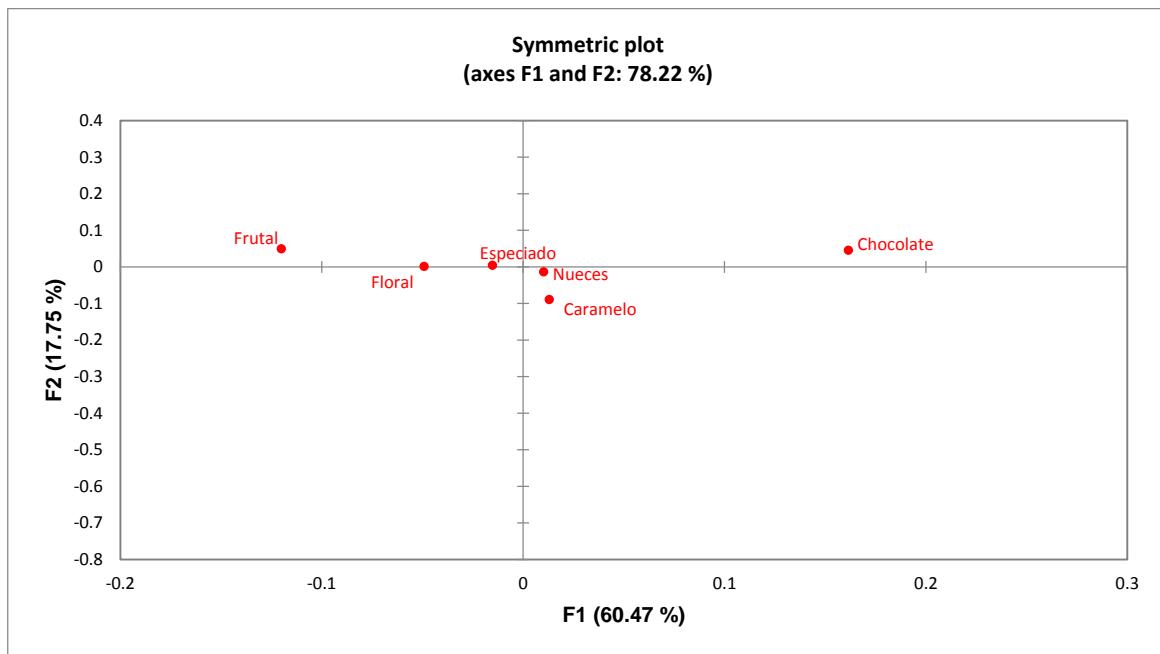


Figura 17. Gráfico de análisis de correspondencias no simétricas (NSCA) de los descriptores de perfiles significantes que representa la proyección sobre los ejes de los factores F1 y F2 de las muestras correspondientes a las regiones cafetaleras del centro de Veracruz.

En las Figuras 18 y 19 (se separan únicamente para hacerlas visualmente más amigables) se muestra el gráfico de NSCA de las muestras de café en F1 y F2, esto representaría la distribución que tienen las muestras alrededor de los diferentes perfiles de taza. La distribución de las muestras no tiene un patrón de agrupamiento aparente, por lo que podría decirse que el perfil de taza no depende exclusivamente del proceso de beneficiado. En las Figuras 20 y 21 (se separan únicamente para hacerlas visualmente más amigables) se muestra el gráfico de NSCA para los subgrupos descriptores del perfil de taza organizados por región cafetalera.

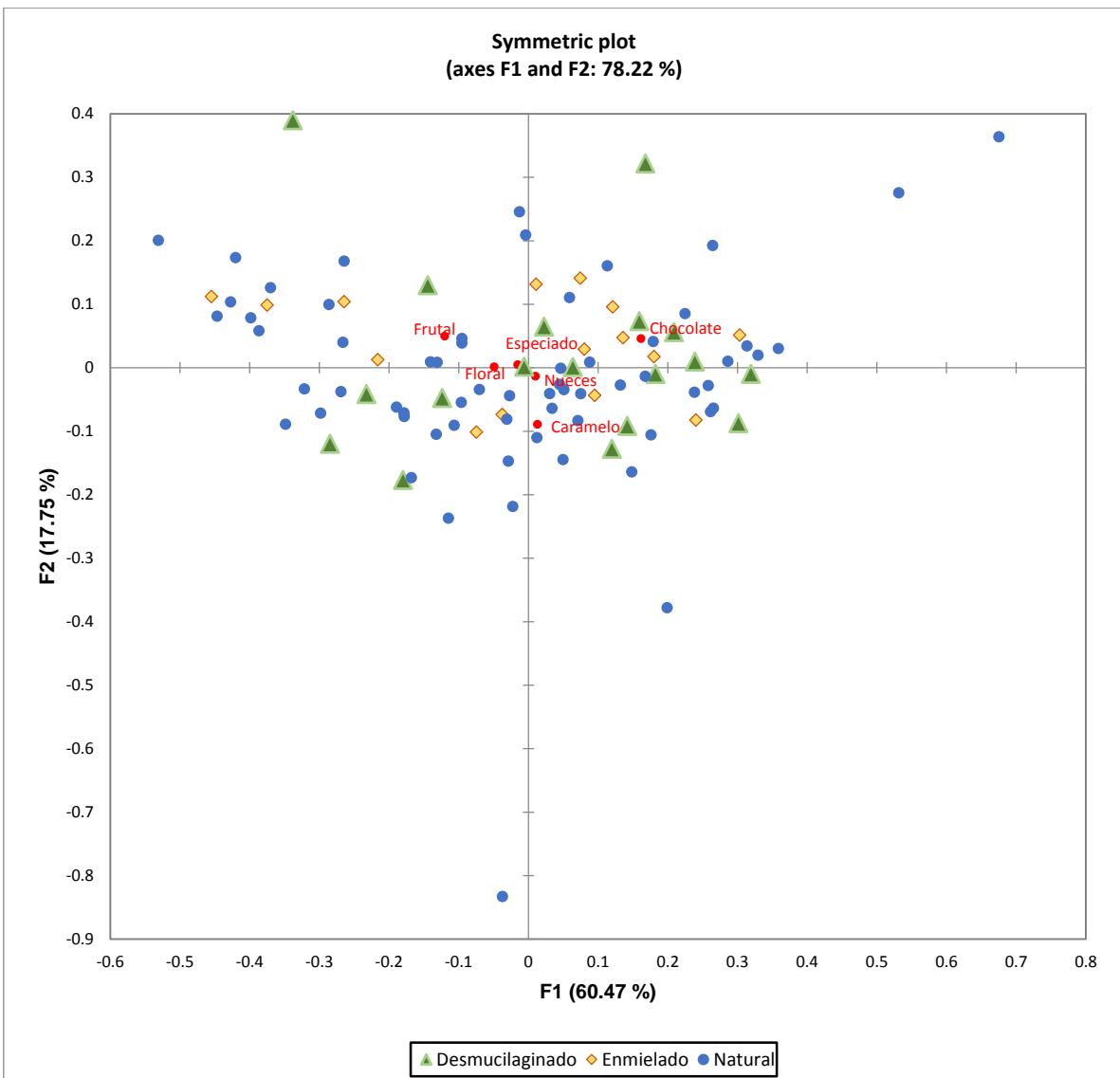


Figura 18. Gráfico de análisis de correspondencias no simétricas (NSCA) que representa la proyección de las muestras de catas de café correspondientes a los diferentes procesos de beneficiado: desmucilaginado (triángulos), enmielado (rombos) y natural (puntos) sobre los ejes de los factores F1 y F2.

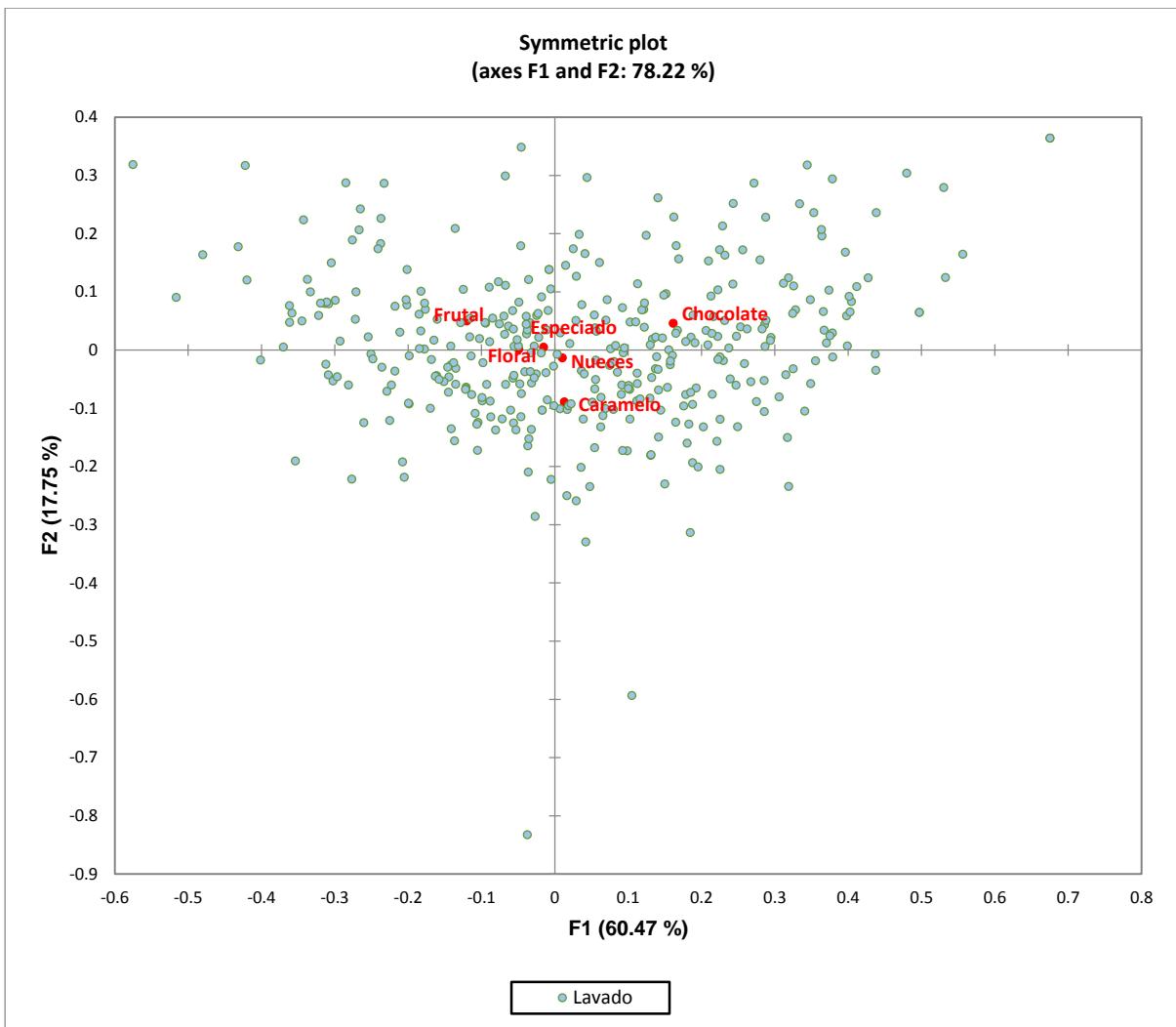


Figura 19. Gráfico de análisis de correspondencias no simétricas (NSCA) que representa la proyección de las muestras correspondientes al proceso de beneficiado lavado sobre los ejes de los factores F1 y F2.

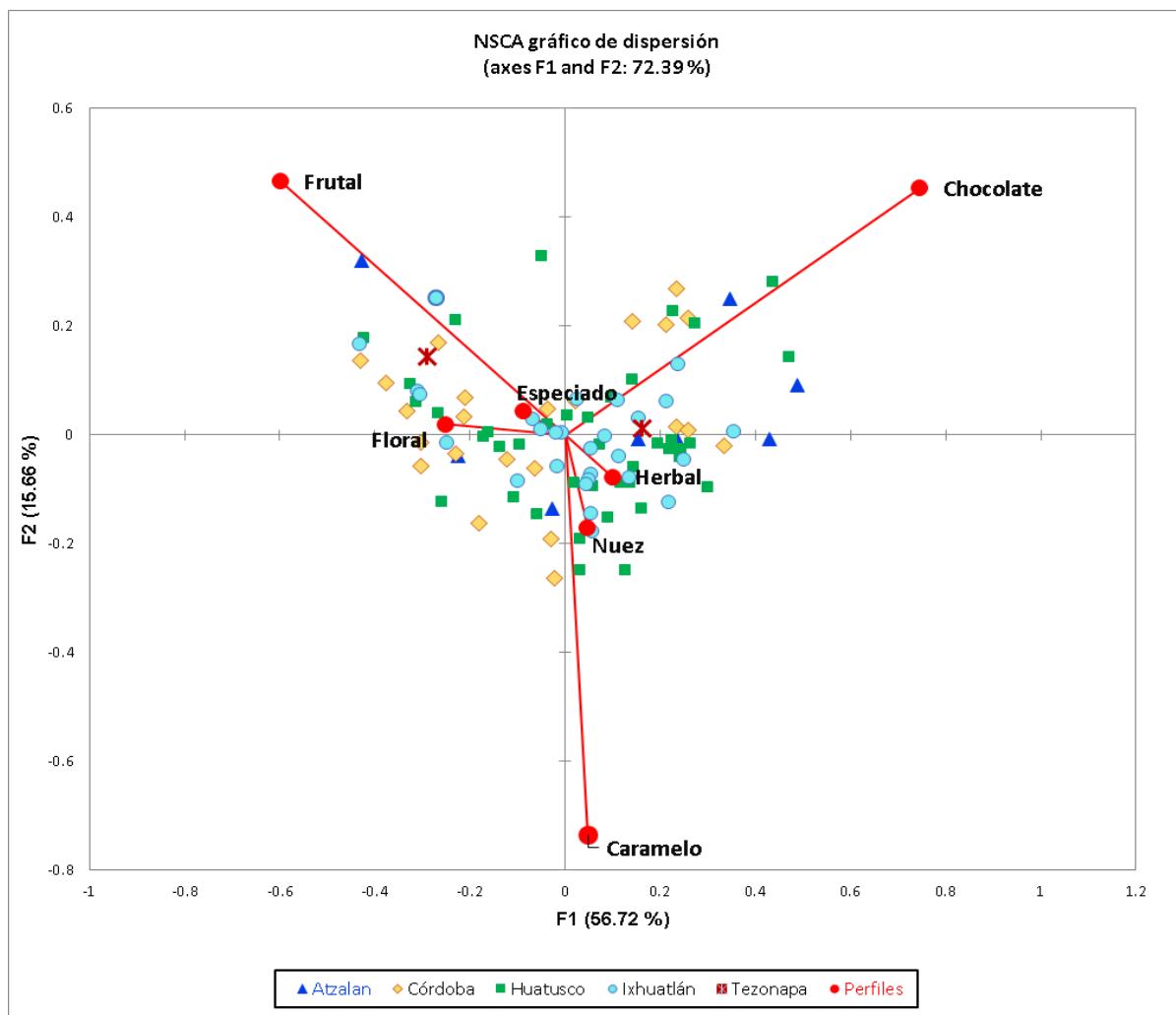


Figura 20. Gráfico de análisis de correspondencias no simétricas (NSCA) que representa la proyección de las muestras correspondientes a las regiones cafetaleras: Atzalan (triángulos) y Córdoba (rombos), Huatusco (cuadrados), Ixhuatlán (círculos) y Tezonapa (asteriscos) sobre los ejes de los factores F1 y F2.

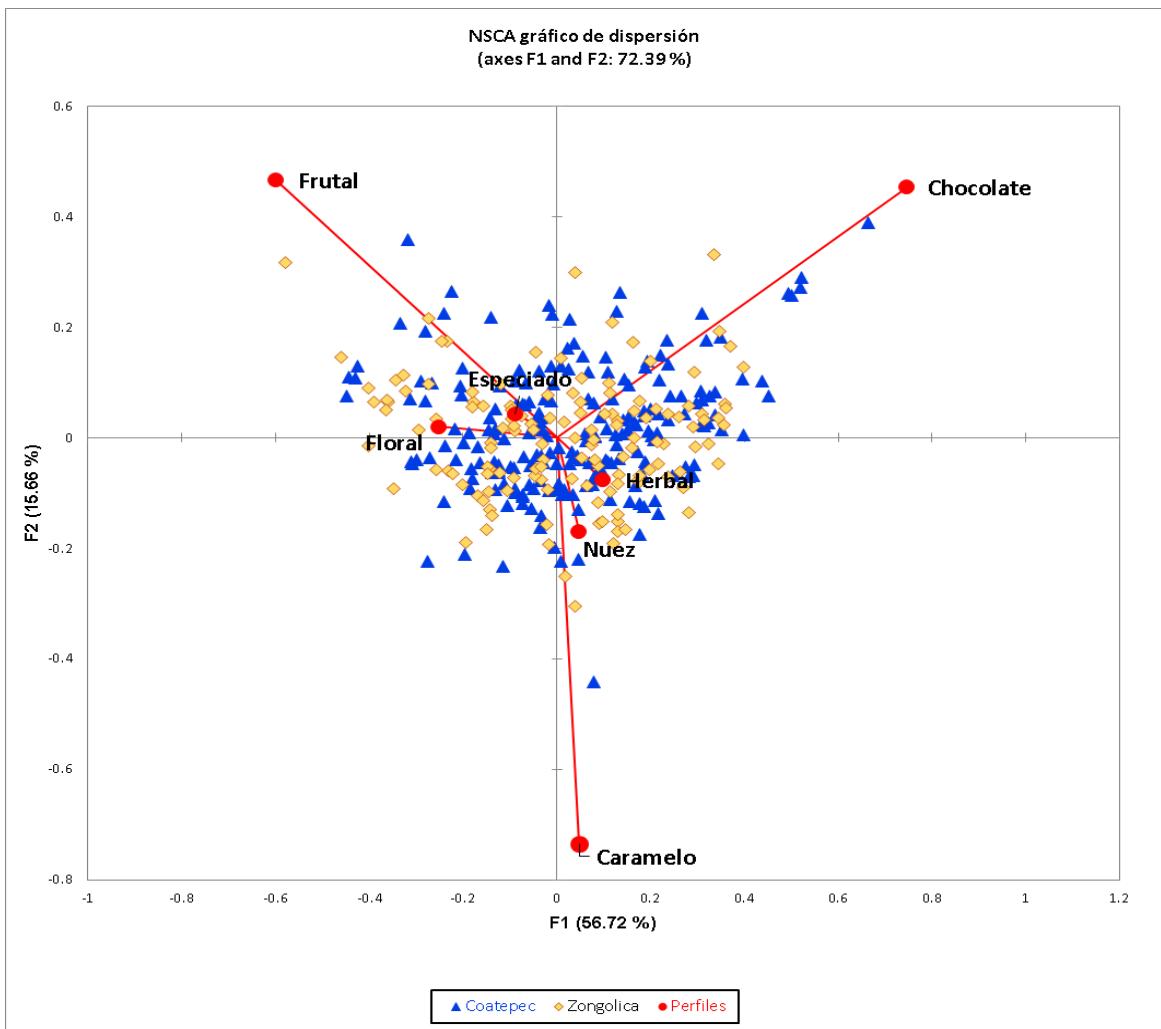


Figura 21. Gráfico de análisis de correspondencias no simétricas (NSCA) que representa la proyección de las muestras correspondientes a las regiones cafetaleras: Coatepec (triángulos) y Zongolica (rombos) sobre los ejes de los factores F1 y F2.

En el análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) se utiliza una medida que indica que tan parecidas son entre sí las matrices de datos utilizados y de cierto modo si el modelo es adecuado o no, esta medida se denominada *stress*. Los valores que puede tomar oscilan entre 0 y 1, valores cercanos a 1 indican que el modelo es bueno y valores cercanos a 0 indican que el modelo es malo. Para el presente estudio, la medida de estrés calculada fue de 0.109, lo que acorde con la guía para su interpretación (Linares 2001) se encuentra en un rango de regular. Considerando las coordenadas generadas como resultado del análisis, en la Figura 22 se presenta de manera gráfica los resultados del NMDS. En la dimensión 1, el grupo descriptor de florales es el más lejano, de acuerdo con sus coordenadas, del grupo de chocolates.

Con base en estos resultados, se puede inferir que estos grupos son los que más difieren entre sí, mientras que en la dimensión dos los grupos que más difieren son los caramelos y nueces. En estos gráficos se representan las muestras de café en F1 y F2, lo que da idea de la distribución que tienen las muestras alrededor de los diferentes perfiles de taza. La distribución de las muestras no tiene un patrón de agrupamiento aparente, por lo que podría decirse que el perfil de taza no depende de la región, es decir, independientemente de la región se pueden obtener una amplia gama de perfiles de taza.

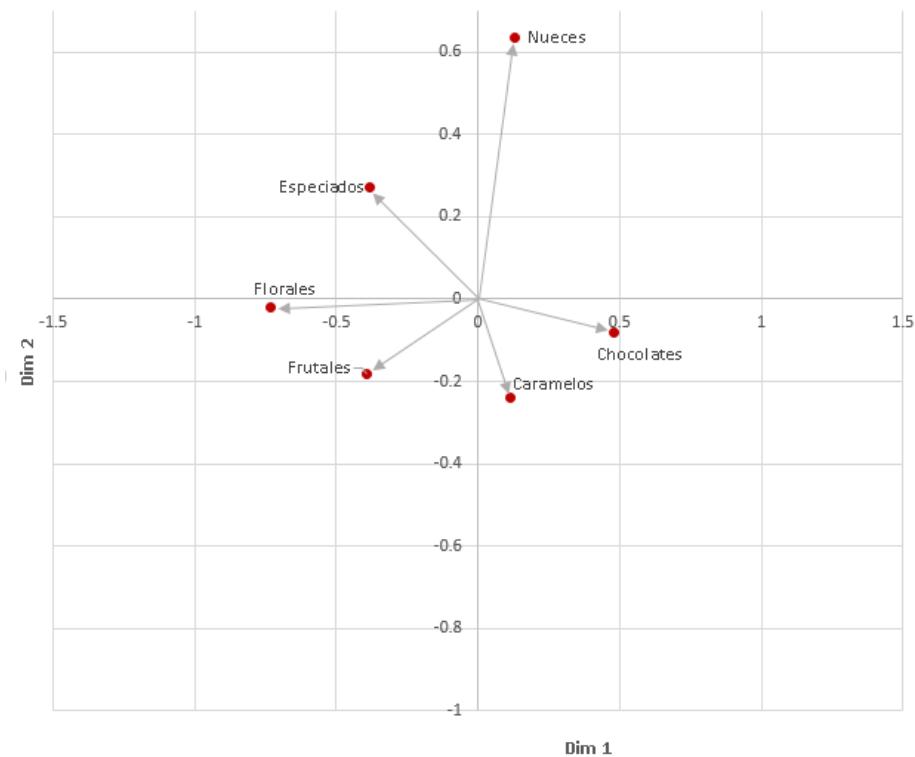


Figura 22. Mapa perceptual de los grupos descriptivos de perfil de taza

En cuanto a las disimilitudes entre los grupos descriptivos, esto puede deberse a las diferentes condiciones climáticas en que se cultivan los cafés. Como se observó con la prueba de independencia, en las diferentes regiones cafetaleras se pueden encontrar todos los perfiles descriptivos, sin embargo, puede haber predominancia de algunas combinaciones de ellos.

En la Figura 23 se muestra de manera gráfica el resultado del análisis de escalamiento multidimensional no métrico con sobreposición de isolíneas de temperatura media anual y precipitación total anual (1960 – 2000 mm), en éste se puede observar que la temperatura tiene una tendencia de aumento de izquierda a derecha, mientras que la precipitación tiene un comportamiento inverso al disminuir en ese sentido, pero la variación de ambas es principalmente sobre la dimensión 1. Lo anterior significa que los grupos descriptores floral y especiado se ubican en zonas de temperatura media anual más baja y de mayor precipitación que el grupo de los chocolates que se ubica en una zona de mayor temperatura y menor precipitación, mientras que los grupos nuez y caramelo se ubican en zonas de temperatura y precipitación intermedia entre los grupos anteriores.

Un caso muy particular entre los cafés provenientes del estado de Veracruz, es el café de Ixhuatlán que es una subregión de la región de Huatusco, que se distingue por un perfil marcadamente dulce y cítrico con notas florales como resultado de las condiciones climáticas en que se cultiva. Lo antes mencionado podría explicarse debido a la presencia de ciertos volátiles como terpenos, cetonas y aldehídos que están presentes, tanto en café verde como en café tostado y que pueden dar sabores florales, dulces, afrutados o parecidos a las mieles. Además, estos compuestos volátiles pueden considerarse marcadores del origen del café. Por lo tanto, podrían indicar que los perfiles frutales están más relacionados con el territorio donde es cultivado el café (Sunarharum et al 2014). Esto apoya los resultados de Mayer (1999) que detectó diferentes concentraciones de compuestos en el café tostado dependiendo de su origen.

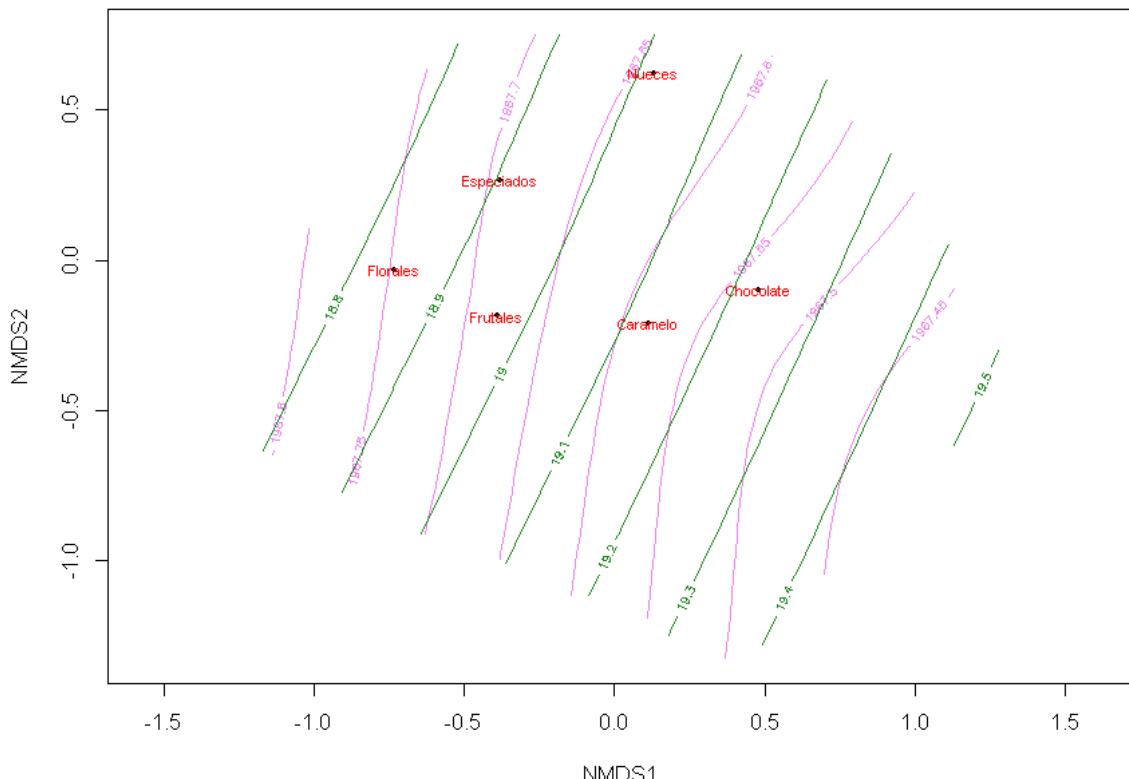


Figura 23. Mapa perceptual de los grupos descriptivos de perfil de taza, con sobreposición de temperatura media anual (línea verde) y precipitación total anual (línea violeta) (1960 – 2000).

En este sentido, podría considerarse que Veracruz cuenta con ventaja en el mercado cafetalero al tener zonas de cultivo con las condiciones agroecológicas adecuadas para producir café de alta calidad (Escamilla et al 2000). Como es sabido, en el estado las zonas montañosas son regiones de clima fresco debido a su mayor altitud y los cafés cultivados en estas zonas tienden a ser más ácidos, tienen una mejor calidad de aroma y exhiben menos defectos de sabor que los producidos en regiones más cálidas (menor altitud). Esto podría explicarse principalmente debido a que la temperatura durante el desarrollo de las semillas tiene un efecto importante en los perfiles sensoriales del café tostado (Bertrand et al 2012).

Se utilizó el coeficiente RV para conocer la similitud entre los datos de puntuación de calidad y los datos de perfiles de taza, es decir, la matriz de los datos cuantitativos y la matriz de los datos cualitativos. Este índice toma valores entre 0 y 1, que se interpreta como un valor de similitud entre las estructuras comunes de los grupos. Toma valores cercanos a uno cuando los grupos son más similares, si el valor es cercano a cero los grupos son más diferentes.

Los resultados obtenidos fueron valores de 0.011 para los factores F1 y de 0.006 para los factores F2. Esto es un indicador de la escasa relación que existe entre los subgrupos descriptores de perfil de taza y las puntuaciones de calidad, lo que podría significar que los catadores no emiten una puntuación con base en la presencia de sabores o aromas máspreciados, o bien que castigan con calificaciones más bajas aquellos cafés que tengan notas que se consideran “defectos” como los pertenecientes al grupo de pirolíticos.

Desde el punto de vista metodológico, el procedimiento de catación es de suma importancia para reconocer y comprender tanto la calidad como los perfiles descriptivos del café. Sin embargo, la identificación y cuantificación de compuestos volátiles y no volátiles en café tostado y su relación con las características climáticas del territorio, podría ampliar enormemente el conocimiento que se tiene tanto del cultivo como de la bebida de café, debido a que éstos compuestos son responsables del aroma y del sabor (Fernández, 2015; Pérez Ochoa, 2016) y los atributos de calidad más apreciados del café.

#### 5.4 Efectos del cambio climático sobre la producción de café de alta calidad

Con base en los resultados del modelo para el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5), se estima que para el año 2039 habría una superficie con condiciones óptimas para el cultivo de café de calidad en el centro del estado de Veracruz de 57,341 ha (Figura 24), lo que representa una disminución del 42% con respecto a la superficie apta históricamente. Así mismo se observa que la región de Tezonapa podría ser la de mayor afectación con una pérdida potencial, hasta 100% de la superficie con condiciones climáticas óptimas para el cultivo de café de calidad. Por el contrario, la región de Misantla es la que presenta un menor impacto con una pérdida potencial del 8% de su superficie óptima para el cultivo de café de calidad (Cuadro 13). Esto podría deberse a las diferencias topográficas y de orientación en la región de Misantla, mientras que en Tezonapa podría deberse además de la diferencia en orientación, a que en general la región tiene una altitud media menor, lo que tiene implicaciones en la cantidad de radiación que recibe, así como en los fenómenos meteorológicos que aportan humedad.

De acuerdo con el informe final del estudio sobre escenarios del impacto del clima futuro en áreas de café en México realizado en 2012 (Läderach et al), todas las regiones productoras de

café muestran un descenso en la aptitud climática, principalmente en la región sur de México. Según este estudio, en 2050 la aptitud del cultivo de café disminuye seriamente, siendo la pérdida más significativa hacia la franja más cercana a la costa de Veracruz, es decir en altitudes menores, prediciendo una pérdida del 35.6% de la superficie apta para el cultivo de café, cifra muy cercana a la obtenida en este trabajo.

Cuadro 13. Superficie con aptitud climática por regiones, para el cultivo de café de calidad en el centro de Veracruz, proyectada al año 2039 bajo escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero y porcentajes de pérdida respecto a la superficie histórica.

<b>Región</b>	<b>Superficie óptima con aptitud climática 2039 RCP 4.5 (ha)</b>	<b>Pérdida (%)</b>
Atzalan	923*	-703*
Coatepec	12,000	41
Córdoba	22,874	38
Huatusco	12,613	44
Misantla	2,703	8
Tezonapa	-	100
Zongolica	6,227	56
<b>TOTAL</b>	<b>57,341</b>	<b>42</b>

\*La superficie con potencial óptimo para producción de café de calidad en la región de Atzalan se incrementa en un 703%, al ganarse terrenos de mayor altitud debido al incremento en la temperatura

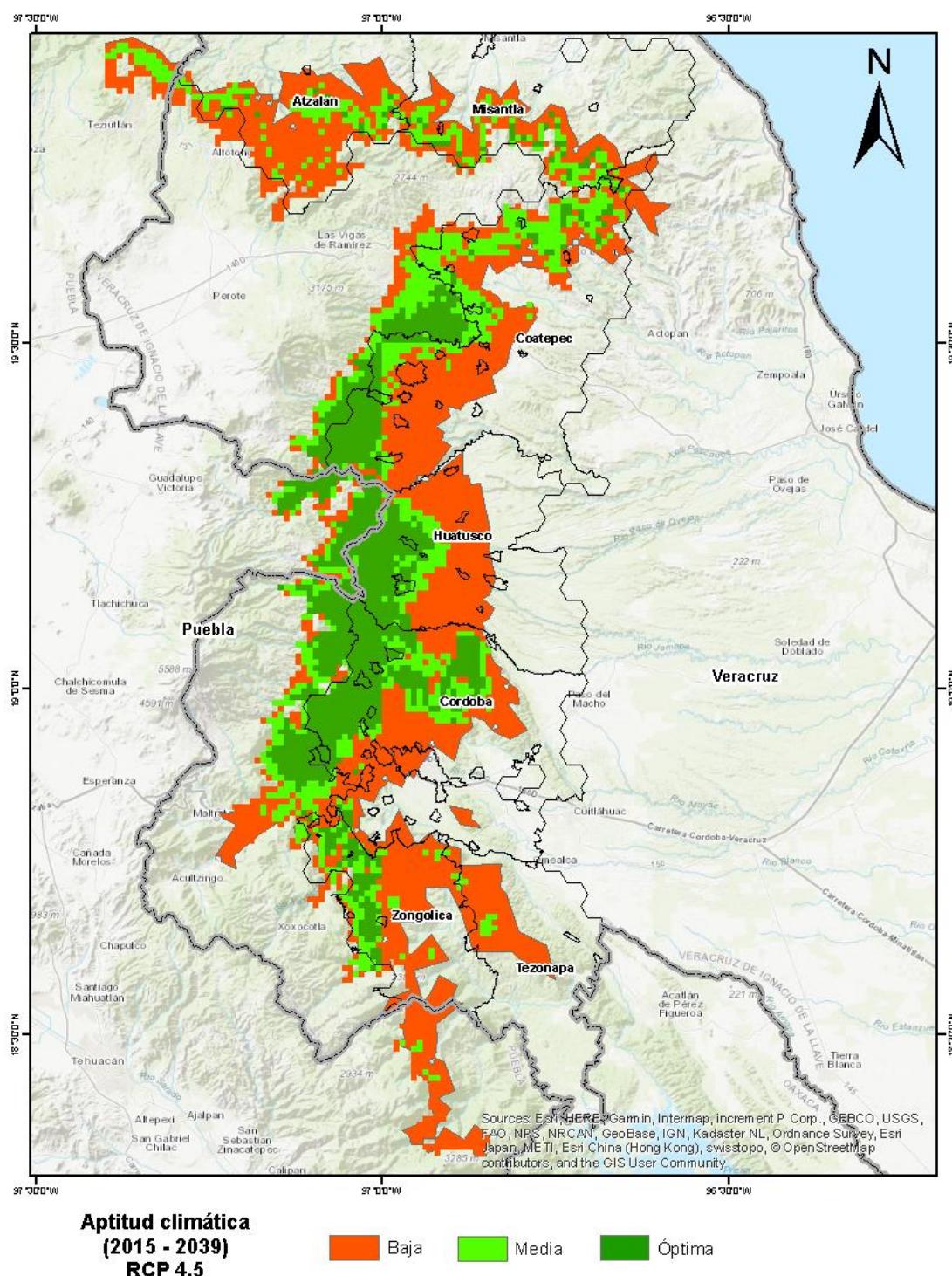


Figura 24. Aptitud climática futura (2039) para la producción de café de alta calidad en la zona centro de Veracruz, en un escenario de baja emisión de gases (RCP 4.5)

Las proyecciones bajo un escenario de altas emisiones de gases (RCP 8.5) estiman que habría un total de 31,074 ha con condiciones óptimas para el cultivo de café de calidad (Figura 25), lo que representa una pérdida del 68% de la superficie. Bajo este escenario las regiones con mayor impacto por la pérdida de superficie óptima para el cultivo de café de calidad son: Atzalan (100%), Tezonapa (100%), Zongolica (93%), Coatepec (86%) y Huatusco (67%). Por el contrario, la región de menor impacto predicho es Córdoba (47%; Cuadro 14). Se esperaría que la aptitud del cultivo de café disminuya seriamente en las zonas de menor altitud.

Cuadro 14. Superficie con aptitud climática por regiones, para el cultivo de café de calidad en el centro de Veracruz, proyectada al año 2039 bajo escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) y porcentajes de pérdida respecto a la superficie histórica.

<b>Región</b>	<b>Superficie óptima con aptitud climática 2039 RCP 8.5 (ha)</b>	<b>Pérdida (%)</b>
Atzalan	-	100
Coatepec	2,847	86
Córdoba	19,620	47
Huatusco	7,499	67
Misantla	242	92
Tezonapa	-	100
Zongolica	916	93
<b>TOTAL</b>	<b>31,074</b>	<b>68.8</b>

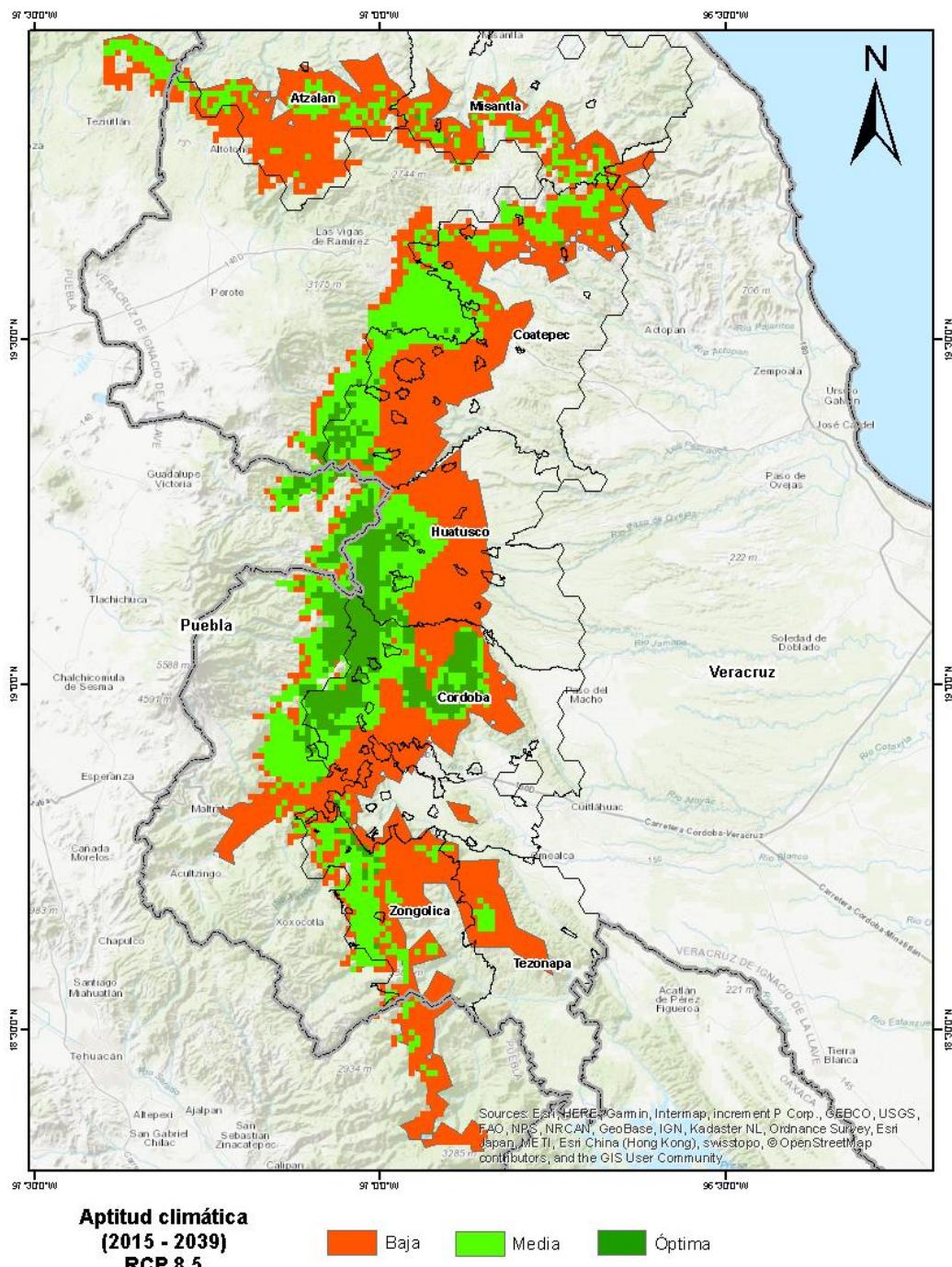


Figura 25. Aptitud climática 2039 para la producción de café de alta calidad en la zona centro de Veracruz, bajo escenario de baja emisión de gases (RCP 8.5)

Por otro lado, con el cambio en las condiciones climáticas en el futuro cercano, las zonas de mayor altitud se benefician en la aptitud para café, es decir, podrían existir zonas que debido a los cambios en temperatura y precipitación, tendrían las características climáticas óptimas para el cultivo de café de alta calidad, lo que pudiera representar una ventaja para algunos productores. En ambos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5), y prácticamente

en todas las regiones cafetaleras pudiera darse el caso de surgimiento de nuevas zonas con aptitud climática para cultivo de café de alta calidad (Cuadro 15 y 16). En la Figura 26 se muestra un comparativo de las zonas de pérdida y ganancia de territorios con aptitud climática, así como aquellas que permanecen sin cambio, por lo que conservan su aptitud climática para el cultivo de café de calidad. La elevación óptima para la producción de café de alta calidad en el escenario histórico está alrededor de los 1,050 msnm, pero para 2039 la elevación óptima aumentará a más de 1300 msnm. Entre el escenario histórico y el escenario a 2039, las áreas a elevaciones entre 850 msnm y 1,100 msnm sufrirán la mayor disminución en la aptitud climática para producción de café de alta calidad, mientras que las áreas por arriba de 1600 msnm tendrán un incremento en la idoneidad. Resultados similares se han observado en Costa Rica (Avelino et al 2005), en Nicaragua (Läderach et al 2017) y en un estudio realizado para cafés con alta acidez en Veracruz (Läderach et al 2011).

Los productores deben analizar los efectos netos (pérdida – ganancia) de estos cambios para realmente entender los posibles efectos del cambio climático sobre el potencial de producir café de alta calidad en sus regiones. En este sentido también es importante resaltar que los productores puedan reducir muchos de los posibles impactos negativos del cambio climático utilizando estrategias de manejo agronómico en sus parcelas. En particular, será importante asegurar un buen manejo de la sombra y escoger con cuidado las variedades más aptas para las condiciones de cada finca. Sin embargo, en zonas donde los cambios climáticos sean más drásticos, es probable que se necesiten estrategias de adaptación. Esto puede incluir la reconfiguración de los sistemas agrícolas (Kates et al 2012; Rickards 2012), que se refiere a cambios fundamentales en los objetivos (Stafford et al 2011). Algunas estrategias de adaptación pueden ser: en elevaciones bajas donde la idoneidad disminuye fuertemente o desaparecen las zonas con aptitud climática se recomienda el reemplazo del café arábica por café robusta, cacao o vainilla y cítricos como el limón persa. En elevaciones medias donde se predicen fuertes cambios negativos se recomienda la selección de nuevas variedades y la diversificación productiva mediante la asociación de cultivos como maíz y frijol, para autoconsumo y venta, de esta manera mejorar la seguridad. Finalmente, en áreas de mayor altitud donde se proyectan cambios positivos se recomienda la expansión de los cafetales, sin embargo, esta expansión debería hacerse hacia áreas que ya se encuentren perturbadas respetando y conservando siempre los relictos de bosques nativos que pudieran existir. Es muy importante considerar este punto con las debidas precauciones y reservas debido al riesgo que pudiera representar la expansión de la frontera agrícola.

Cuadro 15. Superficie de nuevas zonas con aptitud climática para el cultivo de café de alta calidad en la zona ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5).

<b>Región</b>	<b>Superficie ganada 2039 RCP 4.5 (ha)</b>	<b>Ganancia con respecto a la superficie histórica (%)</b>
Atzalan	5,753	21.6
Coatepec	12,453	18.4
Córdoba	5,399	9.5
Huatusco	2,438	6.0
Misantla	6,748	33.8
Tezonapa	0	0
Zongolica	4,598	15.3
<b>TOTAL</b>	<b>37,391</b>	<b>15</b>

Cuadro 16. Superficie de nuevas zonas con aptitud climática para el cultivo del café arábigo en la zona centro de Veracruz ante un escenario de altas emisiones de GEI (RCP 8.5).

<b>Región</b>	<b>Superficie ganada 2039 RCP 8.5 (ha)</b>	<b>Porcentaje ganado con respecto a la superficie histórica</b>
<b>Atzalan</b>	-	-
<b>Coatepec</b>	5,936	8.8
<b>Córdoba</b>	6,046	10.7
<b>Huatusco</b>	2,418	5.9
<b>Misantla</b>	3,202	16
<b>Tezonapa</b>	-	-
<b>Zongolica</b>	2,732	9.1
<b>TOTAL</b>	<b>20,334</b>	<b>10</b>

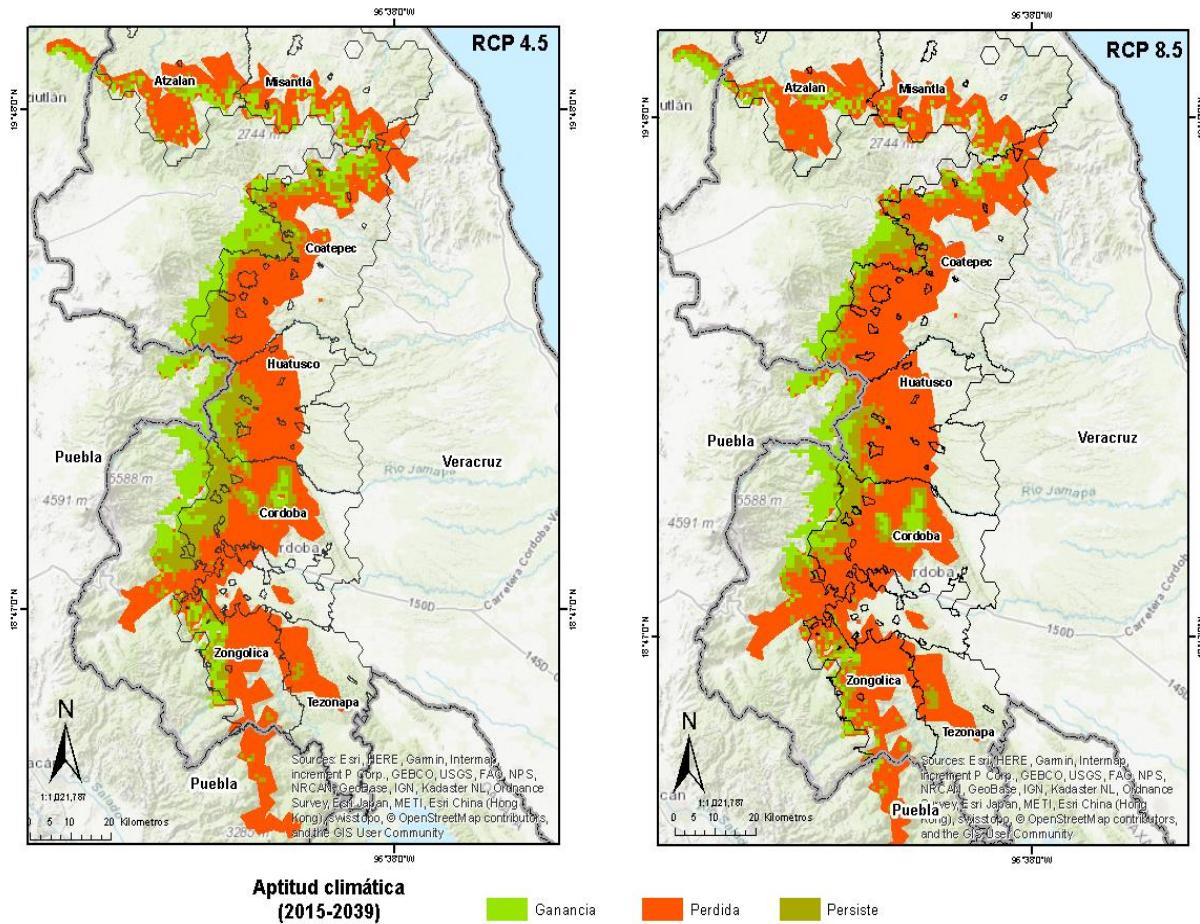


Figura 26. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café de alta calidad en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

## 5.5 Efectos del cambio climático sobre la producción de distintos perfiles de taza

Con base en los resultados del modelo para el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5), se prevé que para el año 2039 la tendencia sea hacia la reducción de la superficie con condiciones climáticas óptimas para el cultivo de café con los perfiles de taza analizados, mediante modelado de nicho ecológico (Ver Cuadro 17). Esta tendencia es general en todos los perfiles descriptivos, siendo el perfil floral el que presentaría la mayor reducción en superficie con aptitud climática óptima (94%), mientras que el perfil de taza nuez es el que representaría la menor pérdida de superficie óptima para la producción de cafés con este perfil (42%). De acuerdo con los modelos generados, la reducción de zonas con aptitud climática se dará principalmente en aquellas zonas que tienen los valores más altos de idoneidad para el escenario histórico (1960 – 2000), ubicadas entre los 900 – 1300 msnm. Esta situación de

reducción en las superficies con condiciones climáticas óptimas, se estima que se agudizaría, de acuerdo a las proyecciones bajo un escenario de altas emisiones de gases (RCP 8.5), siendo el perfil especiado el de mayor afectación, reduciéndose en su totalidad las superficies con aptitud climática óptima, quedando únicamente superficies de aptitud media y baja; mientras que el perfil de taza chocolate, tiene el efecto contrario, de acuerdo con el modelo de altas emisiones de gases se tendría una ganancia de aproximadamente 42% de la superficie histórica, donde la región de Atzalan, la que representaría la mayor ganancia, incrementa su superficie óptima para este perfil hasta en un 600% (Ver Cuadro 18).

Cuadro 17. Superficie con aptitud climática óptima para seis perfiles de taza en regiones cafetaleras del centro de Veracruz, proyectada al año 2039 bajo escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5) y porcentajes de pérdida respecto a la superficie histórica.

REGION	Superficie climática óptima(ha)											
	Chocolate	% Pérdida	Caramelo	% Pérdida	Floral	% Pérdida	Frutal	% Pérdida	Especiado	% Pérdida	Nuez	% Pérdida
Atzalan						100						
Coatepec			4,467.2	84	1,574.5	94	6,465.1	77	6,923.5	75	12,978.2	26
Córdoba	8,537.3	68	11,145	36	1,671.7	82	19,428.9	8	9,325.8	64	23,633	33
Huatusco	110.7	99.5	3,650	81	164.5	98	10,703.8	50	4,040.3	81	12,193	
Misantha												
Tezonapa			79.6	-79				100		100		100
Zongolica			862. 8	89		100	289.1	97		100	539.1	94
TOTAL	<b>8,6478.2</b>	<b>89</b>	<b>20,204.5</b>	<b>73</b>	<b>3,410</b>	<b>94</b>	<b>36,886.8</b>	<b>55</b>	<b>20,289.6</b>	<b>74</b>	<b>49,342.9</b>	<b>42</b>

Cuadro 18. Superficie con aptitud climática óptima para seis perfiles de taza en regiones cafetaleras del centro de Veracruz, proyectada al año 2039 bajo escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) y porcentajes de pérdida respecto a la superficie histórica.

Región	Superficie climática óptima(ha)											
	Chocolate	% Pérdida	Caramelo	% Pérdida	Floral	% Pérdida	Frutal	% Pérdida	Especiado	% Pérdida	Nuez	% Pérdida
Atzalan	5,749.96	-610				100						
Coatepec	24,705.86	-9	3,615.45	87	55.27	99.8	6,536.11	77	-	100	12,569.1	26
Córdoba	49,167.57	-85	13,656.62	22	7,681.51	16	21,633.21	-2.47	-	100	20,424.4	33
Huatusco	23,535.22	-9	4,424.11	77	1,189.19	88.7	12,222.72	43	-	100	8,339.5	
Misantha	204.17											
Tezonapa	457.40	-98	368.88	-369	131.55		83.44	44.5				100
Zongolica	17,709.70	-71	3,554.86	58	1,565.89		2,649.13	77.30			213.24	95
TOTAL	<b>121,529.9</b>	<b>-42</b>	<b>25,619.92</b>	<b>27</b>	<b>10,623.4</b>	<b>80.5</b>	<b>43,124.6</b>	<b>48</b>		<b>100</b>	<b>41,546.3</b>	<b>42</b>

Por otro lado, al igual que en las zonas con aptitud climática para la producción de café de calidad, los modelos para perfiles de taza diferenciados mostraron una serie de expansiones, es decir, podrían existir zonas que debido a los cambios en temperatura y precipitación en el futuro cercano reúnan las características climáticas óptimas para el cultivo de café con perfiles de taza diferenciados, esta situación es común en ambos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8). En las Figuras 27 a 32 se muestra un comparativo de las zonas de pérdida y ganancia de territorios con aptitud climática, así como aquellas que permanecen sin cambio, por lo que conservan su aptitud climática, para el cultivo de café con perfiles de taza diferenciados.

Es importante analizar los efectos netos (pérdida – ganancia) de estos cambios para lograr entender los posibles efectos del cambio climático sobre el potencial de producir perfiles de taza particulares en sus regiones. En este sentido también es importante resaltar que los productores puedan reducir muchos de los posibles impactos negativos del cambio climático utilizando estrategias agroecológicas que permitan mantener y/o mejorar las condiciones micro climáticas particulares de cada finca. En particular, será de suma importancia asegurar un buen manejo de la sombra. Un claro ejemplo de la aplicación de esta técnica se da en Colombia, donde en ciertas zonas del país ayudó, no sólo adaptando las plantaciones a sus condiciones de clima y suelo, sino que también facilitó la adopción de técnicas complementarias de producción sostenible y orgánica, que mejoraron la atmósfera del cafetal y también la atmósfera radicular a partir del reciclaje de nutrientes, lo cual aumentó los contenidos de materia orgánica, y la creación de hábitats favorables para especies animales nativas y migratorias. Esto permitió el acceso a otro tipo de certificaciones, así como mantener y/o incrementar la calidad en taza, permitiendo a los cafeticultores mayor rentabilidad a partir del valor agregado por diferentes sellos de calidad, lo que redunda en la obtención de dinero extra (Mancilla, 2012).

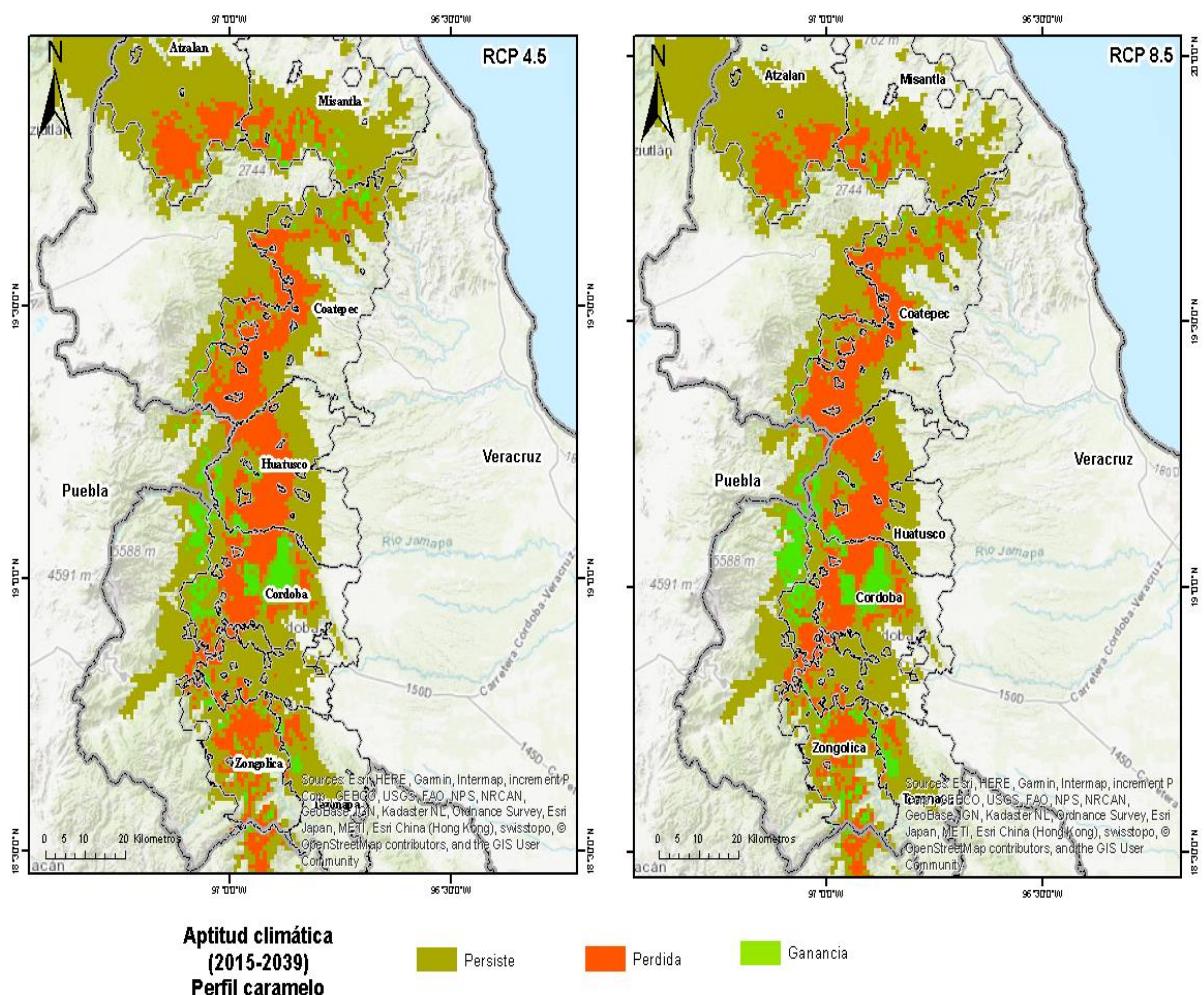


Figura 27. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza caramelito en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

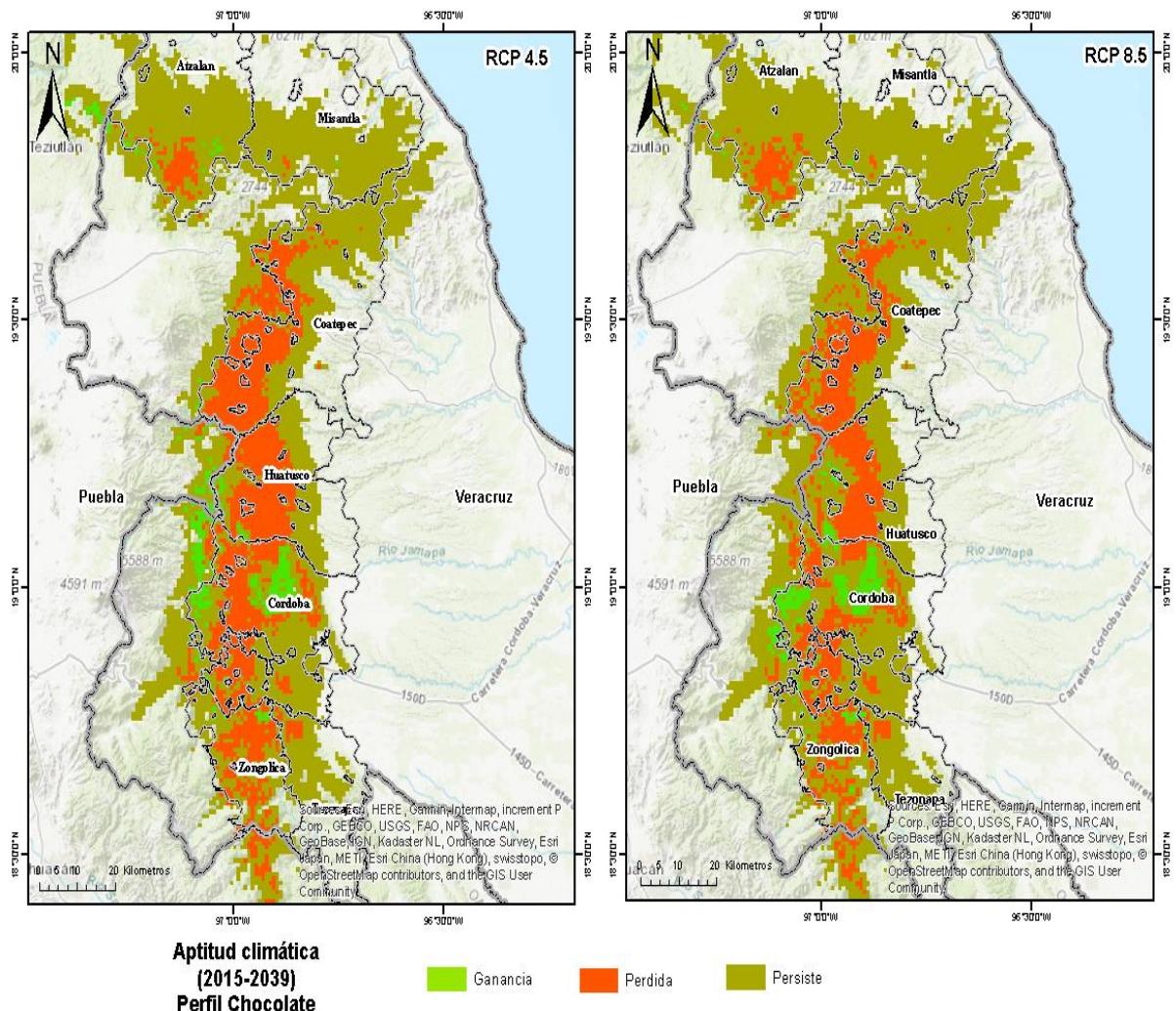


Figura 28. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza chocolate en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

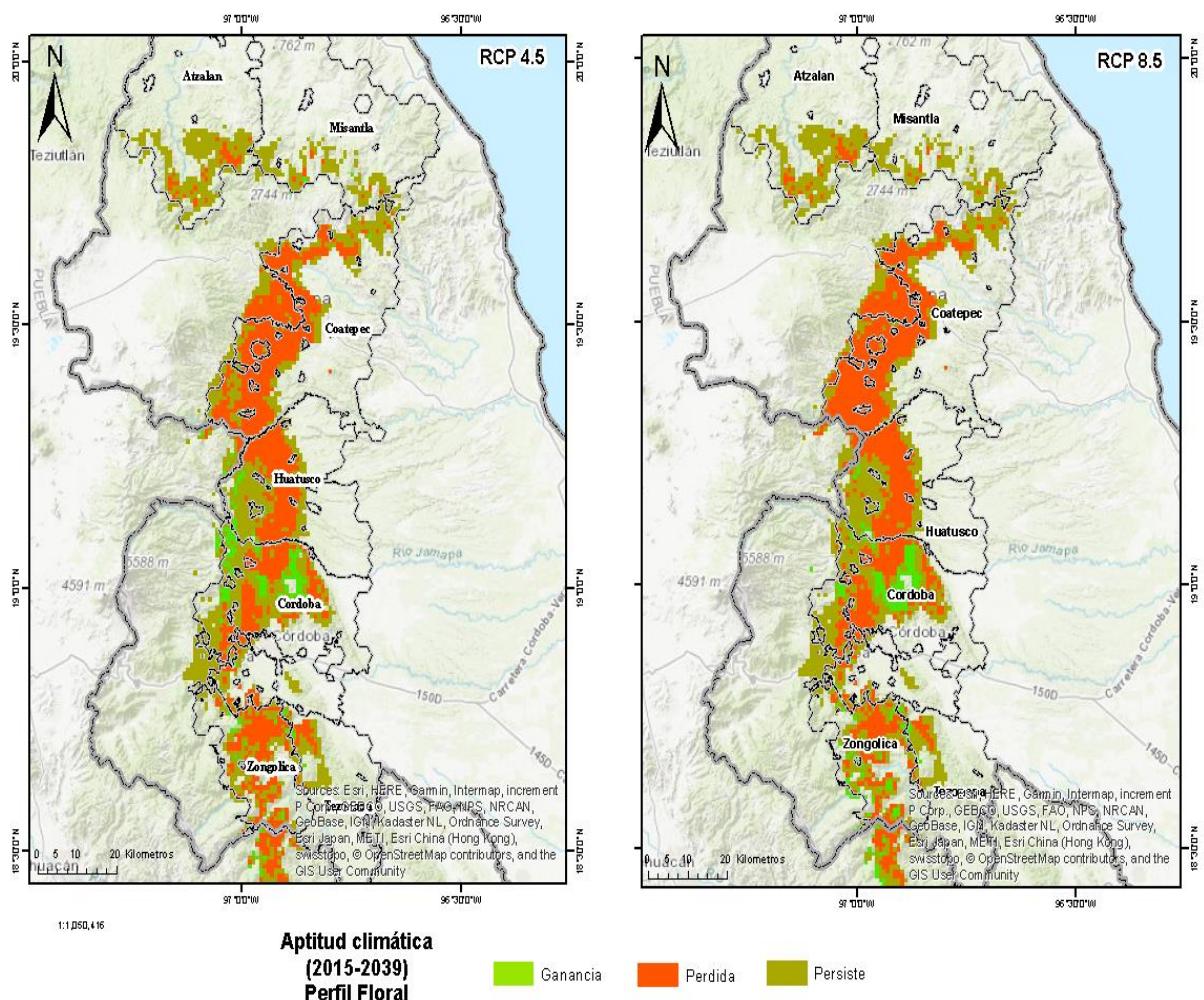


Figura 29. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza floral en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

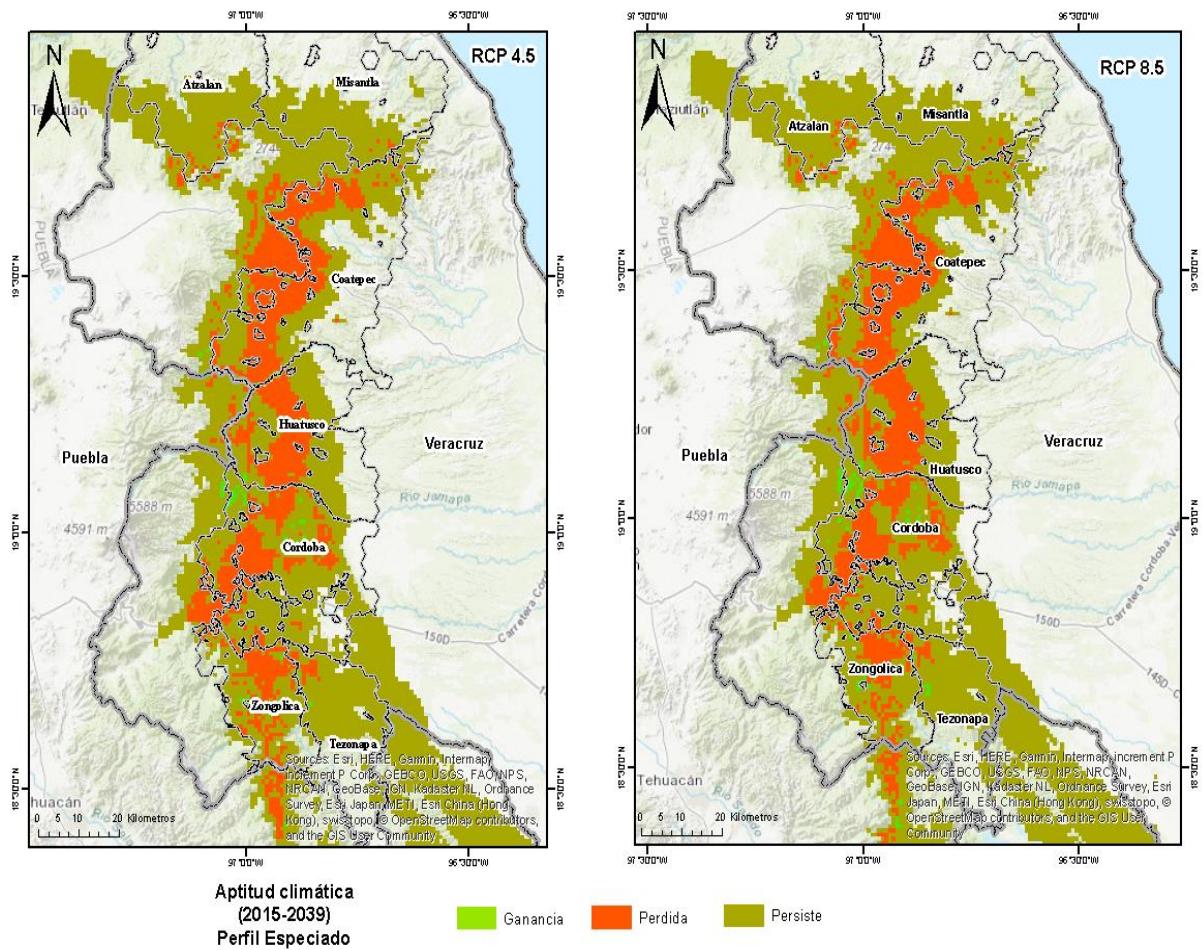


Figura 30. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza especiado en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

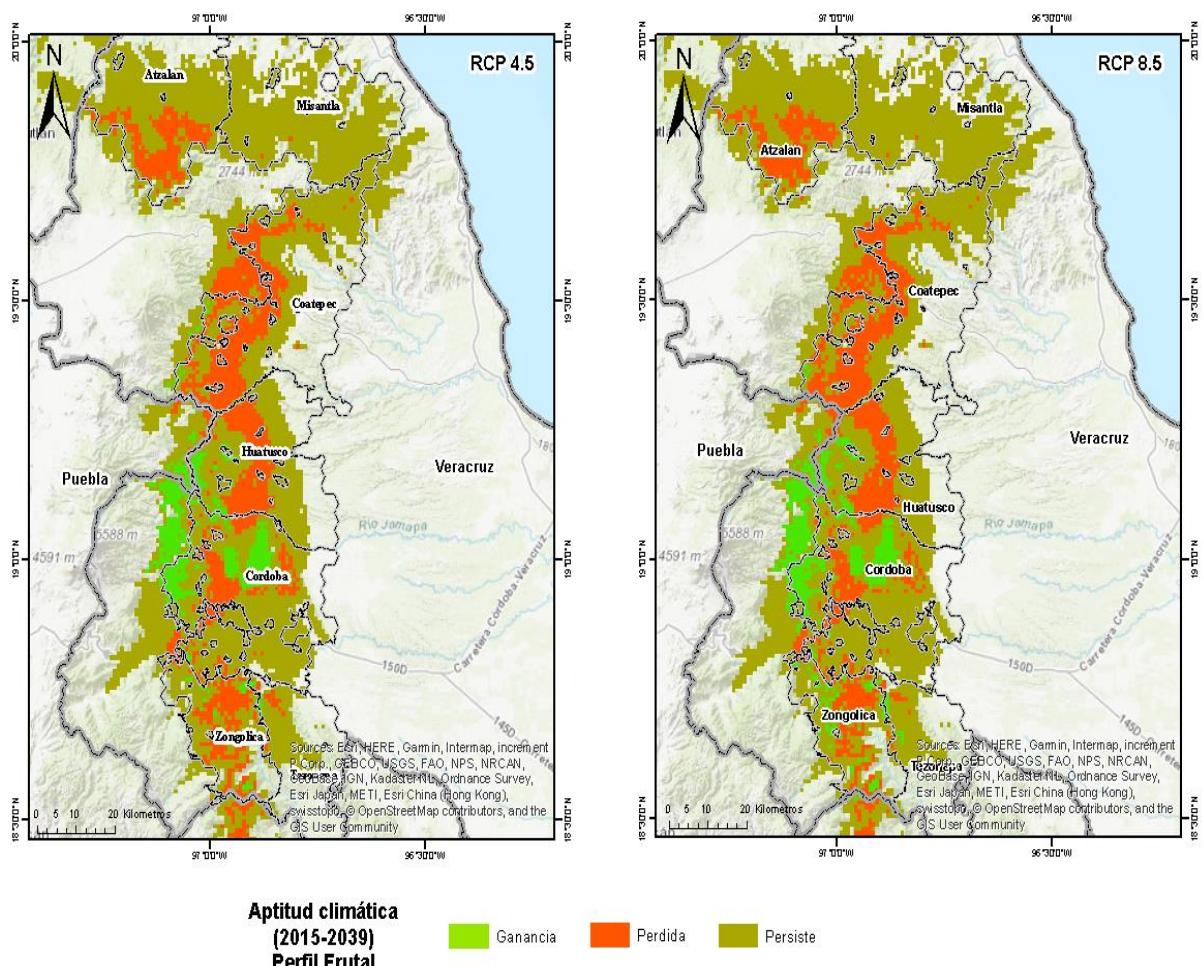


Figura 31. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza frutal en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

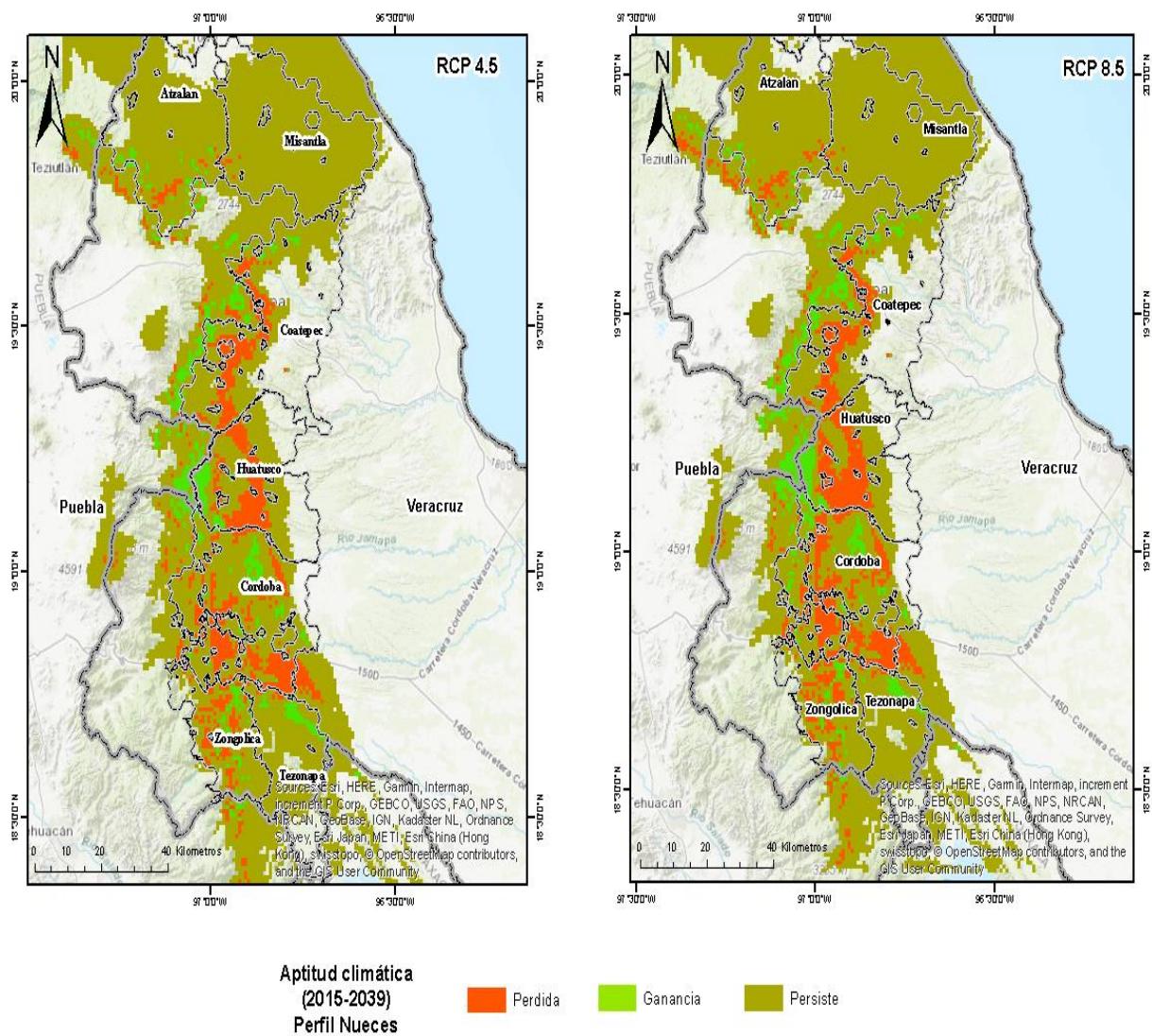


Figura 32. Cambios en las zonas óptimas para la producción de café con perfil de taza nueces en regiones en la zona centro de Veracruz ante un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5) y uno de altas emisiones (RCP 8.5). Es posible apreciar que hay zonas que ganan, pierden o que quedan sin cambios (persistentes).

Mediante el análisis de escalamiento multidimensional no métrico, se pretendió mostrar la similitud entre las variables del conjunto de datos. La Figura 33 representa el resultado gráfico de este análisis, con sobreposición de isolíneas de temperatura media anual y precipitación total anual para el escenario RCP 4.5 (2015 – 2039). Se puede observar que la precipitación tiene una tendencia de aumento en diagonal del cuadrante inferior izquierdo al cuadrante superior derecho, mientras que la temperatura tiene una tendencia de disminución del cuadrante superior izquierdo al cuadrante inferior derecho, es decir, bajo este escenario los grupos descriptores

floral y especiado se ubican en zonas de temperatura media anual más alta que el grupo de los chocolates que se ubica en una zona de menor temperatura. En cuanto a la precipitación, la mayor variación se da sobre la dimensión dos, siendo los grupos descriptores nuez (mayor precipitación) y caramelo (menor precipitación) los que tienen un mayor contraste en cuanto a esta variable climática.

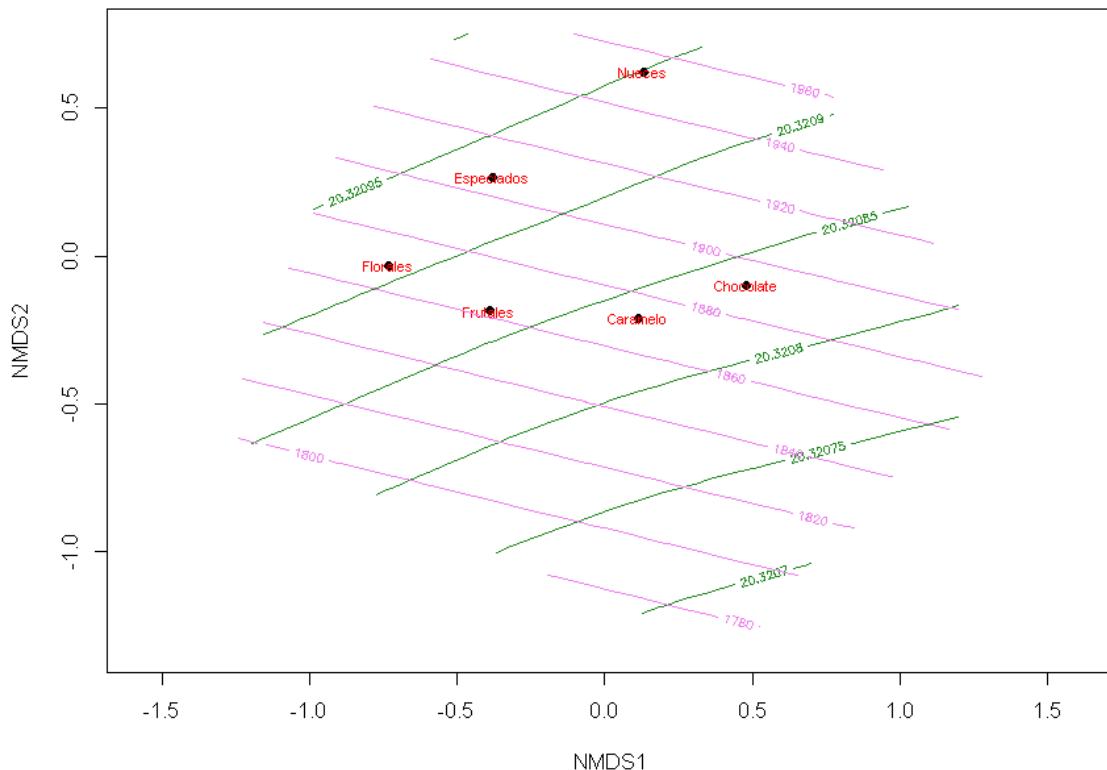


Figura 33. Mapa perceptual de los grupos descriptivos de perfil de taza, con sobreposición de temperatura media anual (línea verde) y precipitación total anual (línea violeta) RCP 4.5 (2039).

En la Figura 34 se muestra el resultado gráfico del análisis de escalamiento multidimensional no métrico, en este caso con sobreposición de isolíneas de temperatura media anual y precipitación total anual para el escenario futuro de mayor emisión de gases de efecto invernadero RCP 8.5 (2039), observándose una tendencia muy similar al escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero, ya que bajo este escenario los grupos descriptores floral y especiado se ubican en zonas de temperatura media anual más alta que el grupo de los chocolates que se ubica en una zona de menor temperatura. En cuanto a la precipitación, la

mayor variación se da sobre la dimensión dos, siendo los grupos descriptores nuez (mayor precipitación) y caramelo (menor precipitación) son los que tienen un mayor contraste en cuanto a esta variable climática.

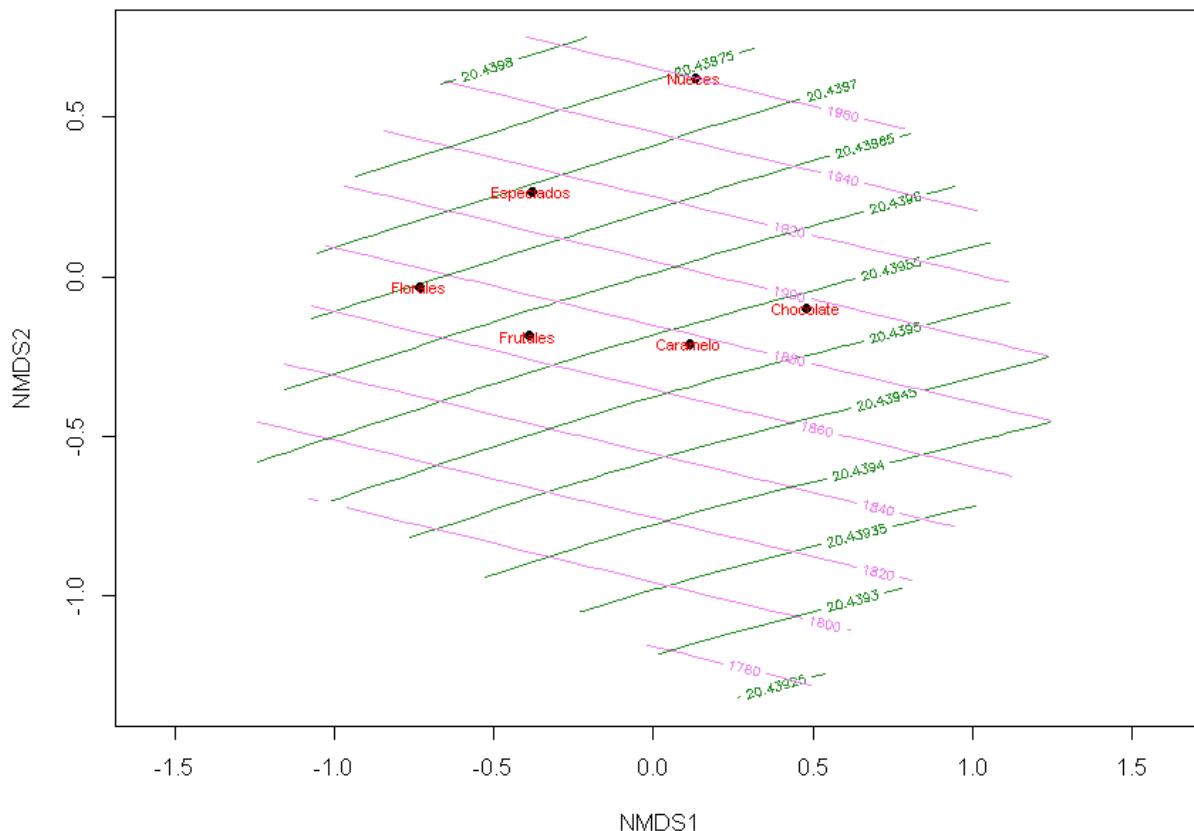


Figura 34. Mapa perceptual de los grupos descriptivos de perfil de taza, con sobreposición de isolíneas de temperatura media anual (línea verde) y precipitación total anual (línea violeta) en escenario RCP 8.5 (2039).

Haciendo un comparativo de los resultados de ambos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero al año 2039 con los datos históricos, se puede observar que estos resultados son consistentes con los modelos generados, es decir, las condiciones climáticas futuras se modifican por lo que las zonas de aptitud climática para los diferentes perfiles de taza ya no reúnen las características necesarias para la producción de los perfiles analizados en este trabajo, lo que estaría modificando las superficies con aptitud climática actual.

## 6. Conclusiones

Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero utilizados en este estudio son contrastantes, uno de bajas emisiones que considera emisiones constantes similares a las actuales (RCP 4.5) y el otro de altas emisiones (RCP 8.5), con un escenario más severo, sin embargo, su probabilidad de ocurrencia no es baja ya que la suposición que se encuentra detrás de este escenario es un mundo muy parecido al actual, con un uso intensivo de combustibles.

Los modelos de nicho ecológico generados para el café de alta calidad y perfiles de taza diferenciados, indican que la temperatura ambiental es la variable de mayor significancia para la obtención de café de alta calidad, sobre todo las temperaturas máximas (Fourniery di Stefano 2004; Gay et al 2006). Los modelos de circulación general sugieren que el cambio climático en las zonas montañosas tropicales conduce a un aumento en temperaturas medias, lo que significaría que las condiciones que actualmente existen a 800-900 msnm se encontrarían entonces entre los 1,100 a 1,300msn, por lo que las zonas cafetaleras se volverían marginales, es decir, de baja aptitud climática, básicamente se estaría dando una migración altitudinal (Läderach, et al 2017; Läderach, et al 2011; Bunn, 2015; Avelino, 2005) . Esta situación muy probablemente tenga un impacto significativamente negativo en la calidad de los cafés que actualmente se cultivan en zonas altas, ya que el cultivo de café a una temperatura ambiente más elevada resulta de una maduración más rápida de la cereza, lo cual se traduce en una taza de café de menor calidad (Vaast et al 2006). Con los resultados obtenidos de las proyecciones a escenarios futuros, se observa que el aumento en la temperatura y el cambio en los patrones de precipitación a causa del cambio climático pueden reducir la idoneidad de las tierras en donde se cultiva café actualmente en la zona centro del estado de Veracruz hasta 68% para el año 2039, ante un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5). No obstante, también muestra ligeros incrementos en la idoneidad de ciertas zonas para la producción de café, principalmente en zonas montañosas de mayor altitud en las que actualmente no se encuentra este cultivo, donde se espera que las temperaturas beneficien la producción del café (Läderach et al 2017, Läderach et al 2011).

Es evidente que una mayor variabilidad climática como consecuencia del cambio climático, también resultaría en afectaciones negativas en el rendimiento (Gay et al 2009; Villers et al 2009), de la calidad de la cosecha de café, ya que éste depende principalmente del microclima que determina las características sensoriales (Avelino et al 2005), así como el incremento en la prevalencia de plagas y enfermedades, ampliando el rango altitudinal en el que sobreviven la

broca del café (*Hypothenemus hampei*) y el hongo que causa la roya del café (*Hemileia vastatrix*) (Läderach et al 2011). Esto agravaría la situación económica y comercial de los productores de café, provocada en los últimos años por la situación internacional del café y la desaparición de las instituciones de apoyo técnico y comercial del gobierno, INMECAFE en el caso de México (Pérez et al 2006). La respuesta del gobierno a estos problemas ha sido otorgar subsidios que son insuficientes y que han actuado únicamente como paliativos, generando una gran dependencia de los pequeños productores a estos apoyos. Todo esto podría traducirse en una capacidad de adaptación muy reducida, con impactos socioeconómicos muy altos (Gay et al 2004). En este sentido, es importante resaltar que tradicionalmente los productores llevan a cabo prácticas agronómicas en sus parcelas que coadyuvan a reducir los posibles impactos negativos, tal es el caso del manejo de sombra en los cafetales. Sin embargo, es probable que se necesiten estrategias de adaptación que reconfiguren los sistemas agroforestales actuales y que permitan al productor diversificar sus cultivos con la finalidad de asegurar su ingreso y con ello su seguridad alimentaria. Algunas de estas estrategias de adaptación propuestas en países como Nicaragua y Colombia (Turbay et al 2014), discutidas en secciones anteriores, podrían ser de utilidad para México ya que los resultados son similares a los nuestros.

Es de suma importancia también la determinación de la calidad de café en taza a través de la catación, ya que esta es un factor indispensable para reconocer y comprender tanto la calidad como los perfiles descriptivos. Además la catación ha mostrado ser de utilidad en la producción y el mercadeo de los cafés especiales y una herramienta para el comprador/consumidor que proporciona realimentación para el productor. Sin embargo, uno de los problemas con el que nos encontramos durante la realización de este trabajo fue la falta de registros de coordenadas geográficas que relacionara a cada muestra catada con la finca de procedencia. Por lo que resultaría indispensable recabar esta información, así como datos sobre las variedades presentes en la finca, tipo de manejo y beneficiado que puedan dar apoyo más certero al momento de hacer conclusiones y propuestas. Además, de contar con un número mayor de datos y una mejor distribución a lo largo y ancho de la zona de estudio podría ayudar a mejorar los modelos. A pesar de que en este estudio no se encontró un efecto de las variedades sobre la evaluación de calidad, resultaría interesante hacer una relación de las variedades con el perfil de taza mediante estudios con procedimientos similares a los planteados aquí, controlando el tipo de variedad y analizándolas por separado. Finalmente, sería muy importante llevar a cabo estudios para la identificación y cuantificación de compuestos volátiles y no volátiles en café tostado y su relación con las características climáticas del territorio y con las evaluaciones de calidad, debido

a que éstos compuestos son responsables del aroma y del sabor (Fernández 2015; Pérez Ochoa 2016) atributos de calidad más apreciados del café. Con esto podría ampliarse en gran medida el conocimiento que se tiene tanto del cultivo como de la bebida de café.

El problema planteado requiere acciones, con políticas públicas y líneas de acción estratégicas dirigidas por el gobierno, ya que el tema de cambio climático debería de formar parte de manera explícita en los planes de desarrollo agrícola. Este conjunto de acciones debe dirigirse a migrar hacia una agricultura climáticamente inteligente que transforme y reoriente los sistemas agrícolas, la caficultura en este caso, de una forma eficaz a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante (FAO, 2019).

Los resultados aquí obtenidos podrían ser usados por los tomadores de decisiones para la planeación del uso del suelo, basándose en los niveles de aptitud potencial para el establecimiento de cultivos de alternativa en el área de estudio. Sin embargo, lo anterior implica un proceso cuidadoso de planeación territorial integral en el que participen los productores locales, toda vez que es común que su experiencia no sea considerada.

## Bibliografía

- Alonso del Val, F.J.; Cofiño, A.; Fernández, J.M.; Ferrer, F.; Francés, E.; Gutiérrez, J.M.; Fernández, B.; Domínguez, M. 2008. La Zonificación agroecológica como mecanismo para potenciar la diversificación de la producción agrícola en Cantabria. Universidad de Cantabria.
- Argotty, F. 14 abr., 2015. Información sobre la cuantificación de la incertidumbre climática a futuro bajo probabilidades con modelos climáticos (correo electrónico). Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- Aristizabal, A., C.; Duque, O., H. 2006. Determinación de economías de escala en el proceso de beneficio del café en Colombia. Cenicafé. 57(1):17 - 30.
- Austin, P. C., & Tu, J. V. (2004a). Bootstrap methods for developing predictive models. *The American Statistician*, 58(2), 131– 137.
- Austin, P. C., & Tu J. V. (2004b). Automated variable selection methods for logistic regression produced unstable models for predicting acute myocardial infarction mortality. *Journal of Clinical Epidemiology*, 57(11), 1138–1146.
- Avelino, J., Barboza, B., Araya, J., Fonseca, C. And Davrieux, F. Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica, Orosi and Santa Maria de Dota. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (11), 2005, p. 1869-1876.
- Becker, R. y Freytag, W. (1992). Manual para el control de la calidad del café. Proyecto de mejoramiento de la calidad y comercialización del café (MECAFE). Santo Domingo, República Dominicana. 68 p.
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10(37– 28), 80–87. Recuperado a partir de <http://repositorio.bibliotecaorto.catie.ac.cr/handle/11554/6806>.
- Bellon, M.R., Hodsonb, D. and Hellinc, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(33): 13432 – 13437.
- BID-CEPAL (2012), Valoración económica de daños y pérdidas. Ola invernal Colombia 2010-2011, Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Bogotá.
- Binotto, F.E., Eiterer, S. C.H., Borges, P. N.M., Machado, J. V. (2011). Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea sp*) na qualidade da bebida. *Bioscience Journal*, 27(5), 729-738. Recuperado de <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7172/7887>.
- Bode,R.,P., Läderach y T. Oberthür. (2006). Gestión de alta calidad-percepciones, lenguajes y paradigmas. In: El cafetal del futuro. Realidades y Visiones. Pohlan, J.; L. Soto y J. Barrera (eds). Shaker Verlag. Aache, Germany. pp. 161-176.

- Borém, F., F. Ribeiro, L. Figueiredo, G. Giomo, V. Fortunato y E. Isquierdo. 2012. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. *J. Stored Prod. Res.* 52, 1-6. Doi: 10.1016/j.jspr.2012.08.004.
- Botello,A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de la zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Gobierno del Estado de Tabasco. Semarnat-ine, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Bruijnzeel LA. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forests: a reassessment. *Land Use and Water Resources Research* 1:1. 1-1.18 ([www.luwrr.com](http://www.luwrr.com)).
- Bubb P, May I, Miles L, Sayer J. (2004). Cloud forest agenda. UNEP-WCMC, Cambridge, UK, 36 p.
- Buenaventura, S.; Castaño, C., 2002. Influencia de la altitud en la calidad de bebida de muestras de café procedente del ecotopo 206B en Colombia. *Revista Cenicafé*. 53(2):119 - 131.
- Bunn C, Läderach P, Pérez Jimenez JG, Montagnon C, Schilling T. Multiclass Classification of Agro-Ecological Zones for Arabica Coffee: An Improved Understanding of the Impacts of Climate Change. *PLoS One* [Internet]. Public Library of Science; 2015 Oct 27; 10(10):e0140490. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1371%2Fjournal.pone>.
- Busby, J. R. (1991): "BIOCLIM—a bioclimatic analysis and prediction tool". In: Margules, C.R., Austin, M.P. (Eds.), *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, Melbourne, pp. 64–68.
- Camargo, A. P.; Santinato, R. y Cortez, J. G. 1992. Aptidao climatica para qualidade da bebida nas principais regioes cafeeiras de arabica no Brasil. En: *Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeras*, 18. Rio de Janeiro, Brasil. 1992. p. 70-74.
- Camargo, M. B. P. 2010. The impact of climatic variability and climate change on Arabic Coffee crop in Brazil. *Bragantia* 69: 239-247
- Cantú, D. y K. Mushinskie, (2004). Guía de defectos del café. United Nations Coffee Company S.A. de C.V., México, D.F.
- Carranza-Edwars, A., L., Rosales-Hoz, M. Caso Chávez y E. Morales de la Garza, 2004. La geología ambiental de la zona litoral. p 1043- 1082. En: M. Caso-Chávez, I. Pisanty, y E. Ezcurra (Eds). *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Semarnat, Instituto de Ecología, A. C., Hearte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Castellanos, E. (2011). Estrategias efectivas de adaptación y reducción de riesgos por fluctuaciones de precios, plagas y cambios climáticos. *Lecciones de la crisis del café en Mesoamérica*. Guatemala. 20:10-39.
- Cavazos, T., Salinas, J.A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto González, R., Bravo. M.E. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Obtenido de <http://escenarios.inecc.gob.mx>
- CCA (1999). Medición del interés de los consumidores en el café de sombra mexicano: evaluación de los mercados de Canadá, México y Estados Unidos. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal.

CEDRSSA (2006). Café: la agro exportación. In Balance y expectativas del campo mexicano, pp. 25-35. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, México, D.F.

CEFP (2001). Centro de Estudios de Finanzas Públicas. El mercado del café en México. Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión.

Consejo Veracruzano del Café. (2003). Avances del censo cafetalero. Base de datos. Consejo Veracruzano del Café, Xalapa, Veracruz.

Consorcio QUIRI – SHIWI, 2016. Servicio de elaboración del plan de conservación de la diversidad genética de la castaña en el Perú. Dirección General de Diversidad Biológica, Ministerio del Medio Ambiente.

Cortés-Delgado, N., V.J. Sosa. 2014. Do bats roost and forage in shade coffee plantations? A perspective from the frugivorous bat *Sturnira hondurensis*. *Biotropica* 46 (5): 624-632.

Cuervo-Robayo, A.P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M.A., Venegas-Barrera, C.S., Manjarrez, J. & Martínez-Meyer, E. (2013) An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*. 10.1002/joc.3848.

Descroix, F., & Snoeck, J. (2004). Environmental Factors Suitable for Coffee Cultivation. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers* (pp. 164–177). Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GMBH & Co. KGaA.

Duicela, L.; Farfan, D; García. J; Corral, R. y Chilan, W. 2004. Post-cosecha y calidad del café arábigo. Primera edición. COFENAC, ULTRAMARES, PROMSA. Manta, Ecuador.

Eakin H, Tucker, CM, Castellano E. (2006). Responding to the coffee crisis: a pilot study of farmers' adaptations in Mexico, Guatemala and Honduras. *The Geographical Journal* 172(2):156-171.

Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakazawa, M., Nakamura, Y., Overton, J.McC., Peterson, A.T., Phillips, J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M. and Zimmermann, E. (2006), “Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data”, *Ecography*, Vol. 29, pp. 129-151.

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y. E., and Yates, C. J. (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43-57.

Escamilla E, Licona A, Díaz S, Cortés S, Sosa R, Rodríguez L. 1994. Los sistemas de producción del café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. *Revista de Historia* (Centro de Investigaciones Históricas Universidad de Costa Rica) pp. 30:41- Escamilla, P. E. y Díaz, C. 2002. Sistemas de cultivo de café en México. México: CRUO-CENIDERCAFE, Universidad Autónoma Chapingo. 64 p.

Escamilla, P. E., O. Ruiz R.; D. E. Platas R.; C. Landeros S.; A. Zamarripa C. y V. A. González H. 2004. Influencia del sombreado y las variedades en la calidad del café orgánico en cinco regiones de México. Proyecto de Investigación C. P., UACH., INIFAP. Fondos Sectoriales SAGARPA-CONACYT (Clave SAGARPA-2003-C01-156). México. 12 p

Escamilla, P. E. 2007. Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México. Agroecosistemas tropicales. Tesis de doctorado. Colegio Postgraduados campus Veracruz. 267 p.

Escarramán, Amadeo; Romero, José; Almonte, Isidro; Ribeyre, Fabienne; Aguilar, Philip; Jiménez, Héctor; Causse, Arnaud; Olivares, Frank; Batista, Ignacio. (2007). Determinación de los atributos de calidad del café en zonas productoras de la República Dominicana. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF) y Consejo Dominicano del Café (CODOCAFE). Santo Domingo, DO. 98p.

Escobedo, Adriana. Análisis de las tendencias de consumo de café diferenciado en Costa Rica y Estados Unidos. Universidad EARTH (2007), Costa Rica

Espinosa, J. y A. Roquera: “Zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en las provincias de: Bolívar, Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua”, Revista Rumipamba, Vol. 21(1): 54-56, 2007.

Fajardo, P., I. F. y Sanz U., J. R. 2003. Evaluación de la calidad física del café en los procesos de beneficio húmedo tradicional y ecológico (Becolsub), 2003. En: Cenicafé. s.l.: 2003. Vol. 54, No. 4. p. 286-296.

Fernández Alduenda, M.R., Lusk, K.A., Silcock P. & Birch, E.J. (2014). Descriptive Cupping: a rapid coffee flavour profiling method using the Specialty Coffee Association of America (SCAA) cupping protocol. Association for Science and Information on Coffee (ASIC) 2014 Conference. 8th – 13th of September, 2014, Armenia, Colombia. [Oral presentation].

Fernández Alduenda, M. R. (2015). Effect of Processing on the Flavour Character of Arabica Natural Coffee. (PhD – Food Science), University of Otago, Dunedin, New Zealand.

Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C. y Trejo Vázquez, R.I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INDAUTOR 04-2011-120915512800-203. Obtenido de: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>

Fielding, A.H. and Bell, J.F. A review of methods for the assessment of predictions errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 1997, vol. 24, no. 1, p. 38-49.

Francisco Aguirre, (1999). 12. Nueva participación gubernamental en la cafeticultura. Recuperado de Revista Vinculando: <http://vinculando.org/mercado/cafe/caracpolmx1.html> Barve, N, Barve V; Jiménez V.A; Lira, N.A; Maher, S.P; Peterson, A.T; Soberón, J y Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling.

Franklin, J. (2009). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

García, E. (1970). Los climas del estado de Veracruz. Anales del Instituto de Biología UNAM. Serie Botánica 1:3-42.

Gaston, A.; Soriano, C. Contribution of the Forest Map of Spain to the chorology of Woody plant species. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 2006, vol. 15, no 1, p. 9-13.

Gaston A.; Soriano, C.; Gómez-Miguel, V. Lithologic data improve plant species distribution models based on coarse-grained occurrence data. *Forest Systems*, 2009, vol. 18, no 1, p. 42-49.

Giorgi, F. y Mearns, L. O. (2002). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *Journal of Climate*, 15, 1141-1158.[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0444\(2002\)015%1141%3ACOaura%2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0444(2002)015%1141%3ACOaura%2.0.CO%3B2)

Gobierno del estado de Veracruz. (2005). El café en Veracruz. <http://www.veracruz.gob.mx/>

Gómez T., L. y M.A. Gómez C. (2004). La agricultura orgánica en México y el mundo. *Biodiversitas* 55: 13-15.

Gómez, A. & Saldías, C. (1994). Sombrío de cafetales, 1 edición. (ed.), Centro Gráfico Ltda. Colombia.

Gordon C, Manson RH, Sundberg J, Cruz Angón A. (2007). Biodiversity, Profitability, and Vegetation Structure in Coffee Agroecosystems of Central Veracruz, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118:256-266.

Greenberg, (2002). Coffee, Conservation, and Commerce in the Western Hemisphere: How individuals and Institutions Can Promote Ecologically Sound Farming and Forest Management in the North Latin American. NRDC.

Haggar, J., & Schepp, K. (2012). Coffee and Climate Change Impacts and options for adaption in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam (No. 4). NRI Working Paper Series: Climate Change, Agriculture and Natural Resources.

Harris, R.M.B., Porfirio, L.L., Hugh, S., Lee, G., Bindoff, N.L., Mackey, B., 2013. To Be Or Not to Be? Variable selection can change the projected fate of a threatened species under future climate. *Ecol. Manage. Restor.* 14, 230-234

Hernández-Martínez, G. (2008). Clasificación Agroecológica. In: Manson, R., Hernández-Ortiz, V., Gallina, S., Mehltreter, K. (Eds). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación* Instituto de Ecología A.C. Instituto Nacional de Ecología, pp 83-93.

Hernández F. A, (2010). Consumo de café en México y el papel de las cafeterías. Recuperado de Revista Vinculando: [http://vinculando.org/empresas/consumo\\_de\\_cafe\\_en\\_mexico\\_importancia\\_de\\_las\\_cafeterias.htmlHijmans](http://vinculando.org/empresas/consumo_de_cafe_en_mexico_importancia_de_las_cafeterias.htmlHijmans).

Hincapié, E. & Salazar, L. (2007). Manejo integrado de arveses en la zona cafetera central de Colombia. Programa de investigación científica. Centro Nacional de Investigaciones de Café “Pedro Uribe Mejía”. Cenicafé, Chinchiná, Caldas - Colombia. Avance técnico 359.

R.J. and Graham, C.H. (2006), “The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions”, *Global Change Biology*, Vol. 12, pp. 2272-2281.

ICO (2006). Total production of exporting countries: crop years 2000/01 to 2005/06. International Cofee Organization. <http://dev.ico.org/prices/po.htm>.

INMECAFE (1990). Conteo Nacional de Café. Instituto Mexicano del Café, México, D.F:

ITC (2011). International Trade Center. Tendencias del comercio de café certificado. Ginebra, 2011.

Jeschke, J. M., & Strayer, D. L. (2008). Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 1–24. doi: 10.1196/annals.1439.002

Jiménez L. R, (2014). Estudio de mercado y tendencias de las certificaciones agrícolas relevantes para el grano de café ecuatoriano.

Jiménez Ávila, E. y Gómez-Pompa, A. 1982. Estudios ecológicos en el Agroecosistema cafetalero. CECSA-INIREB. Xalapa, Ver. México. 143 p.

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>

Kates RW, TravisWR,Wilbanks TJ (2012) Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 109(19):7156–7161

Läderach, P.; Oberthür, Th.; Niederhauser, N.; Usma, H.; Collet, L. y Pohlan, J. 2006. Café Especial: Factores, dimensiones e interacciones En: Pohlan, J.; Soto, L.; Barrera, J. (Editores): El cafetal del futuro: Realidades y Visiones. Aachen, Shaker Verlag, 141-160.

Läderach, P.; Haggar, J.; Lau, C.; Eitzinger, A.; Ovalle, O.; Baca, M.; Jarvis, A.; Lundy, M. 2011. Café mesoamericano: Desarrollo de una estrategia de adaptación al cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 2. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.

Läderach, P., Zelaya C., Ovalle O., García S., Eitzinger A. y Baca M. 2012. Escenarios del Impacto del Clima Futuro en Áreas de café en México. Informe final.

Läderach, P., Haggar, J., Lau, C., Eitzinger, A., Ovalle, O., Baca, M., Lundy, M. (2013). Café mesoamericano desarrollo de una estrategia ante el cambio cimatico. Cali, Colombia: CIAT.

Läderach P., Ramírez-Villegas J., Navarro-Racines C., Zelaya C., Martínez-Valle A., Jarvis A. 2016. Climatic change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change* (2017) pp 141:47-62.

Lara, L., Vaast P., 2007. Effects of altitude, shade, yield and fertilization on coffee quality (*Coffea arabica* L. var. *Caturra*) produced in agroforestry systems of the Northern Central Zones of Nicaragua. En: Second International Symposium on Multistrata agroforestry systems with perennial crops: Making ecosystem services count for farmers, consumers and the environment, Costa Rica. IUFRO, CIRAD, CATIE. Turrialba.

Lasso B., Cruz G., Haro P.: Zonificación agroecológica de tres cultivos estratégicos (Maíz, Zea mayz; Arroz, Oryza sativa; Caña de azúcar, Saccharum officinarum) en catorce cantones de la cuenca baja del río Guayas, Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), Venezuela, 2011.

- Leroy, T., Ribeyre, F., Bertrand, B., Charmetant, P., Dufour, M., Montagnon, C., (2006). Genetics of coffee quality. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18, 229–242.
- Lewin, B; Giovannucci, D; Varangis, P. 2004. Coffe markets new paradigms in global suply and demand. *Agricultural and Rural Development Discussion Paper*, 3
- Linares, G. (2001). Escalamiento Multidimensional: conceptos y enfoques. *Revista de Investigación Operacional*, 22(2), 173-183.
- López, M. R., P. G. Díaz y R. J. Martínez. (2007). Potencial productivo y tipología de productores de café en la zona centro del estado de Veracruz. INIFAP. México, D. F.
- Mancilla, D. G (2012). Aplicación del sombrío del cafeto (*Coffea arabica*) en Colombia. *Conexión Agropecuaria*. pp 37-48
- Manson R.H., Hernández-Ortiz V., Gallina S. y Me. Alhltreter K. (editores). (2008). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 348 p.
- Marchal, J. y Palma, R. (1985). Análisis gráfico de un espacio regional: Veracruz. INIREB/ORSTOM, Xalapa., Ver, Mex. 220 pp.
- Marín, L. S. M., Arcila, P. J., Montoya, R. E. C., y Oliveros T.,C.E. (2003). Relación entre el estado de madurez del fruto de café y las características de beneficio, rendimiento y calidad de la bebida. *Cenicafe*, 54(4), 297–315.
- Martínez P., D., E., Pérez.,J.G., Partida S y P.Läderach. (2002). Algunos impactos de los efectos abióticos, bióticos y el proceso industrial sobre características relacionadas con la calidad del café en Veracruz, México. In: *El cafetal del futuro. Realidades y Visiones*. Pohlan, J.; L. Soto y J.Barrera (eds). Shaker Verlag. Aache, Germany. pp. 177-188.
- Mayer, F.; Czerny, M.; Grosch, W. (1999) Influence of provenance and roast degree on the composition of potent odorants in Arabica coffees. *Alemania : European Food Research and Technology* 209:242-250.
- Moguel, P. y V.M. Toledo, (1996). El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13(1), 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>
- Moguel, P., & Toledo, M. V. (2004). Conservar produciendo: Biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas*, 55, 1–7. Recuperado a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv55art1.pdf>.
- Morales G. M.; Virgilio F.E.; Jones L. C.; Tinoco. J.A., 2011. Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la Sierra Madre de Chiapas.
- Myers N. (1997). The world's forests and their ecosystem services. En: Daily GC, editor. *Natures Services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, DC. P 215-235.Nolasco, M. 1985. Café y sociedad en México. Centro de Ecodesarrollo, México.

Nestel D.F. (1995). Coffe in Mexico: international market, agricultural landscape and ecology. *Ecological Economics* 15:165-178.

Oriana Ovalle-Rivera, O.; Läderach mail, P.; Bunn, C.; Obersteiner, M.; Schroth, G. 2015. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change (en línea). Consultado 11 jun., 2015. Disponible en: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0124155>

Ortiz Pérez, M. A., y A. P. Méndez Linares, 2003. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y Mar Caribe. Gay, C. (Ed). México: una visión hacia el Siglo xxi. El cambio climático en México. UNAM. [en línea].

Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G (2015) Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLOS ONE* 10(4): e0124155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155> Özdamar, K. (2004). Paket Programalar ile İstatistiksel veri Analizi. Eskisehir: Kaan Kitavebi.

Pappa, Florencio (2003). La Diversificación de Ingresos en la Empresa Cafetalera. Versión preliminar. Estudio realizado por ANACAFE. Guatemala

Pearce, J. Ferrier, S. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling*, 2000, vol. 133, no 3, p. 225-245.

Pearson, R.G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Lessons in conservation*, 2007, vol.3, p 54-89.

Pérez P., E., J. G. Partida S. y D. Martínez P. (2003). Ambiente, manejo agronómico y calidad en café (folleto). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Centro Regional Universitario Oriente de la Universidad Autónoma Chapingo. Veracruz, México.

Pérez P., E., J. G. Partida S. y D. Martínez P. (2000). Determinación de las subdenominaciones de origen del Café Veracruz (estudio preliminar). *Revista Geografía Agrícola* 35: 35-56.

Pérez A. P., Echánove H. F. Cadenas globales y café en México. Cuadernos Geográficos [en línea] 2006, [Fecha de consulta: 28 de diciembre de 2017] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17103804>> ISSN 0210-5462

Pérez P., E. y D. Geissert K. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) - Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia* 31: 556-562.

Perfecto I, Vandermeer J. (2002). Quality of agroecological matrix in a tropical montane landscape: ants in coffee plantations in southern Mexico. *Conservation Biology* 16(1):174-182.

Peterson, A. T., (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, 3, 59–72. doi: 10.17161/bi.v3i0.29

Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura, & M. B. Araújo. (2011). Ecological niches and geographic distributions. Princeton: Princeton University Press.

Peterson, T. and J. Soberón. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*. 10(2): 1-6.

Pineda López M.R, Ortiz Ceballos G., Sánchez Velázquez R.L. 2005. Los cafetales y la captura de carbono: un servicio ambiental aun no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques*, año/vol 11 número 002. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México, p 3-14.

Phillips SJ, RP Anderson & RP Schapire, (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259

Phillips SJ.; Dudick, M.; Schapire, R.E. A maximum entropy approach to species distribution modelling. En: *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, ACM, 2004, p.83.

Ponte S. (2002). The ‘latte revolution’? Regulation, markets and consumption in the global coffee chain. *World Development* 30:1099-1122.

Puerta, G. 1996. Escala para la evaluación de la bebida de café verde *Coffea arabica L*, proceso vía húmeda. *Cenicafé*. 47(4):231 - 234.

Puerta, G., 2000. Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. *Avances técnicos Cenicafé*. 276:1 - 8.

Puerta, G., 2000. Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. *Cenicafé*, 51 (2), 136-150.

Quinta Comunicación Nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2012) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (Primera Ed.) México: Grupo Communicare, S.C. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>

Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A, Fa J, editores. 1993. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. Oxford University Press, NY, 812 p.

Real, R., Luz Márquez, A., Olivero, J., & Estrada, A., (2010). Species distribution models in climate change scenarios are still not useful for informing policy planning: An uncertainty assessment using fuzzy logic. *Ecography*, 33(2), 304–314. doi: 10.1111/j.1600-0587.2010.06251.x

Rena, A.B.; R. Santos-Barros, M. Maestri y M.R. Söndal. (1994). Coffee. In B. Schaffer y P.C. Andersen (Eds.). *Handbook of environmental physiology of fruit crops*, pp. 101-122. CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida.

Renard, M. C. 2002. La comercialización internacional del café. Colección de cuadernos universitarios, Serie Ciencias Sociales No. 11, Universidad Autónoma Chapingo, 92 p.

Renard, C. (1999). Los intersticios de la globalización. Un label (Max Havelaar) para los pequeños productores de café, *Misceláneas*, México.

Rickards LHS (2012) Transformational adaptation: agriculture and climate change. *Crop Pasture Sci* 63(3):240–250

Rogers, W. J.; Michaux, S.; Bastin, M. Bucheli, P. (1999). Changes to the content of sugars, sugar alcohols, myo-inositol, carboxylic acids and inorganic anions in developing grains from different varieties of Robusta (*Coffea canephora*) and Arabica (*C. arabica*) coffees. *Plant Science*, v. 149 p. 115–123.

SAGARPA (2005). Plan rector del sistema producto café en México. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, D.F.

SAGARPA. (2007). Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimento ([http://www.sagarpa.gob.mx/ar\\_comanuar.html](http://www.sagarpa.gob.mx/ar_comanuar.html)).

SAGARPA. (2013). Cultivos agroindustriales: impactos café. Recuperado a partir de [http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Cultivos\\_Agroindustriales/Impactos\\_Café.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Cultivos_Agroindustriales/Impactos_Café.pdf)

SAGARPA (2016). Estrategia de atención técnica 2016. Procafe-PIAC. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, D.F.

Santoyo C., V. H., S. Díaz C., E. Escamilla P., y J. D. Robledo M.. 1996. Factores Agronómicos y Calidad del Café. Universidad Autónoma Chapingo. Confederación de Productores de Café. Chapingo, México. 21 p.

Saupe, E.E; Barve, V; Myers C.E; Soberón, J; Barve, N; Hensz, C.M; Peterson, A.T; Owens, H.L; Lira, N.A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. Ecological Modelling 237-238:11-22.

Schroth, G., Laderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Haggar, J., Eakin, H., Ramirez-Villegas, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 14(7), 605-625. <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>

Shankaranarayana, M. (1996). Evaluation of Coffee Quality Using Chemical and Instrumental Methods Journal of Coffee Research 16(12): 14-22

SIAP. (2002). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación ([http://www\\_siap.gob.mx](http://www_siap.gob.mx)).

Skovmand, A., Dons, K., Oberthur, T., Smith, C., Raebid, A. And Usma, H. The influence of shade trees on coffee quality in small holder coffee agroforestry systems in Southern Colombia. Agriculture, Ecosystems & Environment, 129, 2009, p. 253-260.

Soberón, J. y A.T. Peterson 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. Biodiversity Informatics. 2:1-10.

Sosa M., L., E. Escamilla P. and S. Díaz C. (2004). Organic coffee. pp. 339-354. In: J. E. Wintgens (ed.). Coffee: growing, processing, sustainable production. A guide book for growers, processors, traders and researchers. WILEY-VCH Verlag KGaA. Weinheim, Germany.

Stadtmüller, T. Agudelo N. (1990). Amounts and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. No 193, p. 25-32

Stafford MHL, Harvey A, Hamilton C (2011) Rethinking adaptation for a 4 °C world 2010. Philos Trans R Soc 369(1934):196–216

Stockwell, D. y D. Peters. (1999). The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. International Geographic Information Science 13:143-158.

Sunarharum, W., D. Williams y H. Smyth. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Res. Int.* 62, 315-325. Doi: 10.1016/j.foodres.2014.02.030

Tejeda M., A.; F. Acevedo y E. Jáuregui. (1989). Atlas climático del estado de Veracruz. Textos Universitarios. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.

Tejeda M., A.; M. E. Guadarrama, C.A. Ochoa , A. Medina Chena, M. E. Equihua, A. Cejudo, C. M. Welsh, S. Salazar, T. García, M. Marín, (2008). Resumen del programa veracruzano ante el cambio climático.

Turbay, S., B. Nates, F. Jaramillo, J. J. Vélez y O. L. Ocampo (2014), “Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia”, *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 85, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 95-112, dx.doi.org/10.14350/rig.42298.

UACH. 2005. Acciones de Fomento Productivo y Mejoramiento de la Calidad del Café en México, 2004. Evaluación Nacional Externa. Universidad Autónoma Chapingo (CRUO-CENIDERCAFÉ). SAGARPA. Consejo Mexicano del Café. Huatusco, Veracruz, México. 104 pp.

Valencia, F.F. (2007). Cafés especiales. In Editorial Blanecolor Ltda (Ed.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (primera ed., p. 295).

Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), 322–329

Wintgens, J. E. (2004). *Coffee: growing, processing, sustainable production. A guide book for growers, processors, traders and researchers*. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, Germany.