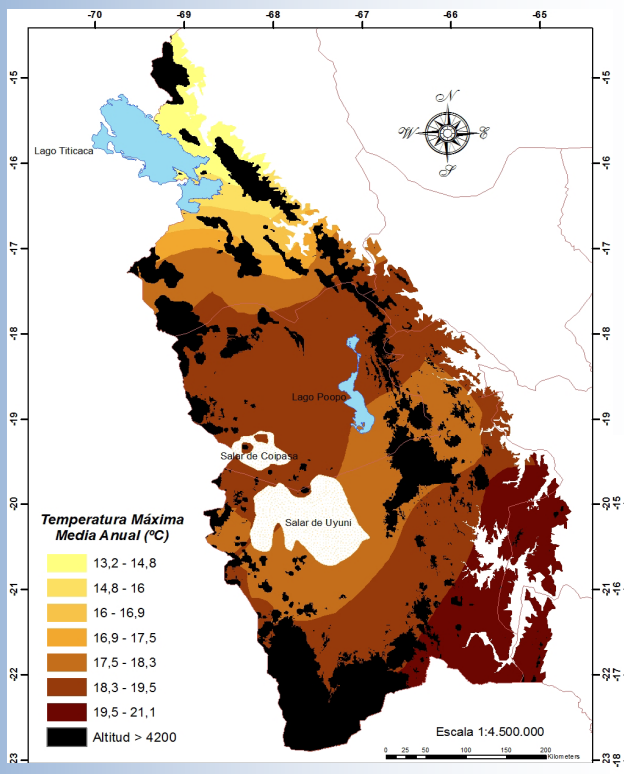
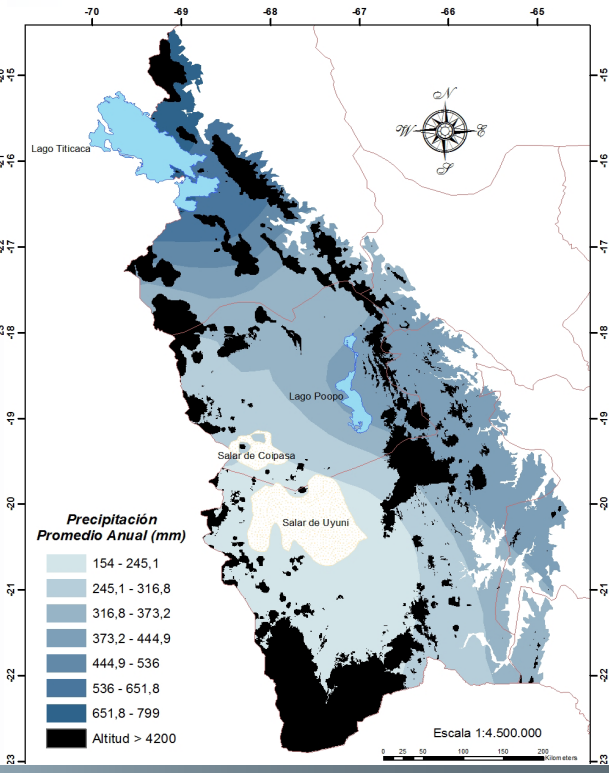
ATLAS AGROCLIMATOLÓGICO DEL ALTIPLANO BOLIVIANO





UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
LA PAZ - BOLIVIA

Belgian Development Cooperation .be
VLIR Vlaamse Interuniversitair Raad UOS University Development Cooperation
SUMAMAD
PROYECTO QUINAGUA
VLIR - KULeuven - AgroUMSA
Cooperación del Consejo Interuniversitario Flamenco - Bélgica

Título:

ATLAS DE AGROCLIMATOLOGÍA

Edición:

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Agronomía
Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Recursos Naturales
Proyecto Quinagua

Autores:

Ph. D. Magalí García Cárdenas
Ing. Edwin E. Yucra Sea
Ing. Alan Roly Callisaya Vargas
Ing. Gladis Tesoro Michel Pinaya

PRESENTACIÓN

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. EL ALTIPLANO BOLIVIANO 1

2.1. Humedad atmosférica 3

2.2. Radiación y Temperatura en el Altiplano Boliviano 3

3. CLIMATOLOGIA 7

3.1. Régimen térmico 7

3.1.1. Temperatura máxima y mínima media mensual 7

3.1.2. Amplitud térmica 16

3.1.3. Periodo libre de heladas 19

3.2. Precipitación 21

3.2.1. Precipitación promedio anual 21

3.3. Evapotranspiración 31

3.4. Déficit Hídrico 35

3.5. Índice de Aridez 38

3.6. Conclusiones 41

4. ZONIFICACION AGROCLIMATICA DE QUINOA 42

4.1. Análisis Geográfico de la Factibilidad de Aplicación de Riego Deficitario en Quinoa 46

5. CAMBIOS PROYECTADOS Y OBSERVADOS EN LA CLIMATOLOGIA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO 49

5.1. Proyecciones de Cambio Climático en El Altiplano 50

5.2. Análisis de Eventos Extremos 54

5.3. Tendencias Históricas de Cambio 57

5.4. Conclusiones 63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las estaciones incluidas en el estudio 5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia, b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud et al., 2006)..... 3

Figura 2. Evolución Mensual de la Temperatura Mínima 11

Figura 3. Evolución Mensual de la Temperatura Máxima 14

Figura 4. Evolución Mensual de la Amplitud Térmica..... 18

Figura 5. Precipitación Periodo Octubre - Diciembre 27

Figura 6. Precipitación Periodo Enero - Marzo..... 28

Figura 7. Duración del Periodo de Lluvias..... 29

Figura 8. Déficit Hídrico Anual..... 36

Figura 9. Déficit Hídrico en Verano 37

Figura 10. Índice de Aridez en Verano 40

Figura 11. Déficit de Agua para Quinua 45

Figura 12. Riego Deficitario para Quinua 48

Figura 13. (a) Ciclo Anual de temperatura (°C) para el Altiplano (67-70W,16-19S) mostrando los promedios mensuales de las estaciones de tierra (azul), de los datos de UDEL (negro), promedio multi-modelo (rojo) and 20C distribución multi-modelo (diagrama de caja). (b) Igual pero para precipitación (mm/día) (Seth et al., 2010). c) Diferencias normalizadas mensuales entre 21C-A2 y 20C para el Altiplano del ensamblaje multi-

modelo (diagrama de caja) y promedio multi-modelo (rojo). (d) Igual pero para precipitación. Promedios para SON, JFMA y anuales son también presentados con los círculos verdes representando los promedios de los modelos (Adaptado de Thibeault et al., 2009)..... 51

Figura 14. Promedio de la diferencia de la precipitación normalizada del multi-modelo para los periodos 2070-2099 menos 1970-1999 (en colores) y precipitación para el periodo 1970-1999 (curvas negras en intervalo de 1 mm/día, de 1-12) promediada sobre la longitud (65-70ºW), mostrando latitud versus mes..... 53

Figura 15. Series de tiempo observadas para 1960-2008 de Patacamaya para (a) SON y (b) EFM de precipitación (mm) mostrando las tendencias lineales (líneas rojas). También en (b) se muestran los años de presencia de anomalías de la temperatura superficial del mar por encima de 1°C (El Niño, estrellas rojas) y bajo -1°C (La Niña, estrellas azules). 53

Figura 16. Función de distribución de probabilidad de indices extremos computados para la distribución de la precipitación diaria para 1951-1979 (línea sólida) y 1980-1999 (línea punteada para a) días sin lluvia (dry days) b) precip>95% y de las temperaturas mínimas de El Alto para 1973-2007 para c) días con helada (frost days) y d) noches cálidas (warm nights) (Adaptado de Thibeault et al., 2009)..... 55

Figura 17. Índices extremos calculados del ensamblaje multi-modelo para los periodos mostrados en los gráficos para el escenario A2 para a) días sin lluvia (dry days) b) precip >95%, c) días con heladas (frost days) y d) noches cálidas (warm nights) (Adaptado de Thibeault et al., 2009a) 56

Figura 18. Variación en Invierno..... 61

Figura 19. Variación en Verano..... 62

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Estaciones usadas en el estudio 6

Mapa 2. Temperatura Mínima Media Anual 8

Mapa 3. Temperatura Máxima Media Anual..... 9

Mapa 4. Amplitud Anual de Temperatura Mínima 12

Mapa 5. Amplitud Anual de Temperatura Mínima 15

Mapa 6. Días Libres de Heladas 20

Mapa 7. Precipitación Promedio Anual 22

Mapa 8. Fracción de la Precipitación Recibida entre Enero y Marzo 23

Mapa 9. Precipitación en Año Seco (75% de Probabilidad) 24

Mapa 10. Precipitación en Año Húmedo (25% de Probabilidad)..... 25

Mapa 11. Días con Precipitación..... 30

Mapa 12. Evapotranspiración de Referencia Promedio Anual 32

Mapa 13. Evapotranspiración de Referencia en Invierno..... 33

Mapa 14. Evapotranspiración de Referencia en Verano 34

Mapa 15. Índice de Aridez Anual..... 39

Mapa 16. Requerimientos de Agua de Quinua..... 44

Mapa 17. Factibilidad de Agroclimática de Aplicación de Riego Deficitario 46

Mapa 18. Variación Histórica de Temperatura Mínima 59

Mapa 19. Variación Histórica de Temperatura Mínima 60

1. INTRODUCCIÓN

Se define como clima al conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región. Este estado medio del tiempo se deduce a partir de los datos correspondientes a los estados del tiempo en ese lugar durante un prolongado período, generalmente no menor a 20 años. Los factores meteorológicos que tienen principal influencia en las características de los tipos de clima son la temperatura y las precipitaciones aunque los otros factores como la humedad atmosférica, el viento, presión atmosférica, etc. también influyen sobre las actividades y la vida de cualquier zona. El clima tiene fundamental importancia sobre la Tierra, especialmente sobre la vida que existe en ella ya que Modela el relieve e incide en la distribución de las aguas continentales; Determina la distribución de vegetales y animales (biomasa) y condiciona las actividades económicas y la distribución del hombre.

2. EL ALTIPLANO BOLIVIANO

El Altiplano boliviano se produce fisiográficamente como consecuencia de la formación de la Cordillera de Los Andes. Los Andes se constituyen en una formidable barrera para la circulación troposférica actuando como obstáculo para la circulación entre las áreas amazónicas de baja altitud al este y las características zonas anticiclónicas del Pacífico. En la parte central de esta cordillera, se extiende la planicie que da lugar al Altiplano que gracias a su altitud, y cercanía con el ecuador presenta una serie de combinaciones climáticas únicas en el mundo. Esta climatología tiene un fuerte impacto sobre la disponibilidad de recursos hídricos en las tierras bajas tanto al este como al oeste y podría estar ligada con la climatología a nivel continental y quizás hasta hemisférica (Garreaud et al, 2003, Zhou and Lau, 1998).

El Altiplano es una de las zonas con mayores limitaciones climáticas en la región andina boliviana. Físicamente, consiste en una meseta alta que abarca desde el Lago Titicaca y se extiende aproximadamente 800 kilómetros de norte a sur y 200 kilómetros de ancho. Se extiende entre los 15° LS y 21° LS, aproximadamente, con una elevación media cercana a los 3700 m sobre el nivel del mar. La región, muestra una orientación general NW-SE y se encuentra flanqueada por dos cadenas de montañas, que la separan, hacia el Oeste, del desierto costero en el Sur de Perú y Norte de Chile y hacia el Este, de la región amazónica. El sector relativamente más húmedo en el Norte del Altiplano está dominado por la presencia del lago Titicaca (8300 km2), e influenciado por el desplazamiento estival de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), mientras que en la parte sur, los grandes salares de Uyuni y Coipasa provocan, por una parte, una menor pluviosidad, y por otra, constituyen un testimonio de una condición comparativamente más húmeda en el pasado remoto (Hastenrath y Kutzbach 1985).

El análisis general del régimen climático en el Altiplano muestra que el clima de la zona se determina principalmente por:

- La posición geo-astronómica entre los 15 y 21º LS, la cual determina las condiciones climáticas de trópico, con moderada estacionalidad media térmica y radiativa.
- La topografía y la elevada altitud (por encima de 3 600 m.s.n.m.), la cual determina las bajas temperaturas, aún durante la estación de verano. Sin embargo la presencia del extenso lago Titicaca en el interior de esta meseta, constituye una importante fuente de humedad y un elemento moderador del clima a sus alrededores.

Con respecto a la ocurrencia de lluvia, la circulación atmosférica zonal, determina en gran parte la distribución temporal y espacial de la misma. El continente Sudamericano y dentro de él, el Altiplano, se encuentra bajo la influencia de tres sistemas semi-permanentes de presión alta y uno de presión baja. Los sistemas de presión alta son los anticiclones del Atlántico, del Pacífico Sur y del Caribe, los cuales casi rodean el continente. El sistema de baja presión corresponde a la ZCIT, la cual se encuentra en movimiento entre los 15º Norte y 15º Sur siguiendo el movimiento aparente del sol. Las diferencias de presión entre los sistemas anticiclónicos y la ZCIT, generan flujos de aire, los cuales se mueven hacia la izquierda por la rotación de la Tierra, y dan origen a los vientos alisios del Sur Este. Durante el invierno austral (mayo a septiembre), la ZCIT, se mueve hacia el norte y los anticiclones penetran más hacia el continente, adicionalmente debilitando la influencia de los vientos alisios de componente este (Figura No. 1), dando lugar a la época seca en la mayor parte de Bolivia y Perú. En el caso del Altiplano Boliviano, es el Anticiclón del Pacífico con sus vientos secos de componente oeste, el que previene a la zona de recibir precipitación (Garreaud, 2003). Al finalizar el invierno, gracias a la gran recepción de radiación solar, la ZCIT avanza hacia el centro del continente tomando a lo largo aire húmedo y caliente y debilitando la presencia del Anticiclón del Pacífico. Durante el verano (octubre a marzo), el fuerte calor terrestre genera una depresión térmica que favorece el descenso de la ZCIT hasta los 15º a lo largo del meridiano 60º y un desplazamiento del cinturón ecuatorial de los vientos alisios. Los movimientos convectivos combinados con la humedad producida por la evaporación del agua del Lago Titicaca y la humedad continental traída por los vientos alisios dan lugar a la formación de una gran acumulación de cumulonimbus y el inicio de la época lluviosa (Garreaud, 2003) aunque gran parte de esa precipitación se concentra entre Diciembre y Febrero determinando una ocurrencia de lluvias típicamente monomodal.

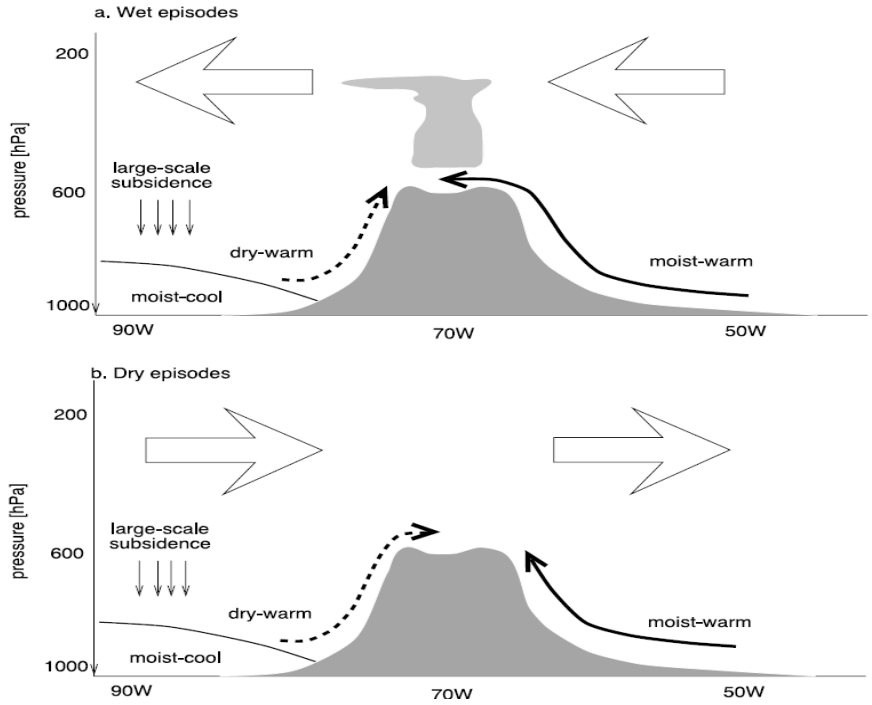


Figura 1. Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia, b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud et al., 2006)

2.1. Humedad atmosférica

Debido a la altitud de la superficie, la columna troposférica sobre el Altiplano tiene en general un bajo contenido de vapor de agua en gran parte debido a las bajas temperaturas del aire que hacen que limitan su capacidad de contener vapor de agua. La humedad atmosférica es todavía más reducida durante el invierno austral cuando predomina sobre el Altiplano la circulación del oeste (Figura No. 1). Durante el verano la humedad aumenta gracias a los movimientos advectivos de masas de aire húmedo desde la cuenca amazónica y localmente gracias a la evaporación del Lago Titicaca.

2.2. Radiación y Temperatura en el Altiplano Boliviano

La evolución anual de la radiación solar disponible y la variación térmica en la superficie altiplánica está condicionada por factores geográficos y meteorológicos. Entre los primeros destacan la localización de esta región en la franja tropical y su considerable elevación, y entre los segundos, el régimen de nubosidad de la zona. La localización del Altiplano en latitudes relativamente bajas implica una amplitud moderada del ciclo anual de radiación solar disponible durante días despejados. La radiación solar diaria en el límite externo de la atmósfera en diciembre es aproximadamente 70% superior al valor que ocurre en junio. Sin embargo, dado que la precipitación ocurre en el verano, la elevada nubosidad durante estos meses reduce la disponibilidad energética por lo que la máxima disponibilidad se alcanza durante el periodo de transición primavera-verano o verano-otoño.

Cumpliendo los principios del gradiente térmico negativo prevalente en la tropósfera, las temperaturas en el Altiplano son bajas comparadas con puntos ubicados en la misma latitud pero a altitudes menores. El menor espesor de la columna atmosférica con disminuida cantidad de moléculas gaseosas sobre la región altiplánica disminuye la radiación neta disponible en la superficie. Colabora a este fenómeno la baja cantidad de vapor de agua existente en el aire. Esta situación favorece una mayor pérdida radiativa nocturna desde la superficie y por lo tanto, un rápido enfriamiento del aire luego de la puesta de sol, particularmente durante el invierno cuando la atmósfera es comparativamente más seca y con menor nubosidad. El aumento de la humedad atmosférica y de la nubosidad durante el verano, contribuyen a un enfriamiento nocturno más moderado durante esta época del año. Esta situación tiene una relación directa con la fluctuación anual de la temperatura mínima diaria de la zona que es mucho menor en invierno que en verano.

La evolución anual de la temperatura máxima diaria está fuertemente condicionada por las variaciones estacionales de la radiación solar disponible a nivel de superficie. Por ello la temperatura máxima presenta una amplitud relativamente pequeña con sus valores máximos inmediatamente antes del inicio de la temporada de lluvias.

La amplitud comparativamente mayor del ciclo anual de la temperatura mínima, condicionada principalmente por el fuerte enfriamiento radiativo nocturno durante el invierno, da cuenta de una variación estacional en la amplitud del ciclo térmico diario, observándose el mayor contraste entre las condiciones diurna y nocturna en invierno.

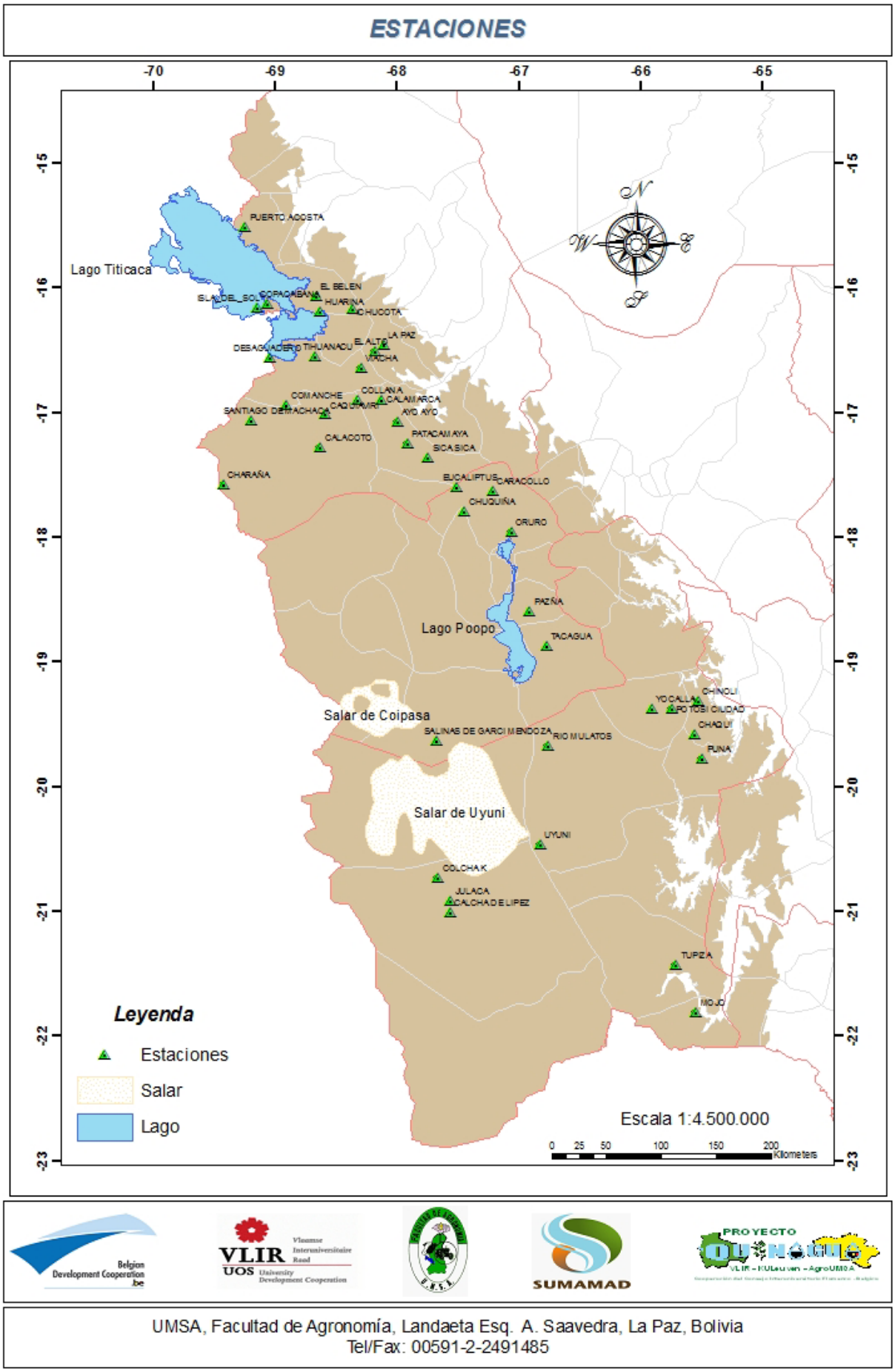
Aunque las condiciones climáticas no son favorables para la producción de cultivos, gran parte de la población económicamente activa se encuentra dedicada en forma directa e indirecta a la agricultura la cual se desarrolla mayormente a secano. Esta actividad se encuentra permanentemente limitada por la sequía y las bajas temperaturas combinadas con la baja fertilidad del suelo y el reducido acceso a otros insumos externos y son extremadamente dependientes de las características climáticas de la zona. Por esta razón en el presente trabajo, se analizan y presentan las fluctuaciones de la temperatura ambiente, el régimen de lluvias y el riesgo para la agricultura a secano en el Altiplano Boliviano. Con el fin de evaluar la aptitud climática de la zona para las actividades agrícolas, se presenta el resultado de la zonificación del altiplano para la producción de quinua adicionando el análisis de la factibilidad de aplicación de riego deficitario gracias al trabajo de Geerts et al. (2006).

La mayor parte del trabajo fue realizado a través del análisis histórico de 40 estaciones distribuidas a lo largo del Altiplano Boliviano, con algunas variaciones en casos de deficiencias en la calidad de los datos o de datos faltantes. Las estaciones seleccionadas disponían de por lo menos 20 años de información y recibieron un tratamiento estadístico de consistencia y control de calidad. Con el fin de reducir el impacto de cambio climático en los registros, el análisis climático se restringió hasta el año 1995, siendo que para el análisis de cambio climático se incluyeron los registros hasta el año que se encontraban disponibles.

Las estaciones consideradas para el presente análisis son las presentadas en la Tabla 1, y reflejadas en el Mapa No. 1:

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las estaciones incluidas en el estudio

Estación	Latitud (dec. deg.)	Longitud (dec. deg.)	Altitud (m.s.n.m.)	País	Provincia
Departamento de La Paz					
Charaña	-17,583	-69,433	4054	Bolivia	Pacajes
La Paz	-16,467	-68,117	3632	Bolivia	Murillo
Ayo Ayo	-17,083	-68,000	3856	Bolivia	Aroma
Calacoto	-17,283	-68,633	3805	Bolivia	Pacajes
Calamarca	-16,900	-68,133	3954	Bolivia	Aroma
Caquiaviri	-17,017	-68,600	3800	Bolivia	Pacajes
Collana	-16,900	-68,333	3940	Bolivia	Aroma
Comanche	-16,950	-68,917	4055	Bolivia	Pacajes
Copacabana	-16,133	-69,067	3843	Bolivia	Manco Kapac
Desaguadero	-16,567	-69,050	3803	Bolivia	Ingavi
El Alto	-16,517	-68,183	4038	Bolivia	Murillo
Belen	-16,067	-68,667	3820	Bolivia	Omasuyos
Huarina	-16,200	-68,633	3825	Bolivia	Omasuyos
Ichucota	-16,170	-68,370	4460	Bolivia	Los Andes
Isla del Sol	-16,167	-69,150	4027	Bolivia	Manco Kapac
Patacamaya	-17,250	-67,917	3789	Bolivia	Aroma
Puerto Acosta	-15,517	-69,250	3835	Bolivia	Camacho
Santiago de Machaca	-17,067	-69,200	3980	Bolivia	J. M. Pando
Sica Sica	-17,367	-67,750	3820	Bolivia	Aroma
Tihuanacu	-16,550	-68,683	3629	Bolivia	Ingavi
Viacha	-16,650	-68,300	3850	Bolivia	Ingavi
Departamento de Oruro					
Caracollo	-17,633	-67,217	3770	Bolivia	Cercado
Chuquiña	-17,800	-67,450	3775	Bolivia	Saucari
Eucaliptus	-17,600	-67,517	3728	Bolivia	Cercado
Oruro	-17,967	-67,067	3702	Bolivia	Cercado
Pazña	-18,600	-66,917	3710	Bolivia	Poopo
Salinas de Garci Mendoza	-19,633	-67,683	3860	Bolivia	L. Cabrera
Tacagua	-18,880	-66,780	3720	Bolivia	Abaroa
Departamento de Potosí					
Calcha de Lipez	-21,017	-67,567	3670	Bolivia	Nor Lipez
Chaqui	-19,583	-65,567	3550	Bolivia	L. Cabrera
Colcha K	-20,733	-67,667	3700	Bolivia	Nor Lipez
Chinoli	-19,317	-65,533	3450	Bolivia	Saavedra
Julaca	-20,920	-67,570	3665	Bolivia	Sud Lipez
Mojo	-21,817	-65,550	3400	Bolivia	Modesto Omiste
Potosí	-19,383	-65,750	4060	Bolivia	T. Frías
Puna	-19,783	-65,500	3420	Bolivia	Linares
Rio Mulatos	-19,683	-66,767	3815	Bolivia	Quijarro
Tupiza	-21,433	-65,717	2950	Bolivia	Sud Chichas
Uyuni	-20,467	-66,833	3669	Bolivia	Quijarro
Yocalla	-19,383	-65,917	3400	Bolivia	T. Frías



Mapa 1. Ubicación Espacial de las Estaciones Consideradas

3. CLIMATOLOGIA

3.1. Régimen térmico

3.1.1. Temperatura máxima y mínima media mensual

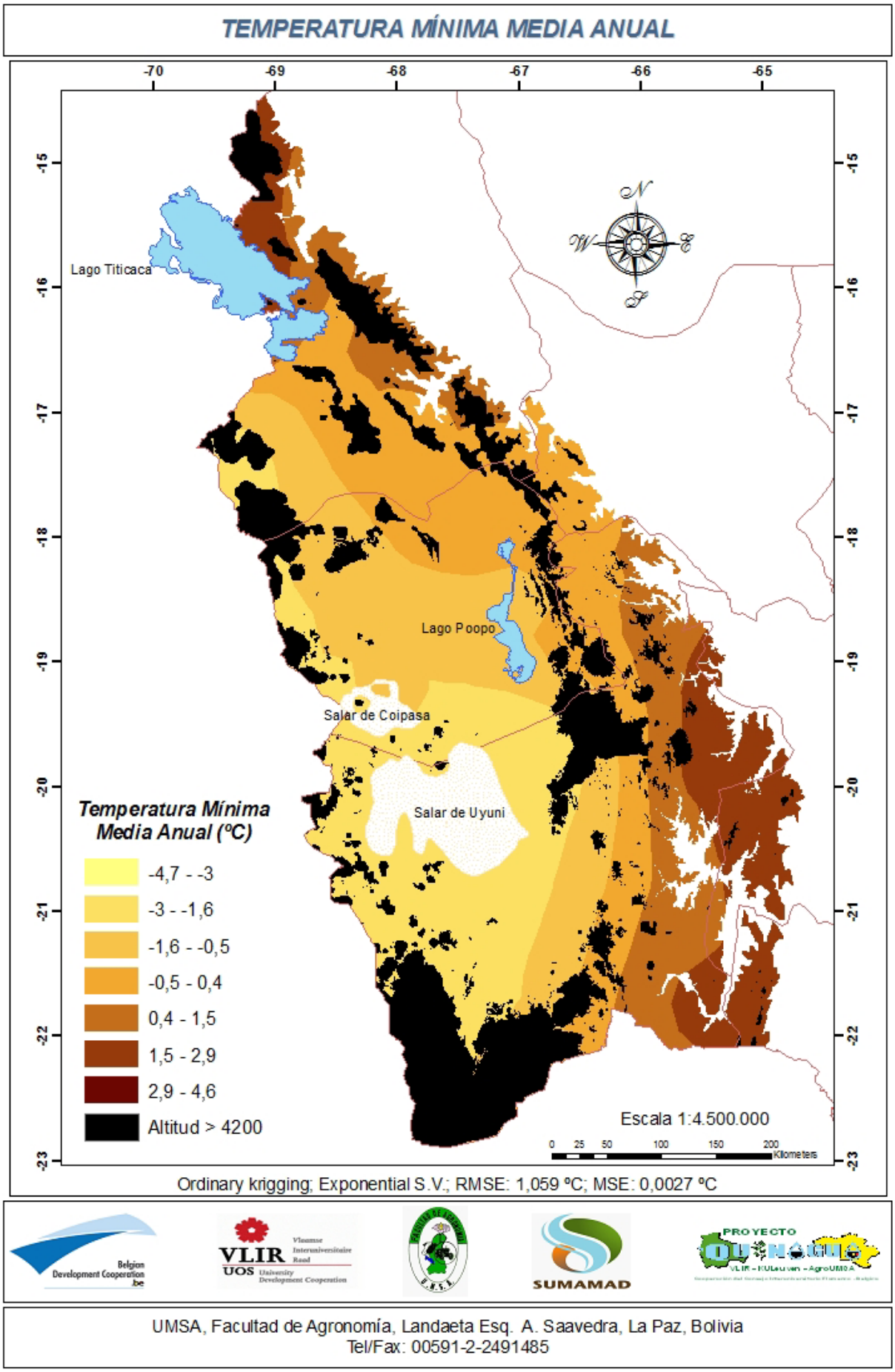
El Mapa No. 2 presenta la distribución de la temperatura mínima media anual a lo largo del Altiplano Boliviano. La diferenciación de los valores es clara de Norte a Sud y de Este a Oeste, presentándose gradientes en esas direcciones con variaciones de hasta 7°C entre puntos extremos de Norte a Sud, mientras que la variación es levemente menor de Este a Oeste. La temperatura máxima media anual (Mapa No. 3) no presenta la misma magnitud de variabilidad, apreciándose una distribución inversa con valores mayores al Sud y Oeste y cierta modulación térmica en la zona intersalar.

El altiplano, por su latitud, se ubica en una zona tropical, por lo que su variación térmica a lo largo del año debería ser reducida gracias a la homogeneidad de la recepción de radiación solar a lo largo del año; sin embargo, la altitud a la que se encuentra distorsiona esta distribución por la poca densidad del aire y la baja humedad atmosférica. Estos factores hacen que la atmósfera no retenga la gran cantidad de energía solar recibida durante el día a lo largo del año con fuertes variaciones estacionales que no son bien representadas por los valores promedio anuales. Lo anterior se expresa en la evolución mensual de los valores de Temperatura mínimas y máximas mensuales promedios presentados en la series de mapas de las Figuras No. 2 y 3.

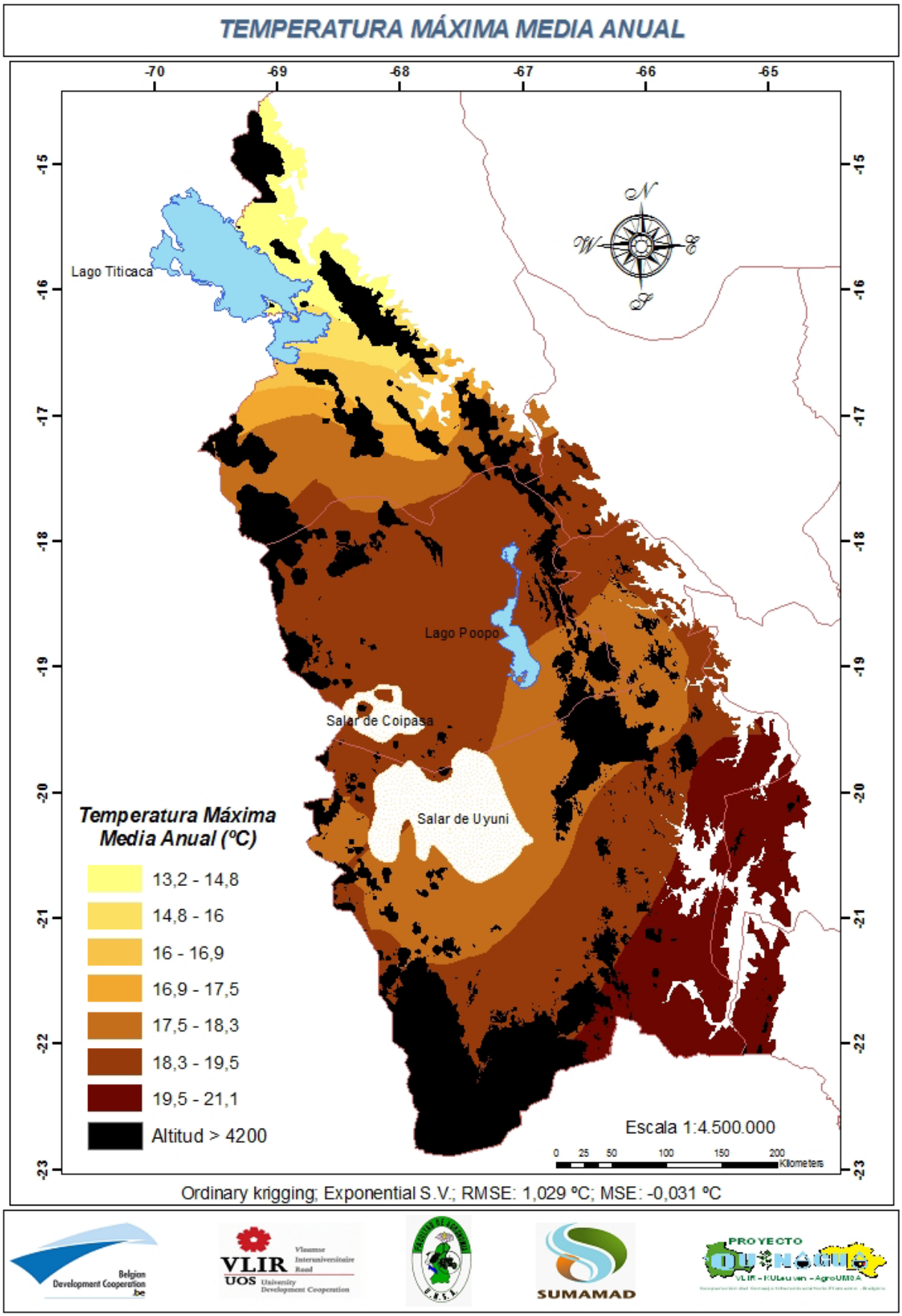
La variabilidad térmica entre las temperaturas mínimas de los meses invernales y los estivales es muy fuerte especialmente en el Altiplano central y sud (Figura No. 2). Un resumen de esta variabilidad se presenta en el Mapa No.4, que presenta la diferencia entre el mes más caliente y el es más frío (Enero y Julio) para la temperatura mínima media mensual. Aquí se aprecia nuevamente la fuerte influencia latitudinal con poca variación invierno-verano en el Norte y Este y con valores muy elevados hacia el Sud y Oeste.

En el caso de las Temperaturas Máximas, no se observa los mismos rangos de diferencia mensual (Figura No. 3) y si bien la diferencia entre el mes más caliente y el es más frío (Enero y Julio) de las temperaturas máximas medias mensuales (Mapa No. 5) es también mayor en el Sud que en el Norte, las diferencias son menores que en el caso de la temperatura mínima para todos los puntos.

La razón para la fuerte variación de las Temperaturas mínimas entre invierno y verano se encuentra nuevamente en la baja humedad atmosférica y la poca densidad del aire que presentan valores aún más extremos en invierno, reteniendo aún menos la radiación terrestre nocturna. El efecto mencionado es más pronunciado cuanto más al Sud se encuentre el punto, demostrando una vez más que la aridez del Altiplano Boliviano se incrementa hacia el Sud, por la combinación de la influencia del Lago Titicaca al Norte versus la presencia del Salar de Uyuni, la menor influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y la mayor influencia del Anticiclón del Pacífico al Sud.

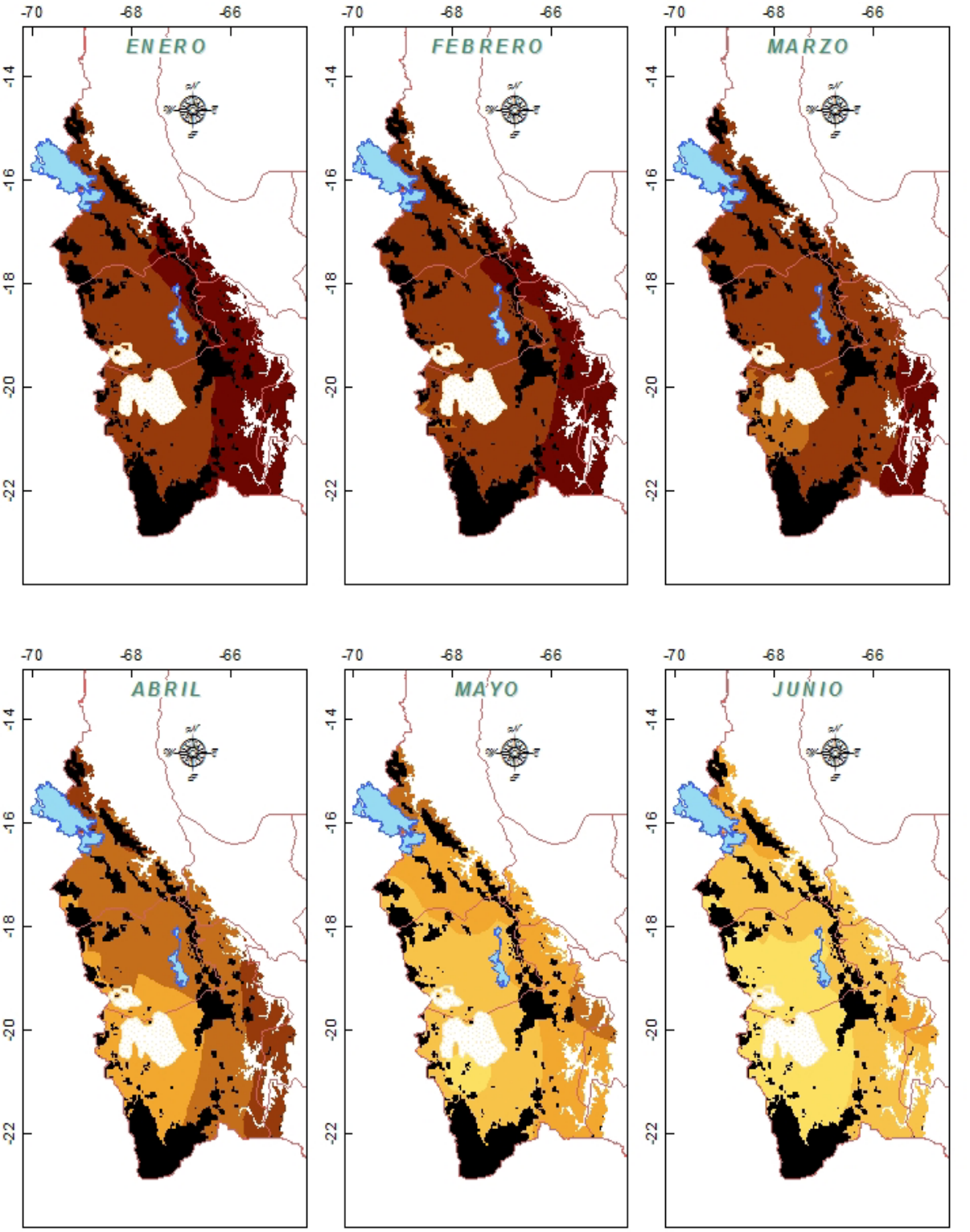


Mapa 2. Temperatura Mínima Media Anual



Mapa 3. Temperatura Máxima Media Anual

TEMPERATURA MÍNIMA MENSUAL



Temperatura Mínima Mensual (ºC)

-12,5 - -9,6 | -9,6 - -6,7 | -6,7 - -3,8 | -3,8 - -0,9 | -0,9 - 2 | 2 - 4,9 | 4,9 - 7,8 | Altitud > 4200

Escala 1:12.000.000

0 125 250 500 750 1.000 Kilometers

UMSA, Facultad de Agronomía, Landaeta Esq. A. Saavedra, La Paz, Bolivia
Tel/Fax: 00591-2-2491485

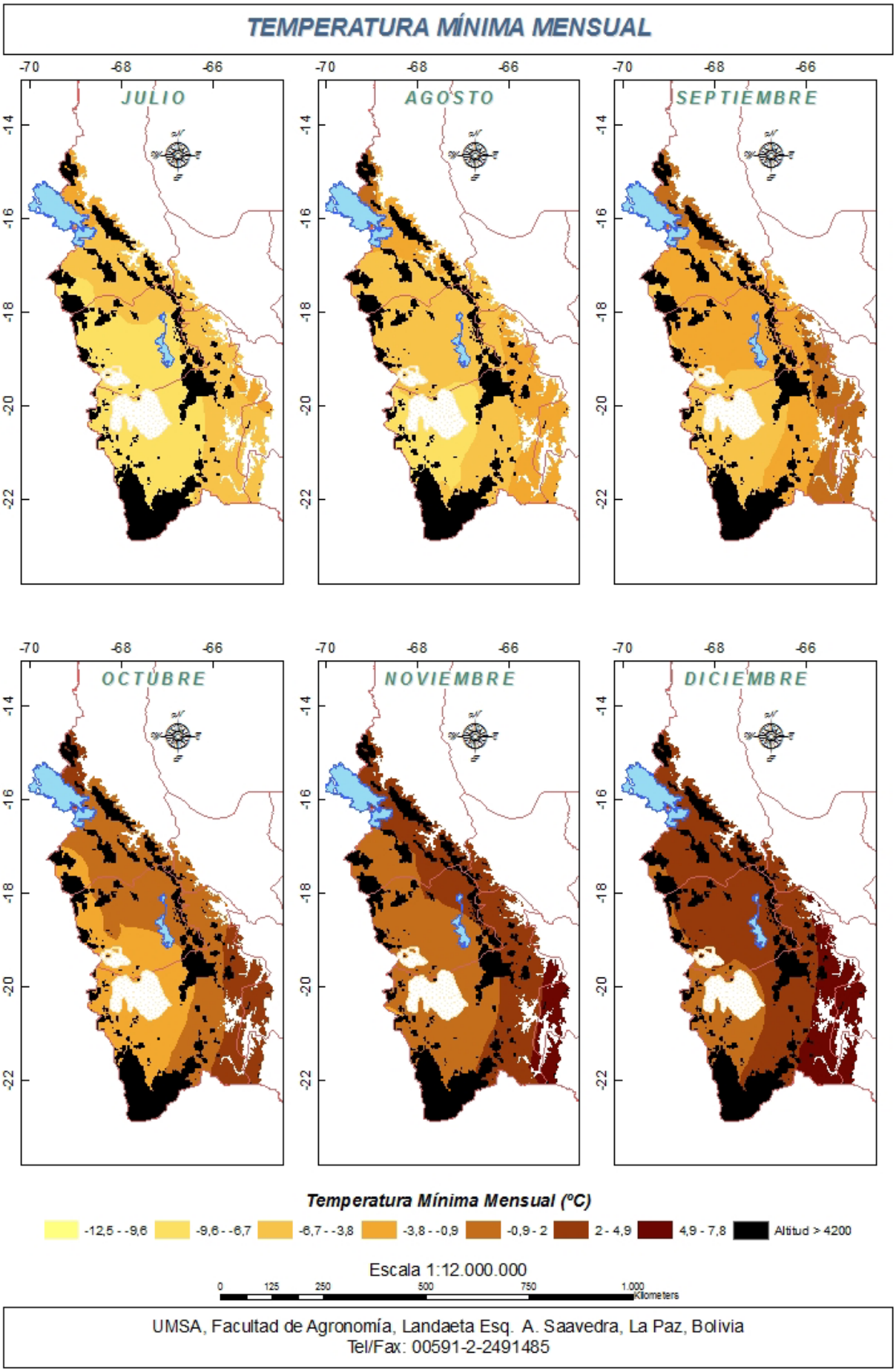
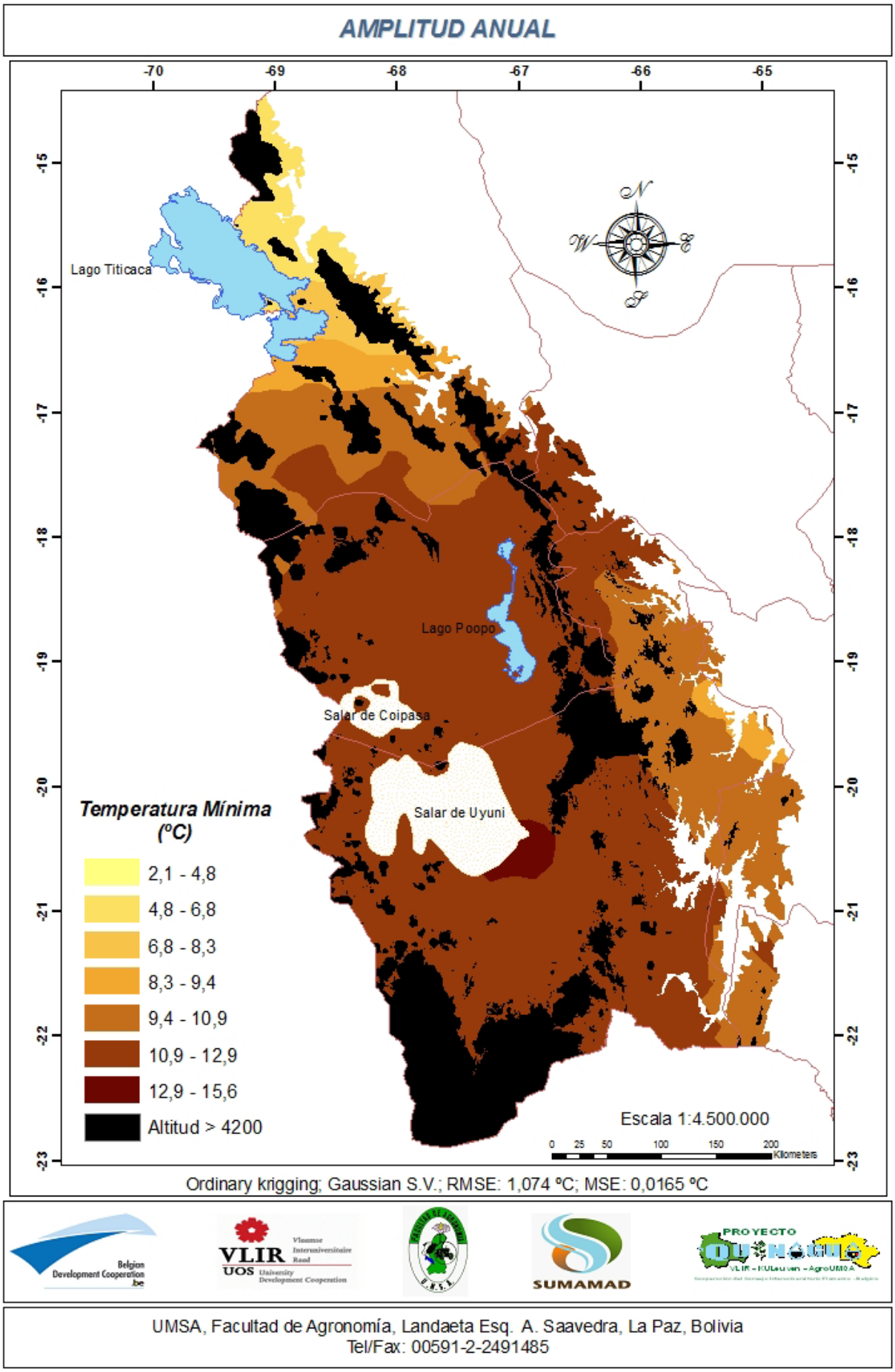
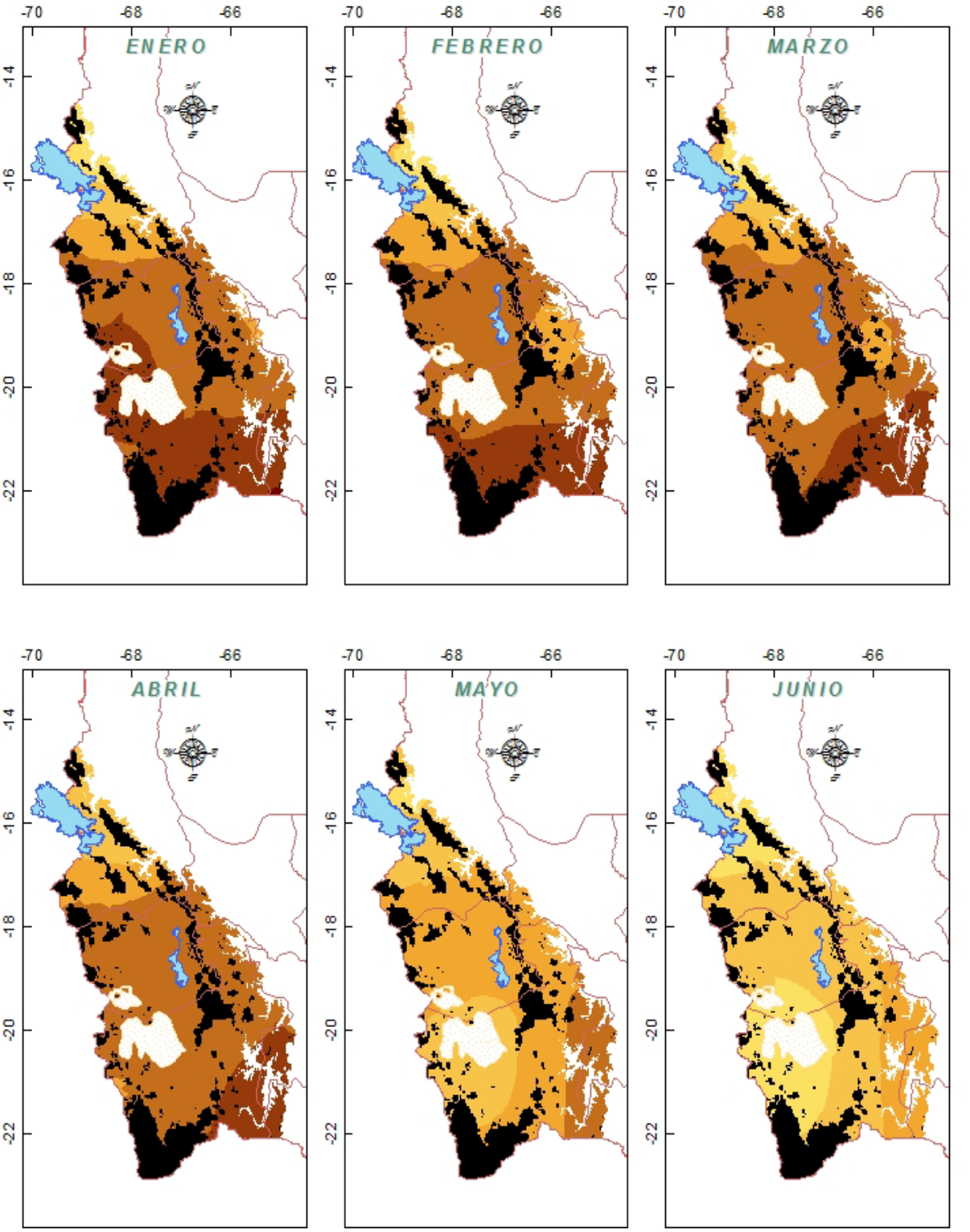


Figura 2. Evolución Mensual de la Temperatura Mínima



Mapa 4. Amplitud Anual de Temperatura Mínima

TEMPERATURA MÁXIMA MENSUAL



Temperatura Máxima Mensual (ºC)

11,2 - 13 | 13 - 14,8 | 14,8 - 16,6 | 16,6 - 18,4 | 18,4 - 20,2 | 20,2 - 22 | 22 - 23,8 | Altitud > 4200

Escala 1:12.000.000

0 125 250 500 750 1.000 Kilometers

UMSA, Facultad de Agronomía, Landaeta Esq. A. Saavedra, La Paz, Bolivia
Tel/Fax: 00591-2-2491485

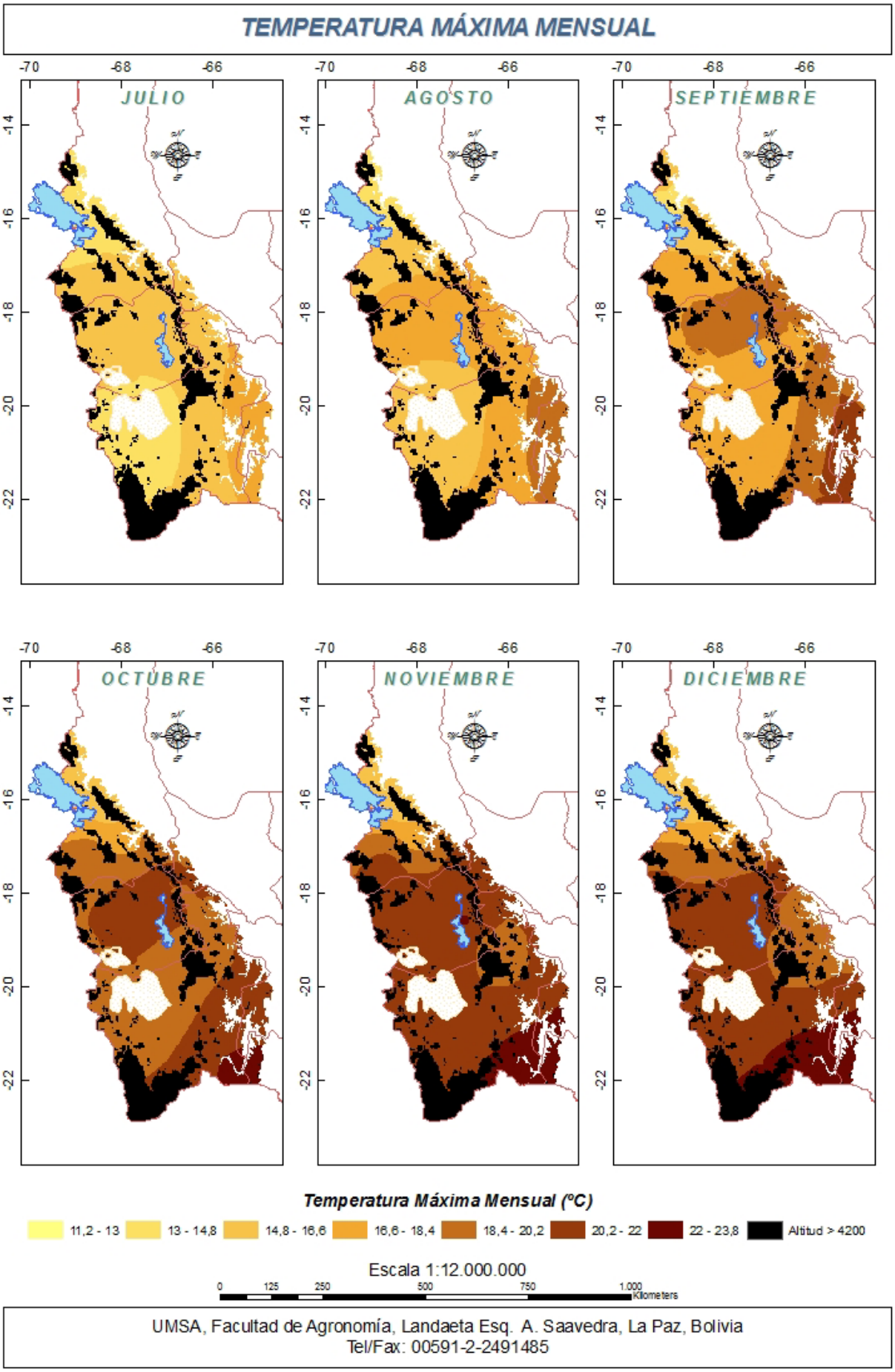
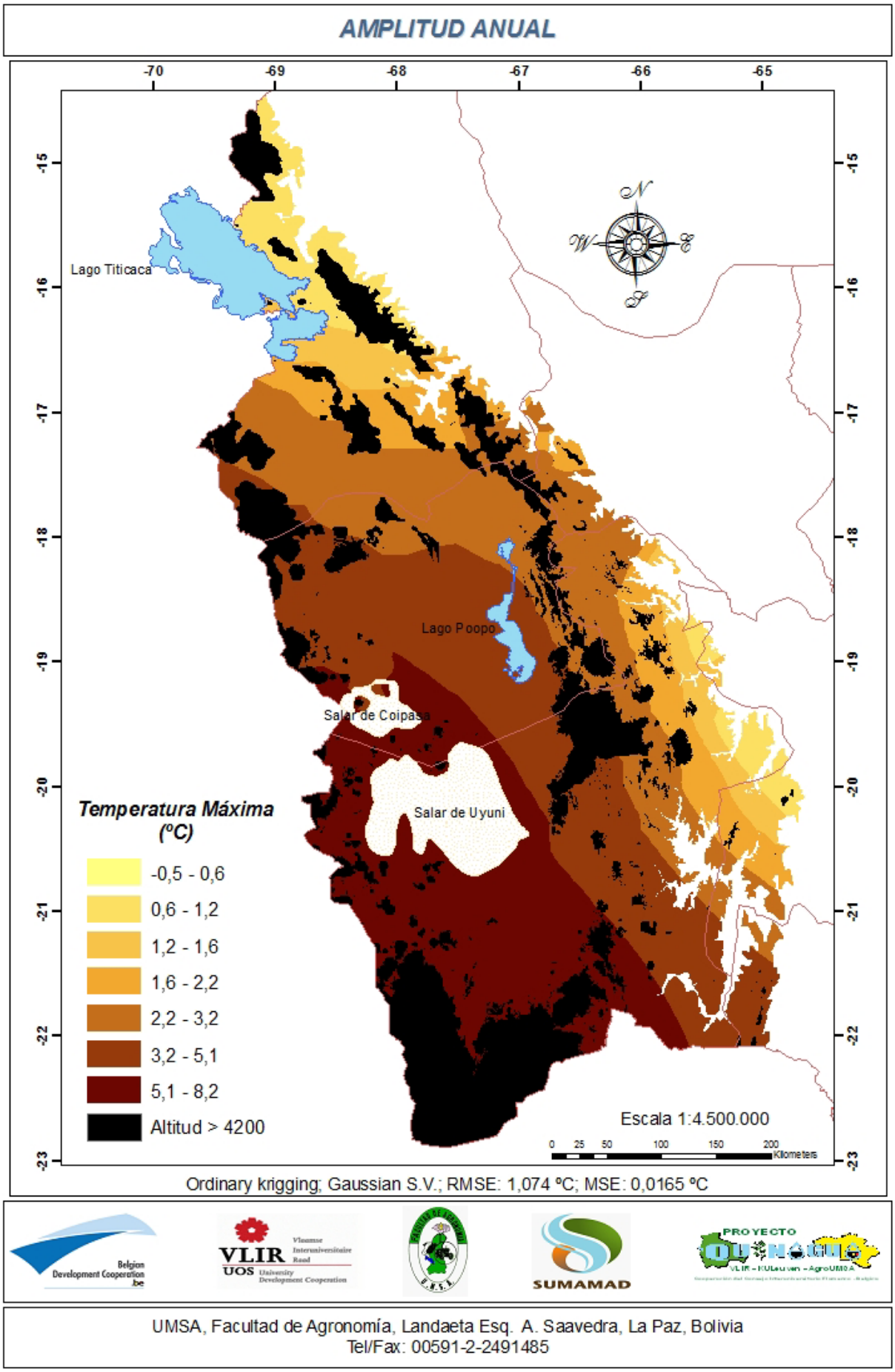


Figura 3. Evolución Mensual de la Temperatura Máxima



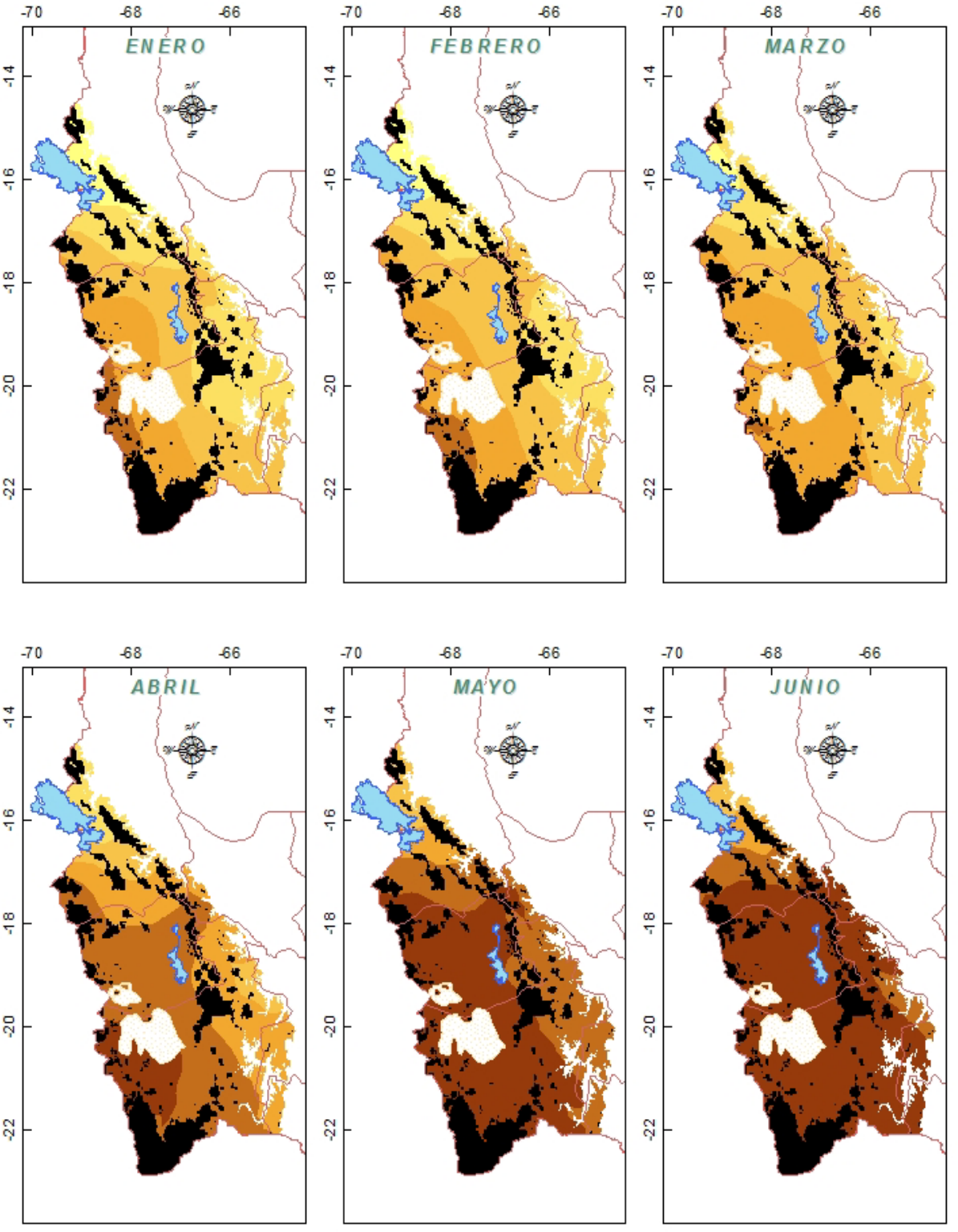
Mapa 5. Amplitud Anual de Temperatura Mínima

3.1.2. Amplitud térmica

La amplitud térmica media mensual, que expresa la diferencia entre la Temperatura Máxima y Mínima diaria, confirma lo expuesto en los párrafos anteriores, pues presenta valores extremos en el Sud y en invierno demostrando una vez más la aridez incrementada hacia el Sud y el Oeste del Altiplano (Figura No 4).

Desde un punto de vista térmico, las descripciones presentadas determinan la actividad agrícola en el Altiplano. Aunque por su latitud, la zona goza de la recepción de gran cantidad de radiación solar durante todo el año (Vacher 199xx), las condiciones típicamente locales de baja humedad atmosférica y aire con poca densidad, determinan que la agricultura se concentre entre los meses de octubre a abril pues el riesgo de heladas en los restantes meses es muy alto. Este efecto es menor en el Norte del Altiplano pero no se encuentra exento de él, por lo que, aunque su ciclo agrícola es más largo, difícilmente puede llevarse adelante durante todo el año, limitado por las temperaturas. Por otra parte, dado que el estrés fisiológico al cual deben ser expuestos los cultivos para adaptarse a las variaciones de temperatura en un solo día (de 10 a 20º C) es muy alto, el rango de opciones de cultivos que pueden ser cultivados en esta área durante el período libre de heladas es reducido.

AMPLITUD TÉRMICA MENSUAL



Amplitud Térmica Mensual (ºC)

9,2 - 11,5 | 11,5 - 13,8 | 13,8 - 16,1 | 16,1 - 18,4 | 18,4 - 20,7 | 20,7 - 23 | 23 - 25,3 | Altitud > 4200

Escala 1:12.000.000

0 125 250 500 750 1.000 Kilometers

UMSA, Facultad de Agronomía, Landaeta Esq. A. Saavedra, La Paz, Bolivia
Tel/Fax: 00591-2-2491485

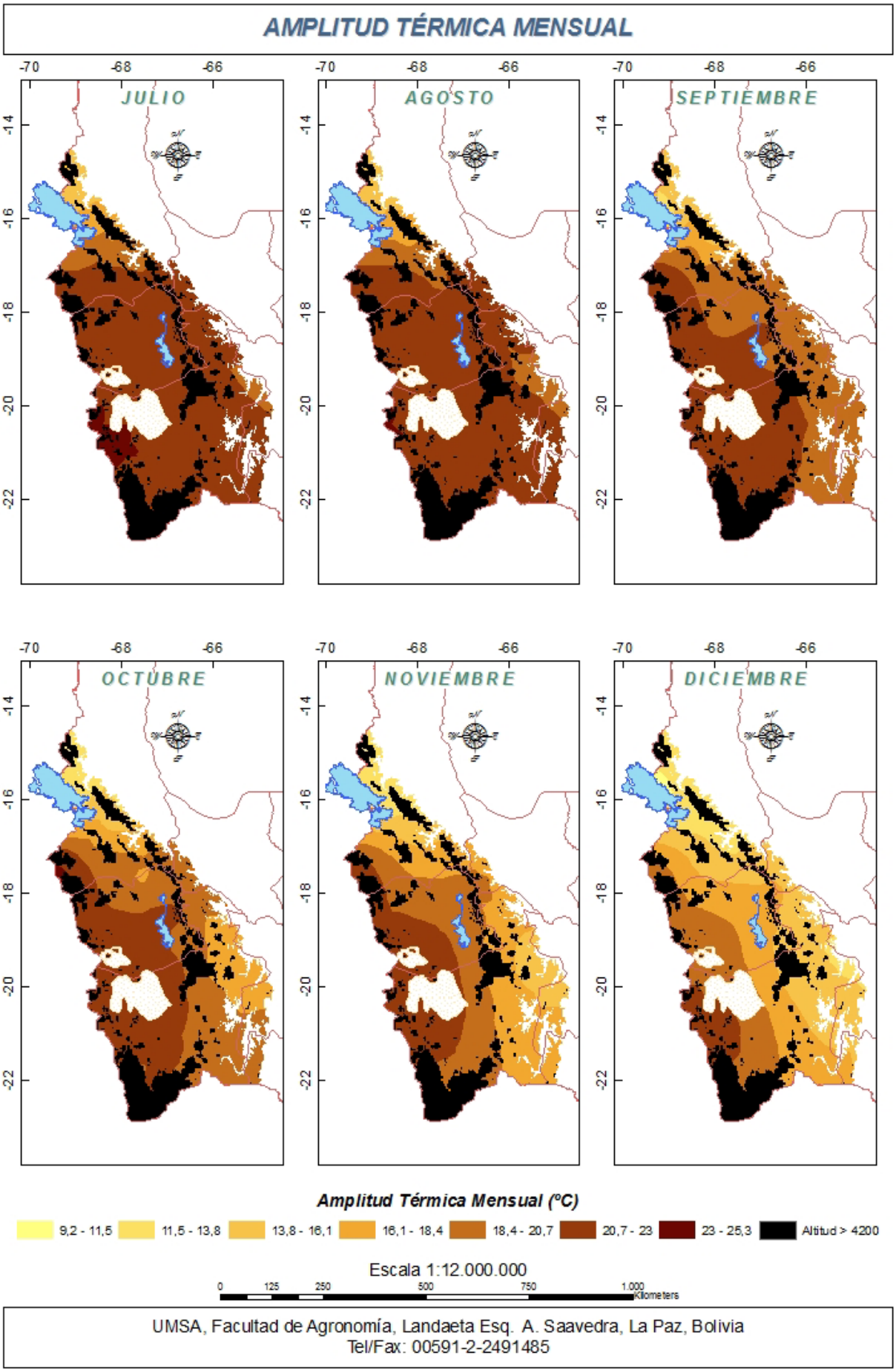
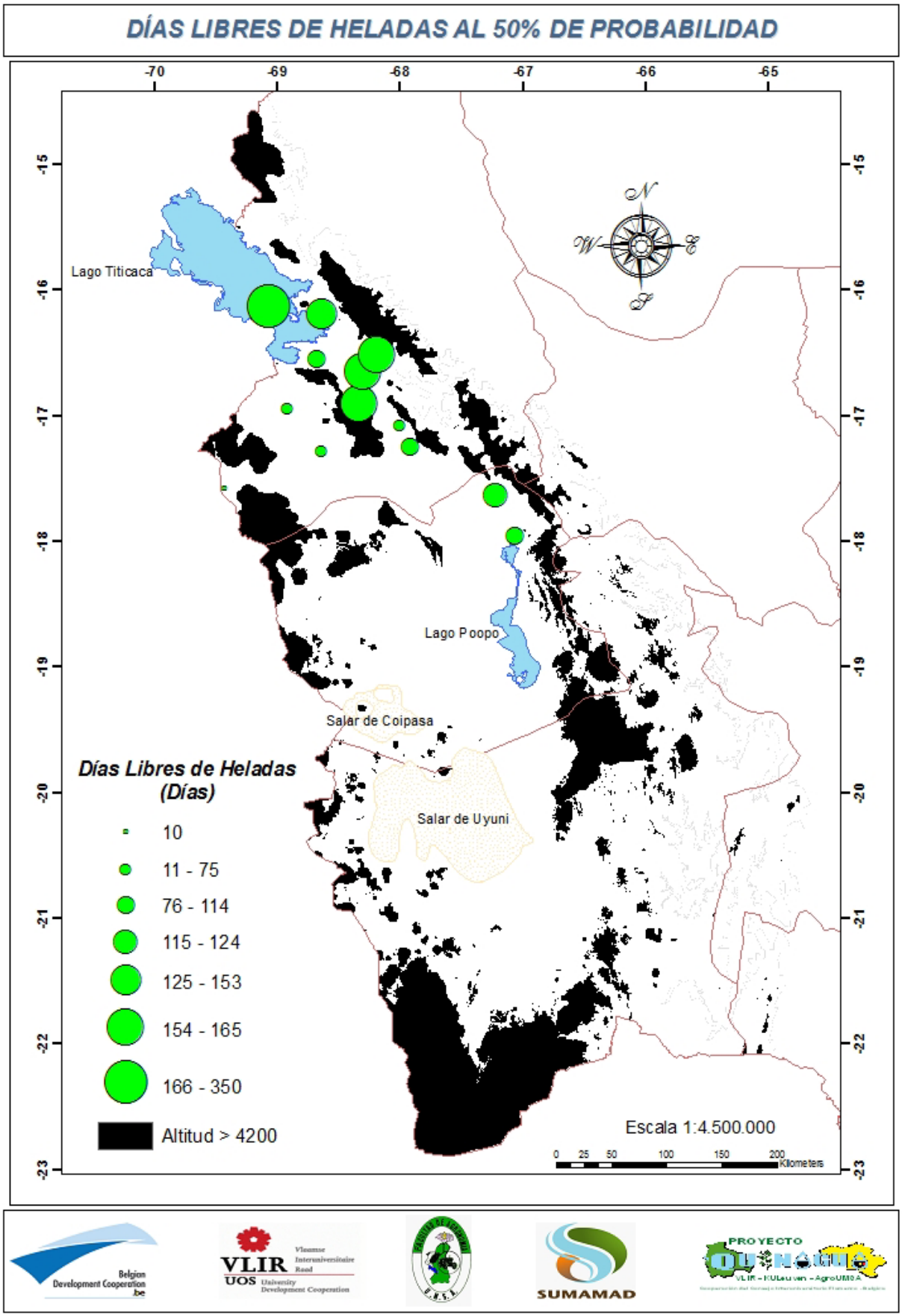


Figura 4. Evolución Mensual de la Amplitud Térmica

3.1.3. Periodo libre de heladas

El análisis de la época libre de heladas es muy complejo debido a la necesidad de contar con datos diarios de temperaturas mínimas en las estaciones, y por la elevada heterogeneidad en el riesgo de heladas determinada por la topografía local de las zonas (exposición, inclinación, pendiente, etc.). Por esta razón, para esta publicación solamente se han expresado geográficamente los valores reportados por Le Tacón (1992) en forma puntual e indicativa (Mapa No. 6) para el periodo libre de heladas con un 50 % de probabilidad. Se aprecia que el riesgo de heladas se incrementa fuertemente hacia el sud y el oeste, siguiendo los patrones reportados previamente. La cantidad de días libres de heladas en el Altiplano Central es inferior al ciclo vegetativo de un cultivo promedio, mostrándose su fuerte vulnerabilidad a heladas tempranas y tardías y la general dificultad para hacer agricultura en esta zona.



Mapa 6. Días Libres de Heladas

3.2. Precipitación

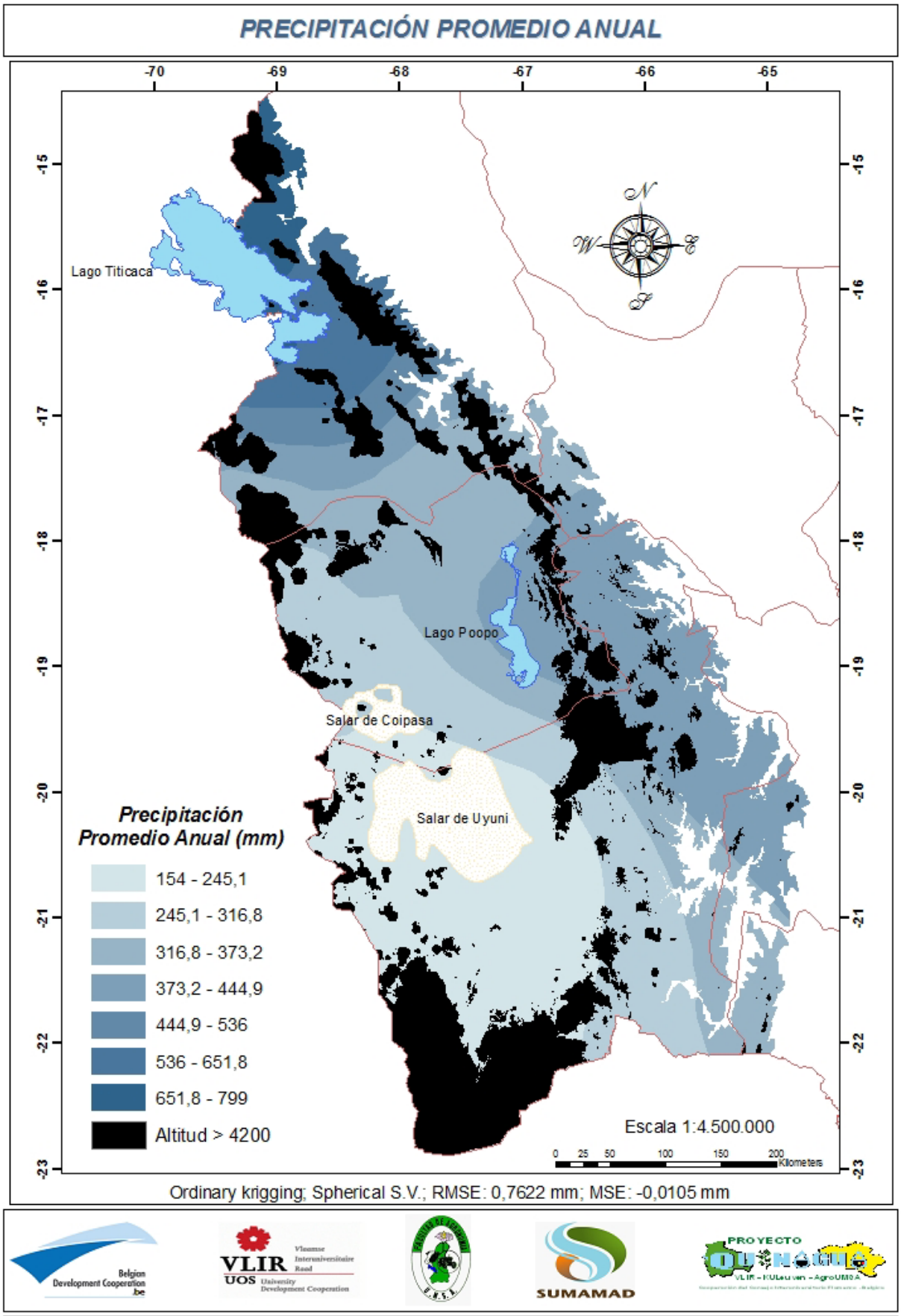
3.2.1. Precipitación promedio anual

Tal como lo describen Garreaud et al. (2003) la precipitación en el Altiplano se produce en gran medida por asensos vigorosos de aire húmedo que se producen por el calentamiento directo de la superficie terrestre gracias a la gran cantidad de radiación solar recibida y la compleja topografía que determina su absorción. Sin embargo, también se requiere de un mecanismo de desestabilización, y de suficiente vapor de agua para que se produzca la precipitación. La descripción propuesta por Garreaud et al., (2003) explica que la precipitación en el Altiplano se produce solo entre Octubre y Marzo (con cierta variabilidad latitudinal) debido al avance hacia el Sud de la Zona de Convergencia Intertropical, el debilitamiento del Anticiclón del Pacífico y el subsecuente fortalecimiento de los vientos alisios de componente este que vienen cargados de humedad de la zona continental amazónica. La cantidad total de precipitación promedio anual recibida en el Altiplano (Mapa No 7), muestra nuevamente la influencia del Lago Titicaca hacia el Norte y de los salares hacia el Sud que determinan un gradiente Norte-Sud. También se aprecia un gradiente Este-Oeste determinado por la mayor influencia de las masas de aire húmedo traídas desde el Amazonas hacia el Altiplano desde el Este que se debilitan hacia el Oeste.

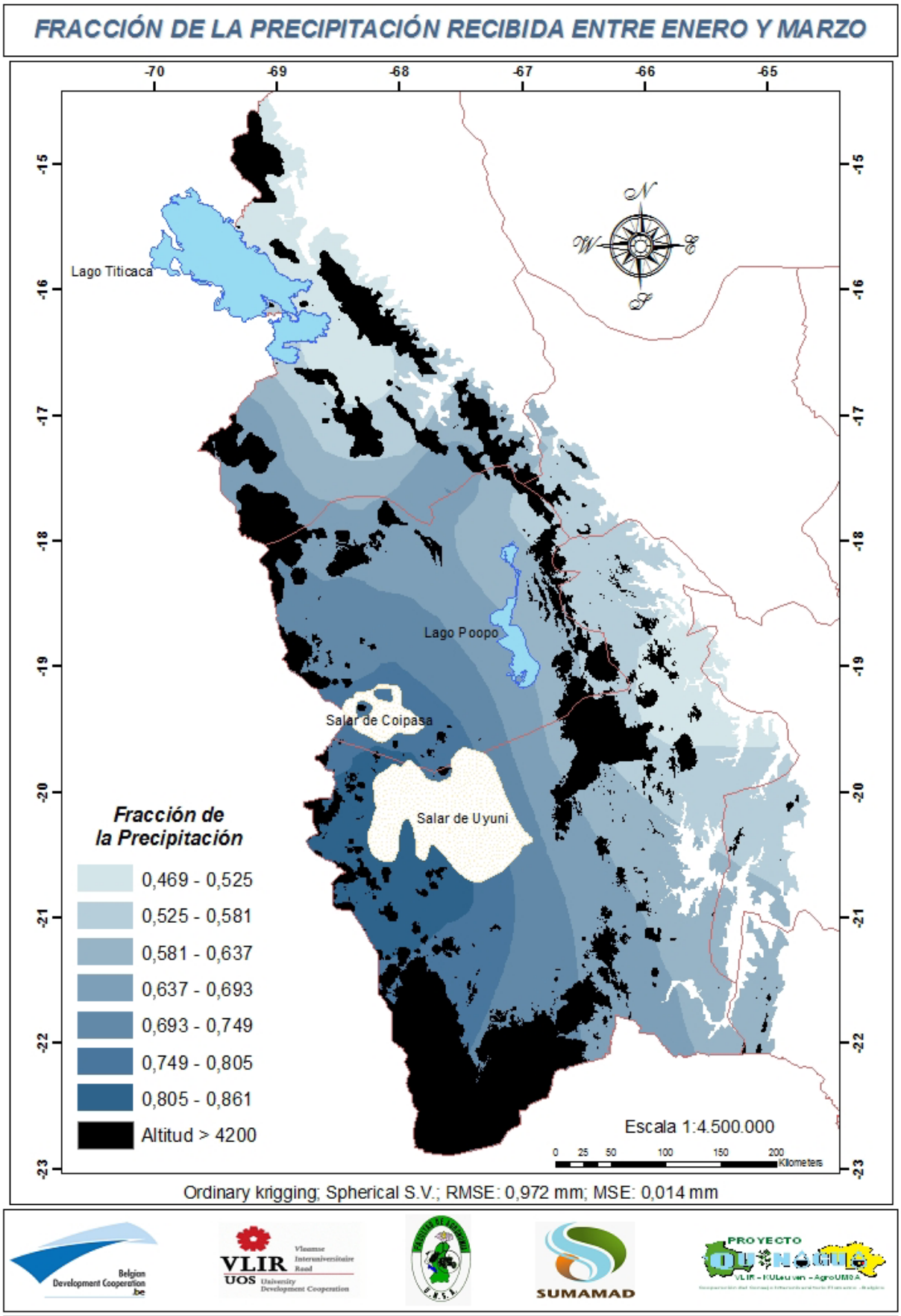
El gradiente Norte-Sud observado en la cantidad total de precipitación recibida también se refleja en la concentración de la precipitación. El Mapa No.8, muestra el porcentaje de la cantidad total de precipitación anual que se recibe entre los meses de Enero a Marzo. En el Sud del Altiplano, la precipitación durante los meses mencionados puede exceder el 80 % de la Precipitación total. De esta manera la agricultura (especialmente a secano) en el Altiplano Sud es favorecida por las condiciones climáticas solamente durante un poco más de tres meses que será el periodo en que se recibirá suficiente precipitación para apoyarla regularmente.

El patrón mostrado se enmarca en las características de precipitación promedio anual del Altiplano. Sin embargo, una zona con elevada variabilidad climática y pluviométrica como esta, no es apropiadamente representada solamente por los valores promedio que representan las características de un año normal, sino que también requieren el conocimiento de los valores que se presentarían en un año seco (75 % de probabilidad de excedencia) o en un año húmedo (25 % de probabilidad de excedencia), características que son presentadas en los Mapas No. 9 y No. 10.

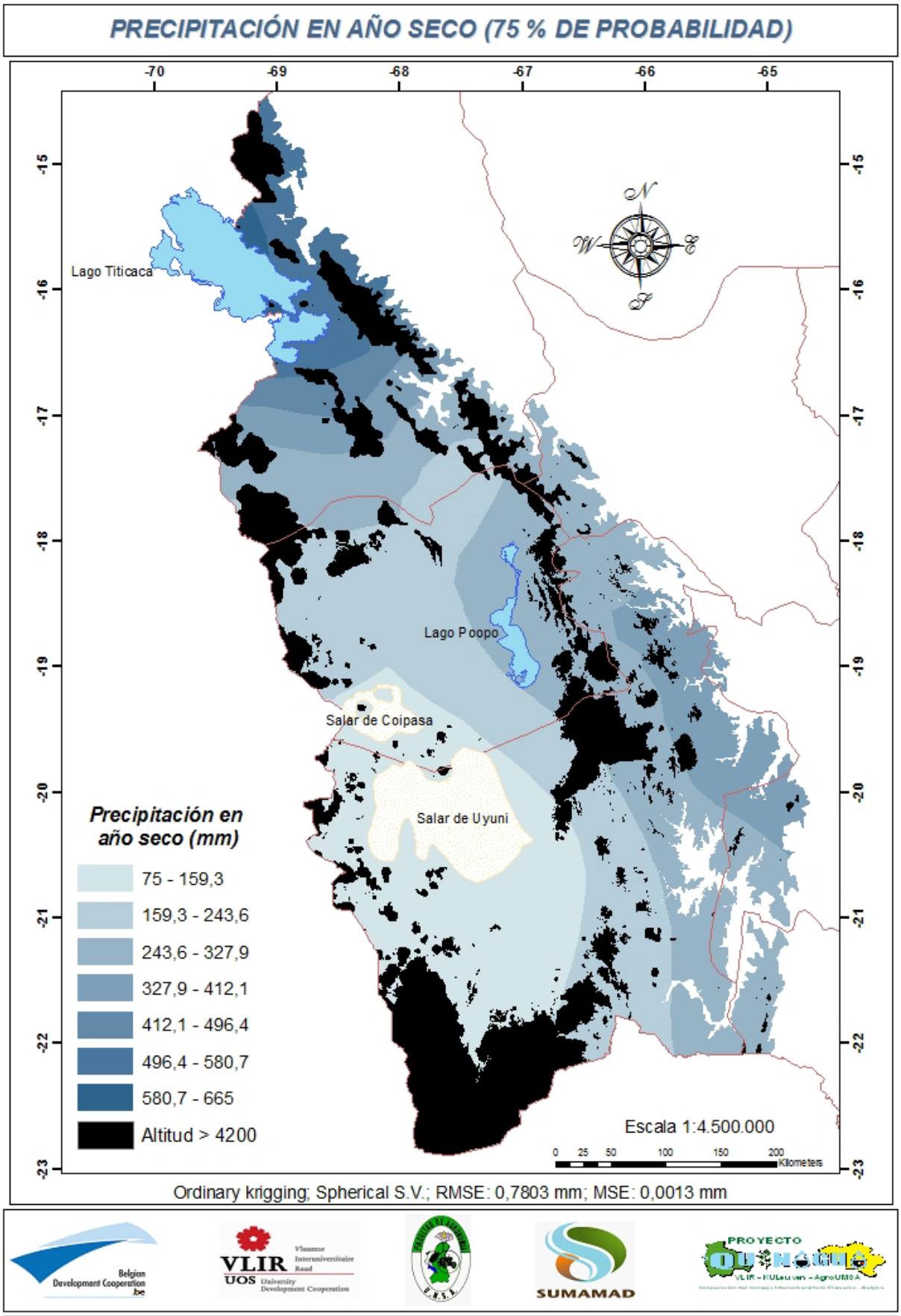
Los mapas No. 9 y 10, muestran que los patrones geográficos presentados para la precipitación promedio, se mantienen en años secos y húmedos. Aunque la precipitación total en años secos en el Norte, aún mantiene cantidades suficientes para llevar adelante algunos tipos de cultivos a secano, con rendimientos aceptables, en años húmedos los valores de precipitación recibida podrían ser muy elevados y llegar a niveles de inundación. Este no es el caso de las áreas ubicadas al Sud del Altiplano donde incluso en años húmedos, la cantidad de precipitación es muy limitante para el desarrollo de los cultivos, llegándose a presentar niveles de máxima aridez y casi seguro fracaso agrícola en años secos.



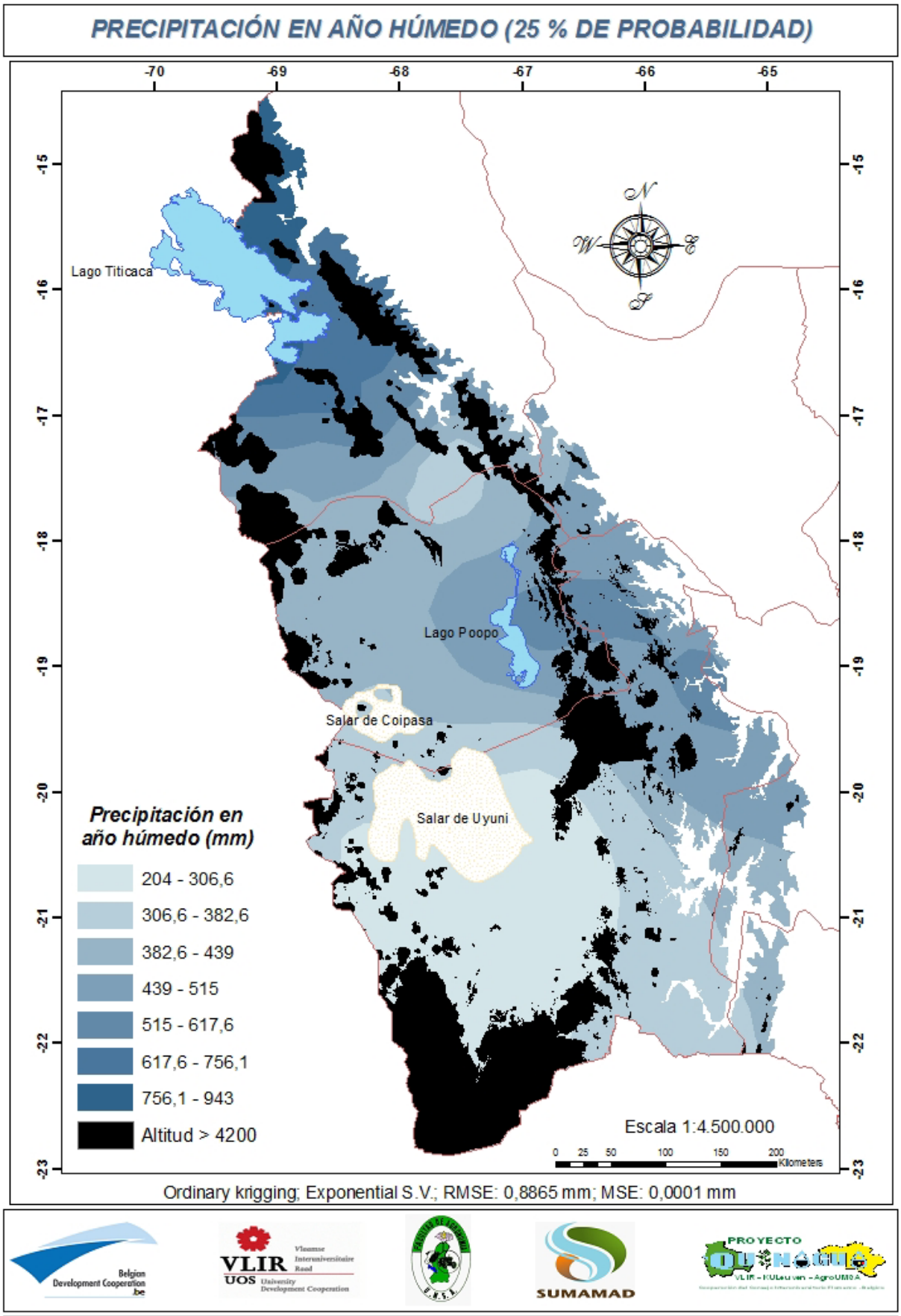
Mapa 7. Precipitación Promedio Anual



Mapa 8. Fracción de la Precipitación Recibida entre Enero y Marzo



Mapa 9. Precipitación en Año Seco (75% de Probabilidad)



UMSA, Facultad de Agronomía, Landaeta Esq. A. Saavedra, La Paz, Bolivia
Tel/Fax: 00591-2-2491485

Mapa 10. Precipitación en Año Húmedo (25% de Probabilidad)

3.2.2. Distribución de la precipitación

Un análisis más fino de la distribución de la precipitación, especialmente para el uso agrícola permite dividir el año hidrológico en dos periodos, el inicio de la época de lluvias (Octubre-Diciembre) y el periodo de mayor precipitación (Enero-Marzo). Esta división es muy importante, pues la lluvia que cae entre Octubre y Diciembre es utilizada para la siembra y el establecimiento del cultivo y aquella caída entre Enero y Marzo es importante para la productividad del cultivo pues coincide con el periodo de máxima necesidad de agua ligado a la floración y fructificación. Más aún es importante conocer la dinámica de la precipitación no solo en años promedio sino también en condiciones de años secos y húmedos. Las series de mapas presentadas en la Figura No. 5, muestran que en años secos, la cantidad de lluvia recibida en Octubre-Diciembre no será suficiente para el establecimiento del cultivo incluso en el Altiplano Central y algunos puntos del Altiplano Norte, siendo deficitaria en años normales y cerca a suficiente en años húmedos para esos puntos. En el caso del periodo Enero-Marzo (serie de mapas presentados en Figura No. 6), en años secos, el Altiplano Norte sería el único sector con suficiente precipitación para no perder totalmente el cultivo mientras que el resto del Altiplano sufrirá fuertes pérdidas pues la cantidad de lluvia recibida es muy reducida.

3.2.3. Duración de la estación de lluvias

La serie de mapas de la Figura No 7, presenta la duración del periodo de lluvias en años secos (75 % de probabilidad), normales (promedio) y húmedos (25 % de probabilidad), calculada de acuerdo al enfoque de Stern et al. (1982). La fecha de inicio de la estación lluviosa se encuentra definida como la fecha cuando la precipitación acumulada por más de tres días ha sido de 20 mm y el número de días sin lluvia dentro de los próximos 30 días no excede a 10. La fecha de finalización de la estación de lluvias está dada por un período (comenzando desde el 15 de marzo) libre de lluvias mayor a 20 días (Sivakumar, 1988). El período de producción a secano se extiende entre el inicio y el cese de la época de lluvias. En esta serie de mapas se aprecia nuevamente el fuerte gradiente Norte-Sud y Este-Oeste ya descrito. El Altiplano Norte, incluso en años secos, permitirá una producción relativamente aceptable pues las lluvias se extienden por un periodo que podría cubrir los periodos más críticos de los cultivos. El Altiplano Sud, en cambio, muestra en años secos, una duración de la época de lluvias inferior a dos meses, periodo que de ninguna manera permitirá el desarrollo de cultivos.

El Mapa No. 11 muestra la cantidad de días con eventos de lluvia para el Altiplano en un año promedio. Este parámetro permite apreciar la distribución de los eventos con lluvia dentro de la época de lluvias. Se aprecia que en el Norte la cantidad de días con lluvia es de alrededor del 50 % de la duración total de la época de lluvias en años promedio. Al Sud los días con de lluvia, constituyen alrededor de solo el 30 % de la duración de la época de lluvias, demostrando mayor concentración e intensidad de la precipitación y mayor duración de los periodos secos dentro de la época de lluvias, lo que también determina mayor posibilidad de estrés hídrico en los cultivos.

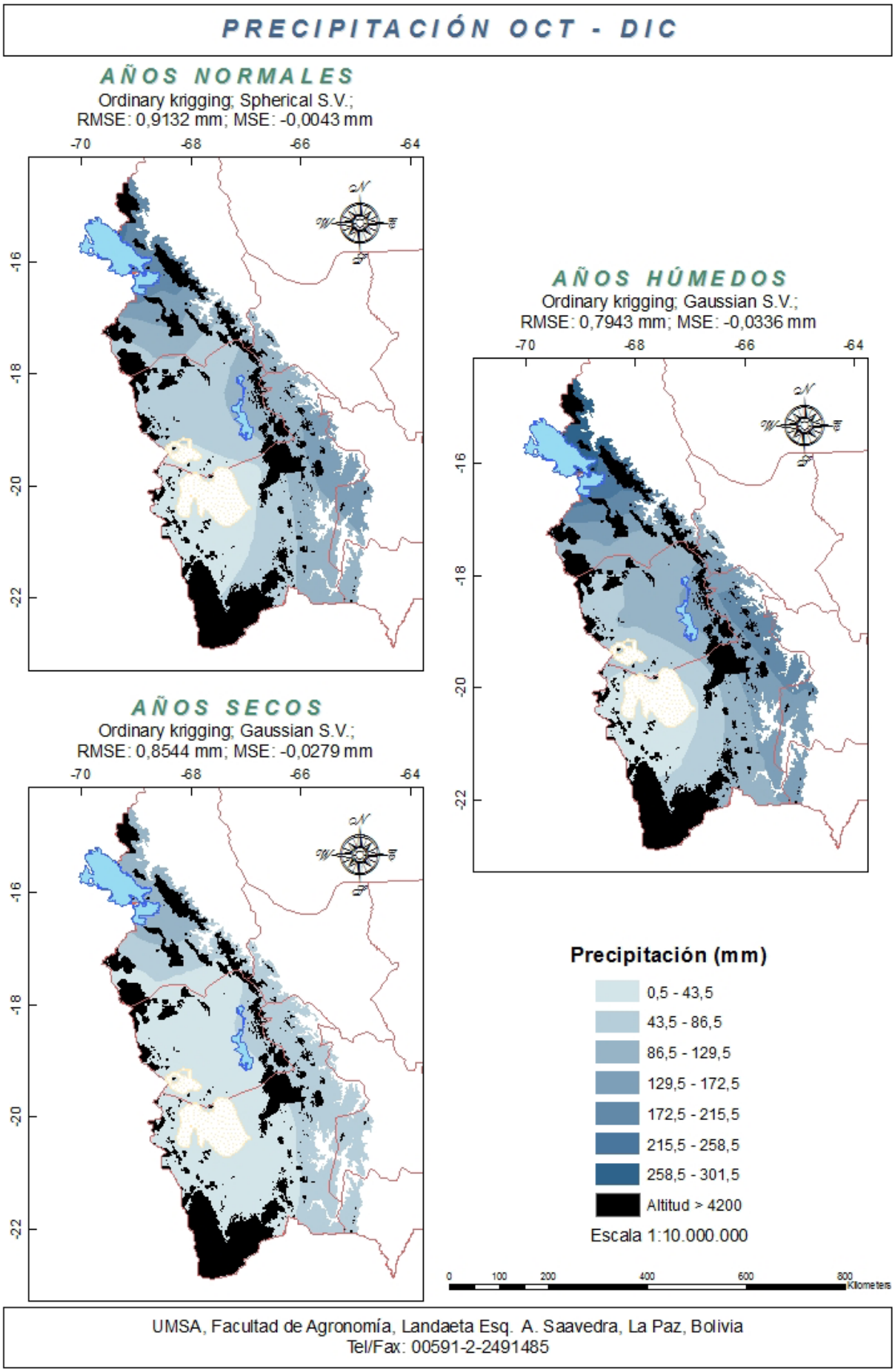


Figura 5. Precipitación Periodo Octubre - Diciembre

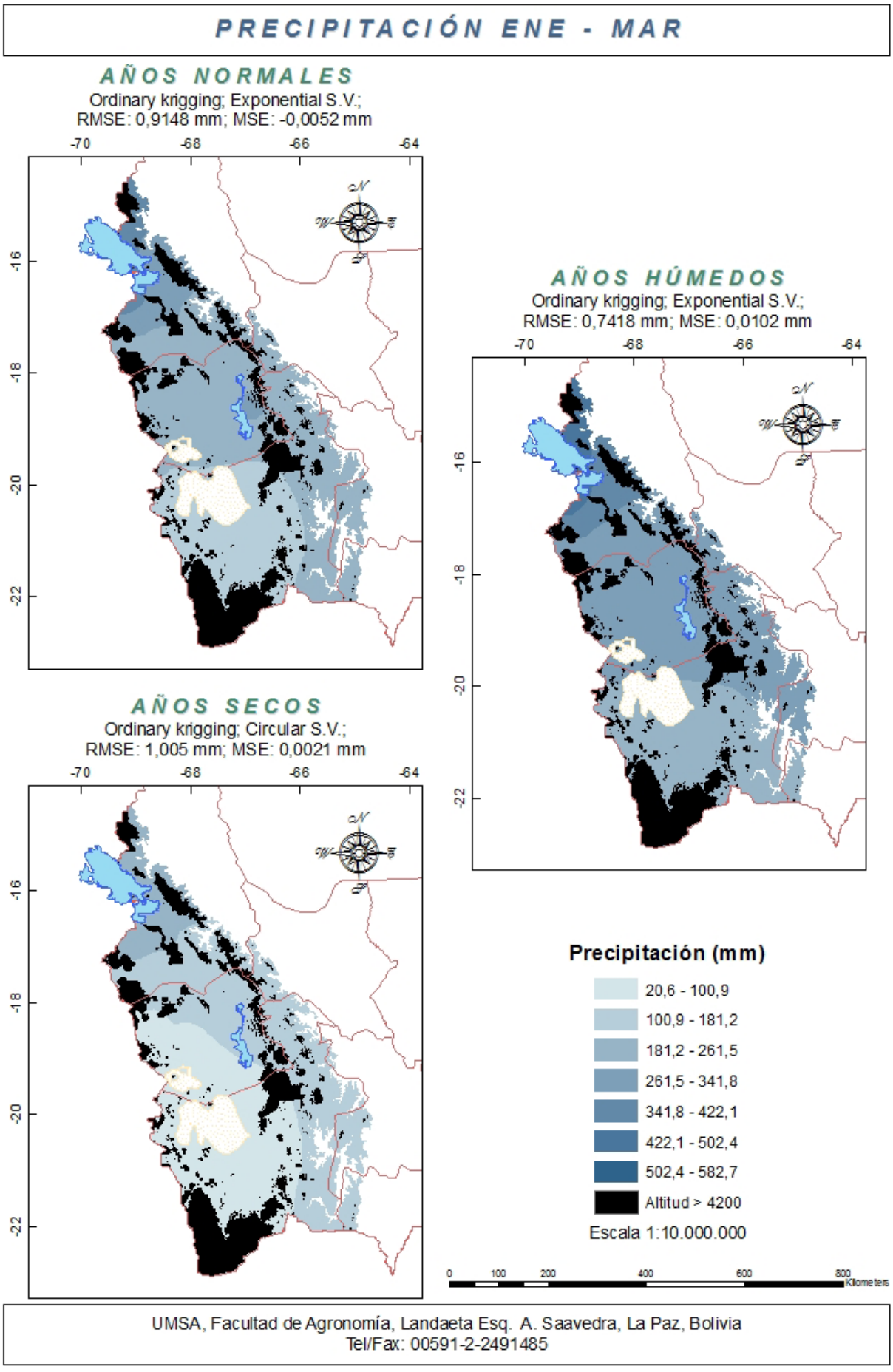


Figura 6. Precipitación Periodo Enero - Marzo

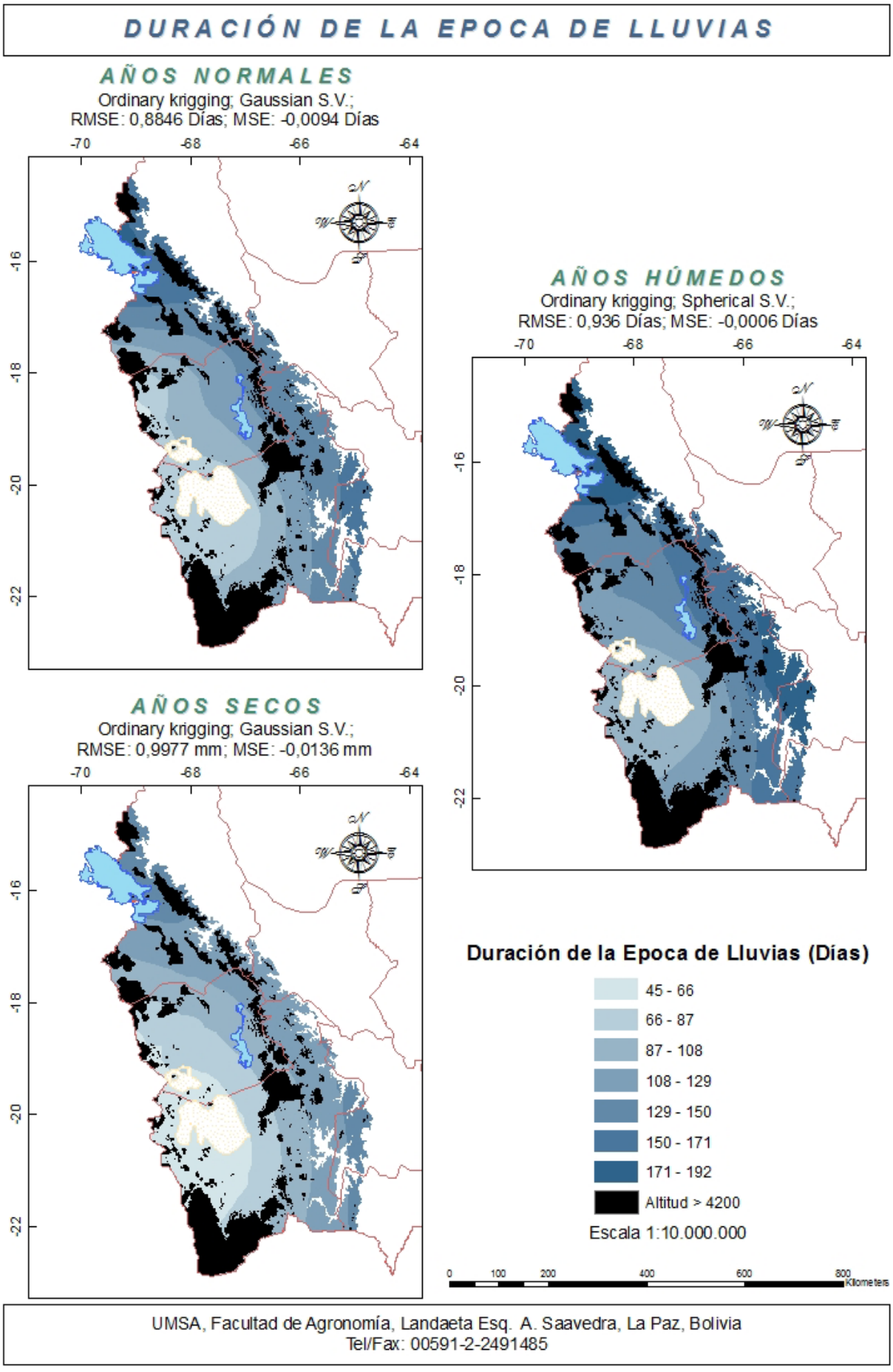
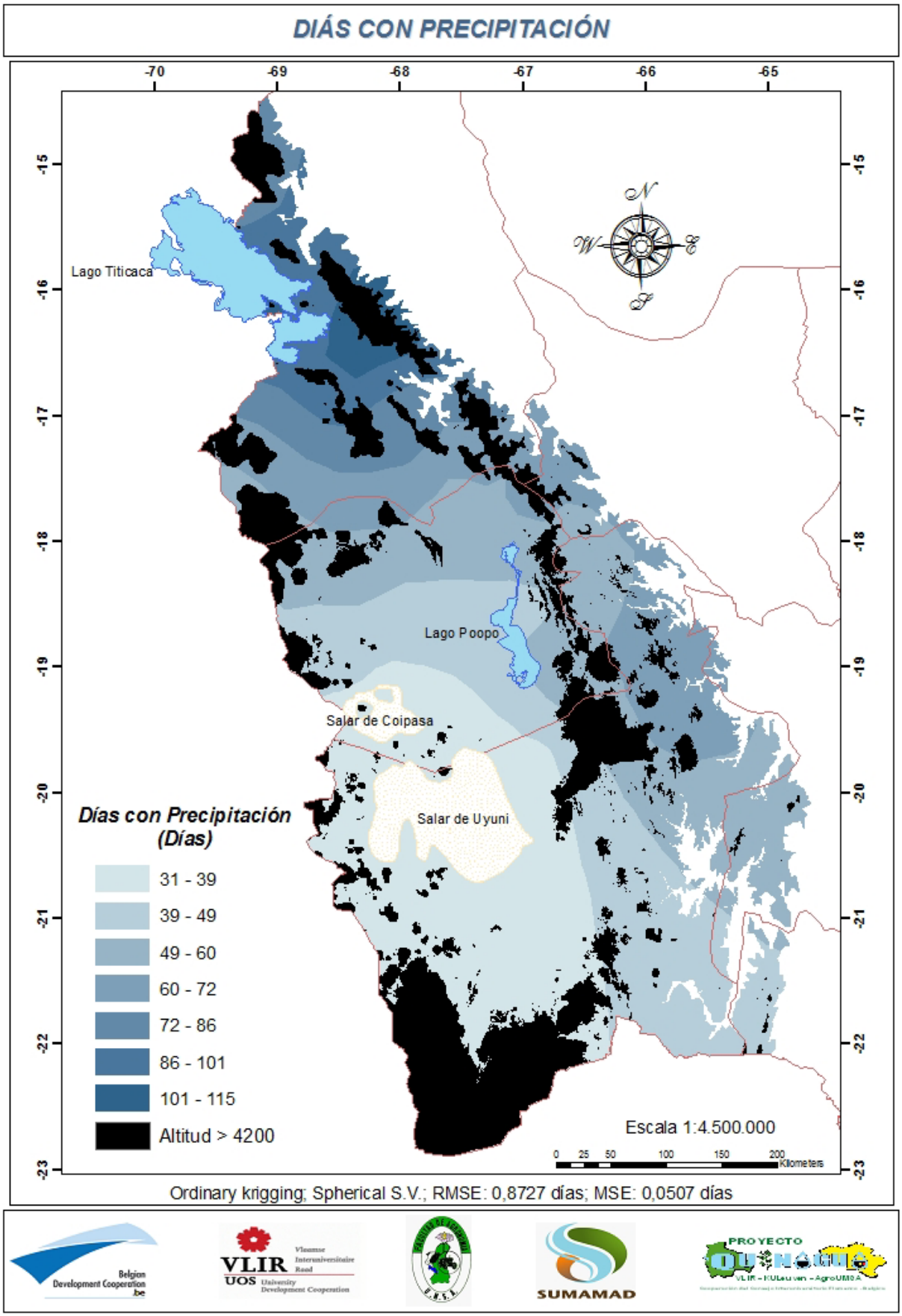


Figura 7. Duración del Periodo de Lluvias

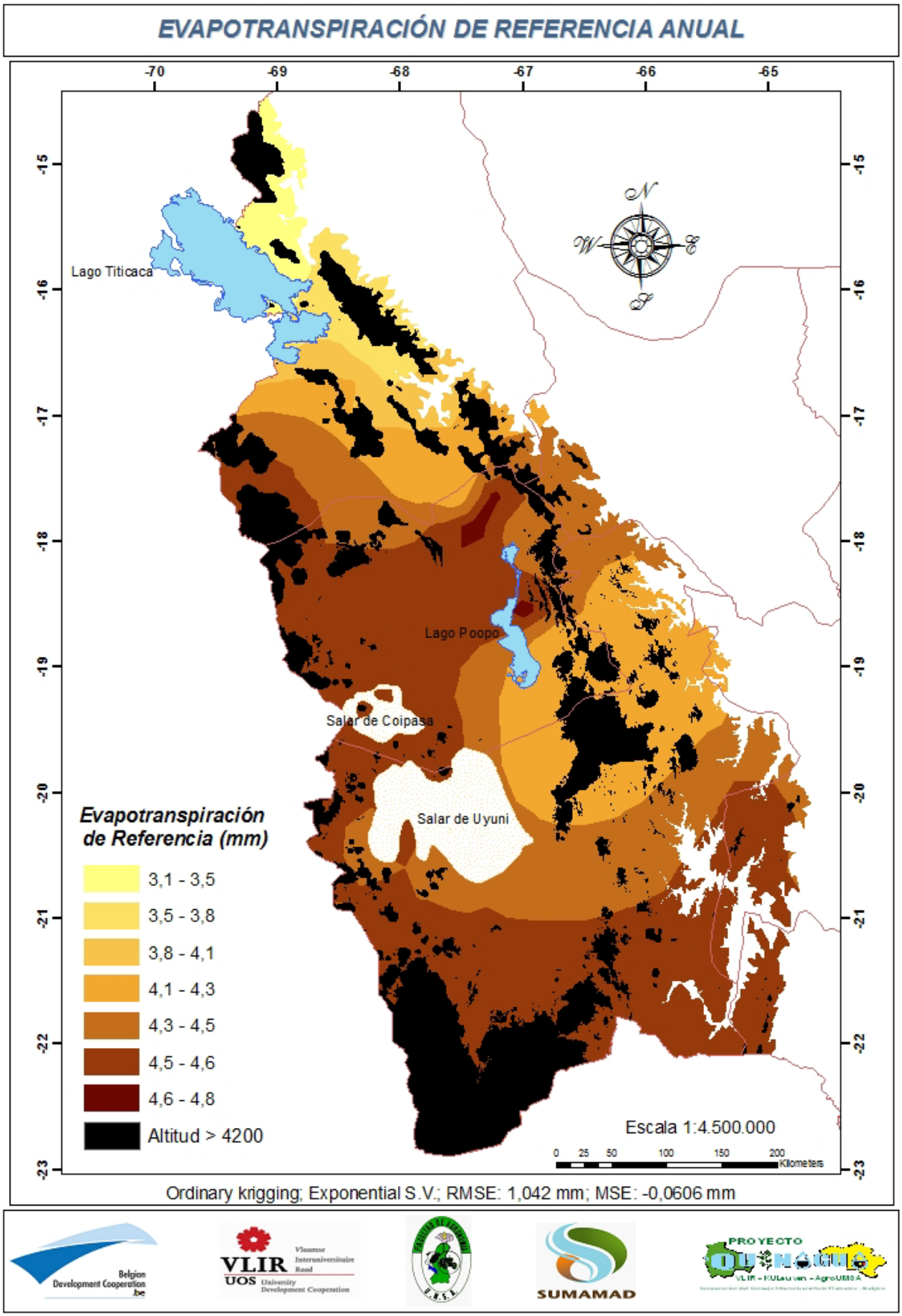


Mapa 11. Días con Precipitación

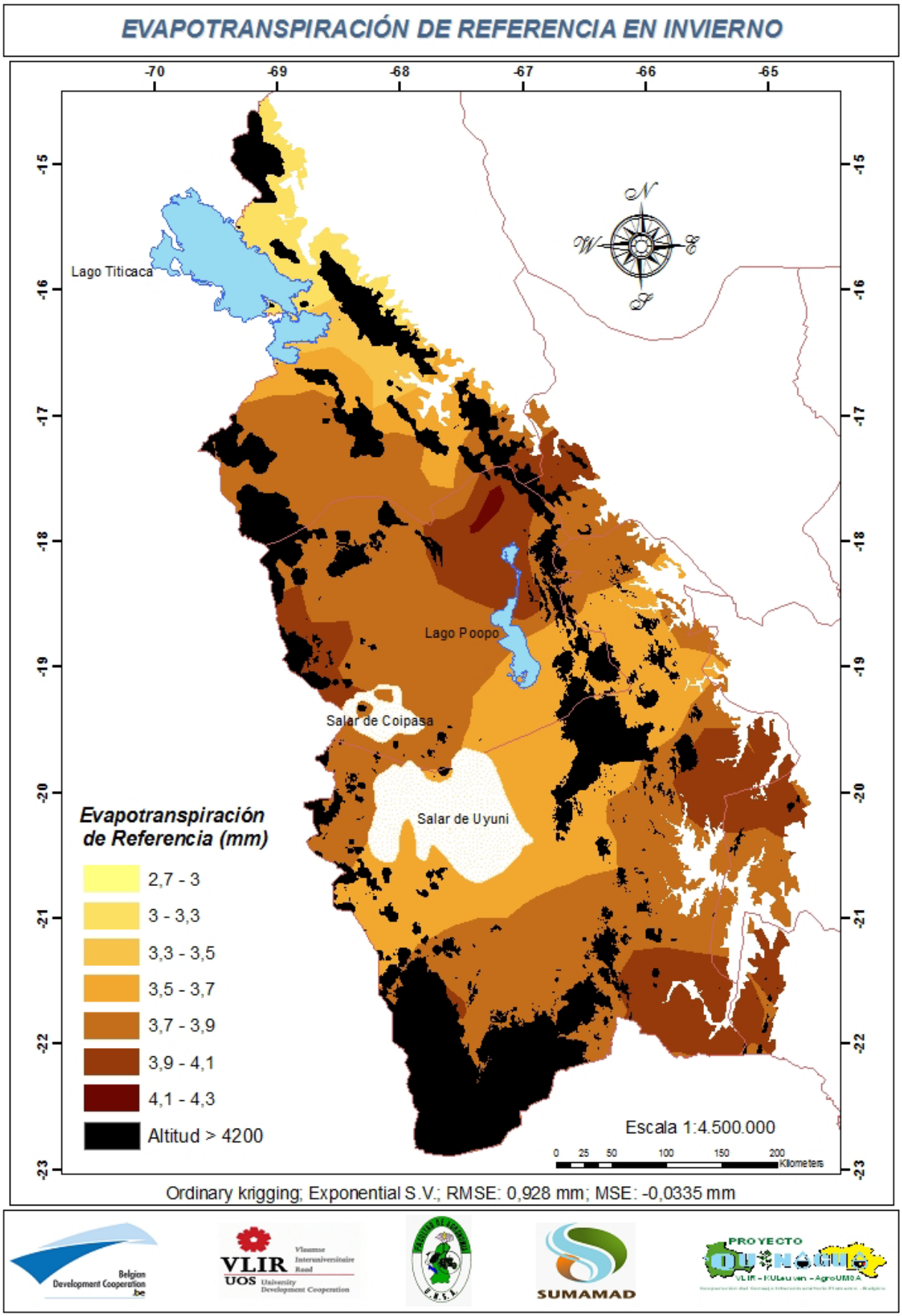
3.3. Evapotranspiración

Se define como Evapotranspiración a la cantidad de agua perdida por una planta en forma conjunta por evaporación directa de su superficie y por transpiración a través de sus estomas. Con el fin de poder compararla con la precipitación, se expresa en mm por unidad de tiempo. Los factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración son diversos, variables en el tiempo y en el espacio y se pueden agrupar en aquellos de orden climático, los relativos a la planta y los asociados al suelo. Dentro de este concepto se desprende el de la *Evapotranspiración de Referencia (ETo)* (Allen et al., 2006) que es la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto por un cultivo de referencia, que se desarrolla en óptimas condiciones, y sin sufrir limitaciones en la disponibilidad de agua ni de suelo. Según esta definición, la magnitud de la ETo está regulada solamente por las condiciones climáticas y por ello sus valores muestran la demanda evaporativa de la atmósfera de una zona, en función de sus características principalmente de temperatura y humedad. El Mapa No. 12 presenta los valores de Evapotranspiración de Referencia promedio anual en el Altiplano Boliviano calculados por el método FAO Penman-Monteith. Las características de temperatura mostradas en mapas anteriores se expresan coherentemente en los valores de ETo calculados con el mismo gradiente encontrado en la distribución térmica. De esta manera los valores de demanda evaporativa de la atmósfera o ETo son mayores al Sud y Oeste de la zona, lo cual indica que la demanda evaporativa promedio que deberán cubrir los cultivos de esta zona es mayor que en el Norte.

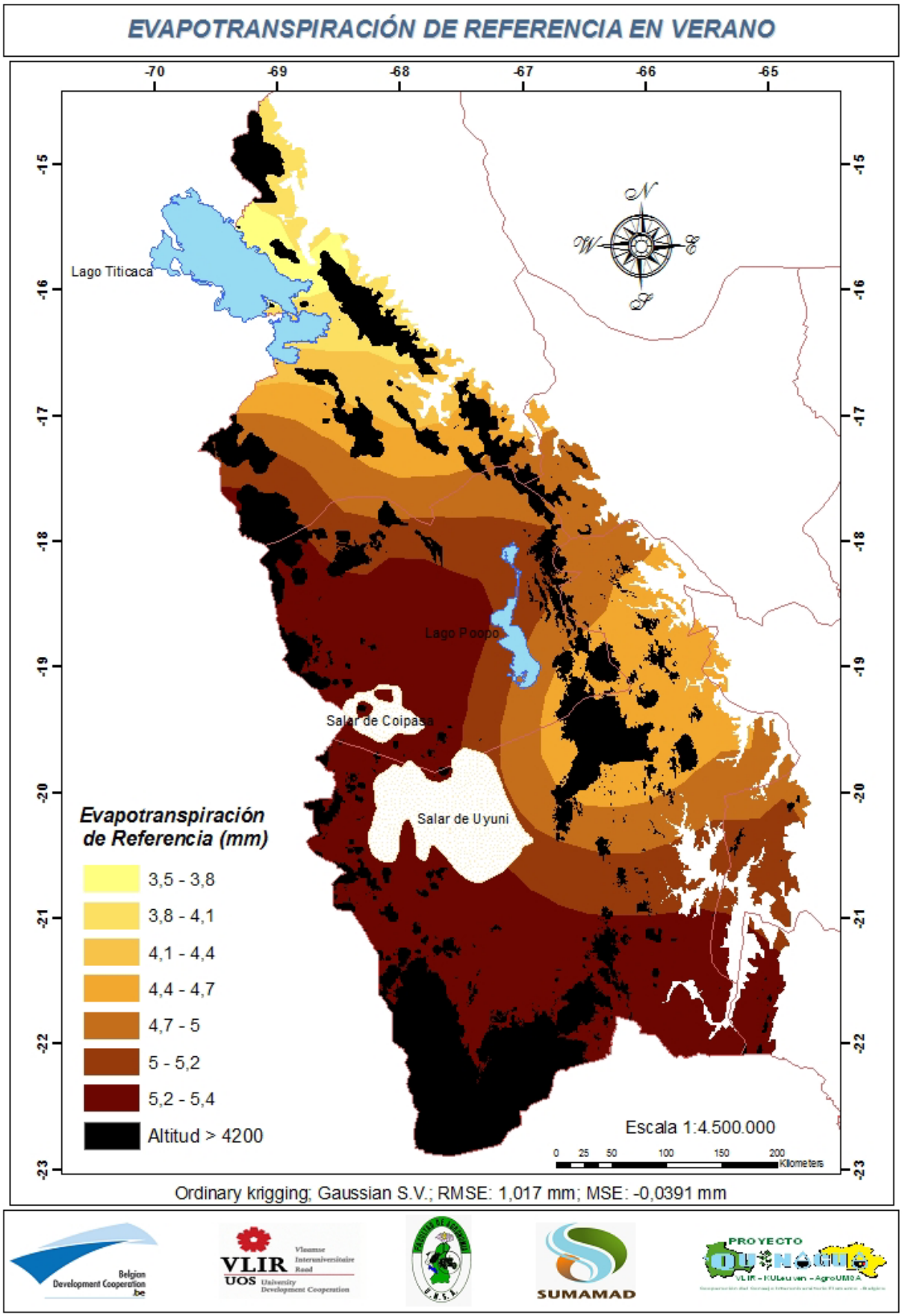
Debido a la, ya mostrada, fuerte variación de la temperatura mínima entre invierno y verano, los valores anuales de ETo podrían no demostrar la magnitud real de la demanda atmosférica de vapor de agua especialmente en el ciclo del cultivo. Por esta razón en los Mapas No. 13 y 14 se muestran los valores promedio de la ETo en invierno (abril-Septiembre) y en verano (Octubre a Marzo). Las diferencias entre invierno y verano son menores cuanto más al Norte se encuentre el punto debido al mayor contenido de humedad atmosférica que retiene la pérdida de radiación y modula la variación térmica incluso en invierno. Hacia el Sud, la mayor amplitud térmica muestra una humedad reducida, lo cual se expresa en mayor Evapotranspiración en invierno. En verano, la reducida humedad más la elevada recepción energética determina mayores valores de ETo y por tanto mayor demanda atmosférica de vapor de agua.



Mapa 12. Evapotranspiración de Referencia Promedio Anual



Mapa 13. Evapotranspiración de Referencia en Invierno



Mapa 14. Evapotranspiración de Referencia en Verano

3.4. Déficit Hídrico

Si bien la ETo muestra la demanda atmosférica de vapor de agua, la precipitación presenta la cantidad de agua que la atmósfera aporta a la superficie. La diferencia entre una y otra refleja el déficit hídrico de una zona. El análisis de estas variables es presentado en La serie de Mapas presentada en la Figura No. 8. Para ello se ha calculado la diferencia de la ETo anual y la precipitación anual, para años secos, normales y húmedos. Los elevados déficits calculados muestran la dificultad para llevar adelante agricultura a secano en todo el año y en todos los tipos de años.

Como se explicó anteriormente, las bajas temperaturas en invierno, el elevado riesgo de heladas y la presencia de precipitación restringida al verano, hacen que la agricultura a secano solo pueda realizarse en los meses estivales (Octubre a Marzo o menos). Para evaluar el déficit hídrico en la zona en la época agrícola, se ha calculado la diferencia de la ETo y la precipitación ocurrida durante los meses de Octubre a Marzo, para años secos, normales y húmedos (serie de mapas presentada en la Figura No. 9). Aunque el déficit durante la época de lluvias (verano) es menor que el déficit anual, los resultados muestran que en el centro y sud del Altiplano, existe un déficit hídrico muy marcado en todos los tipos de años durante el periodo agrícola. Solamente en el Norte se presentan poco o ningún déficit en años húmedos y en años normales, mostrando la vulnerabilidad de la agricultura a secano en todo el Altiplano en los años secos y del Altiplano Central y Sud en la mayor parte de los años.

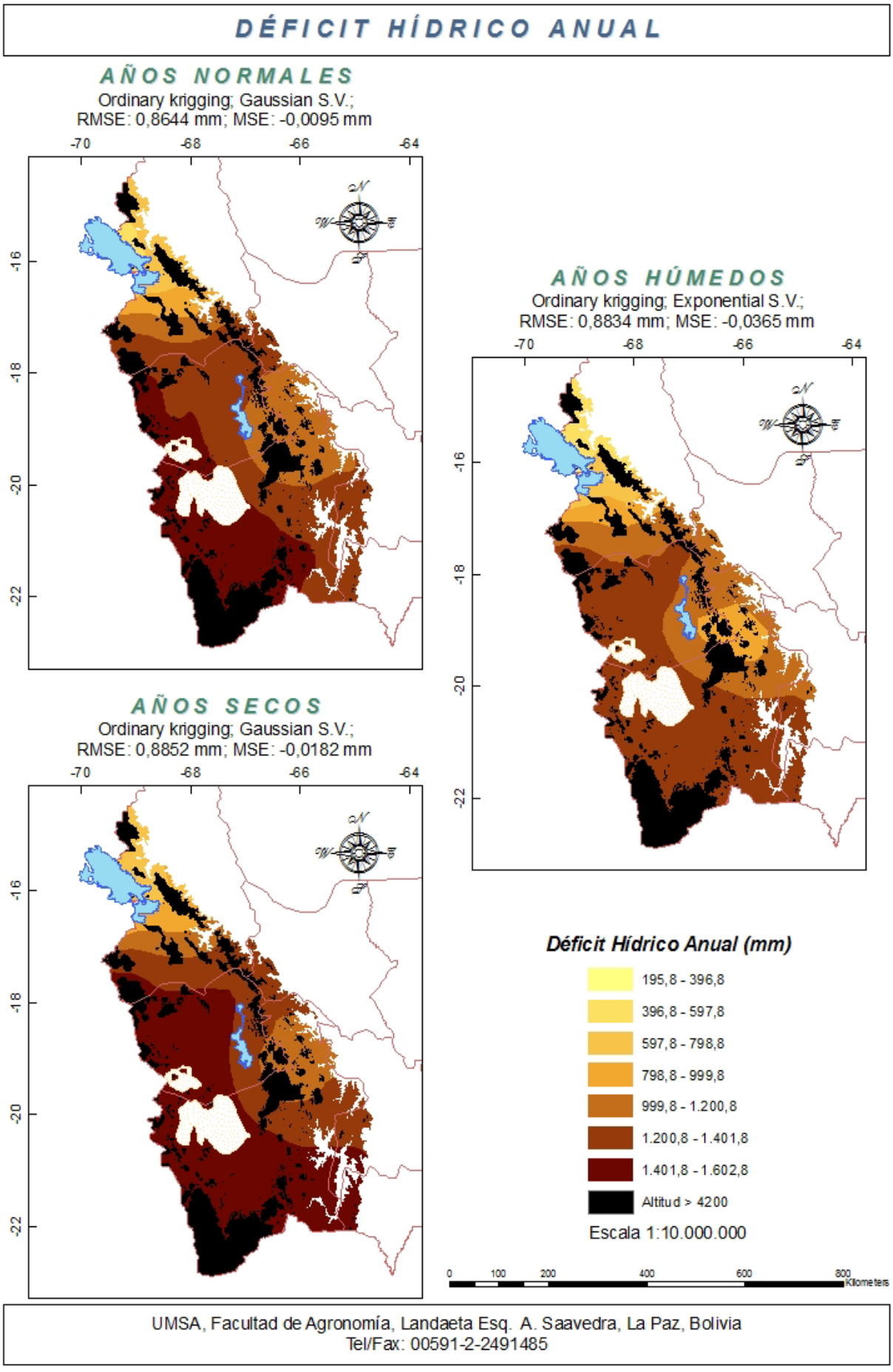


Figura 8. Déficit Hídrico Anual

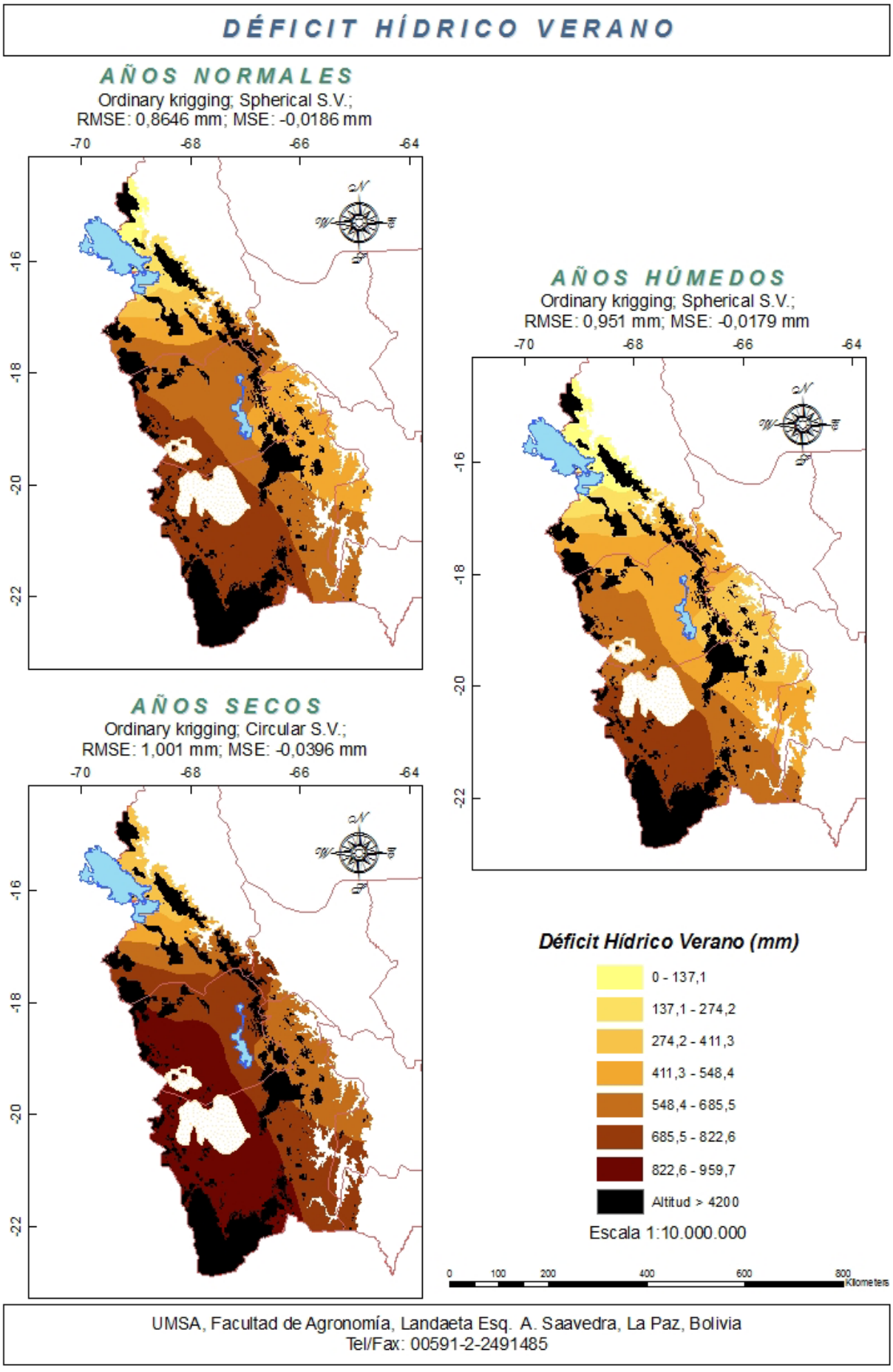
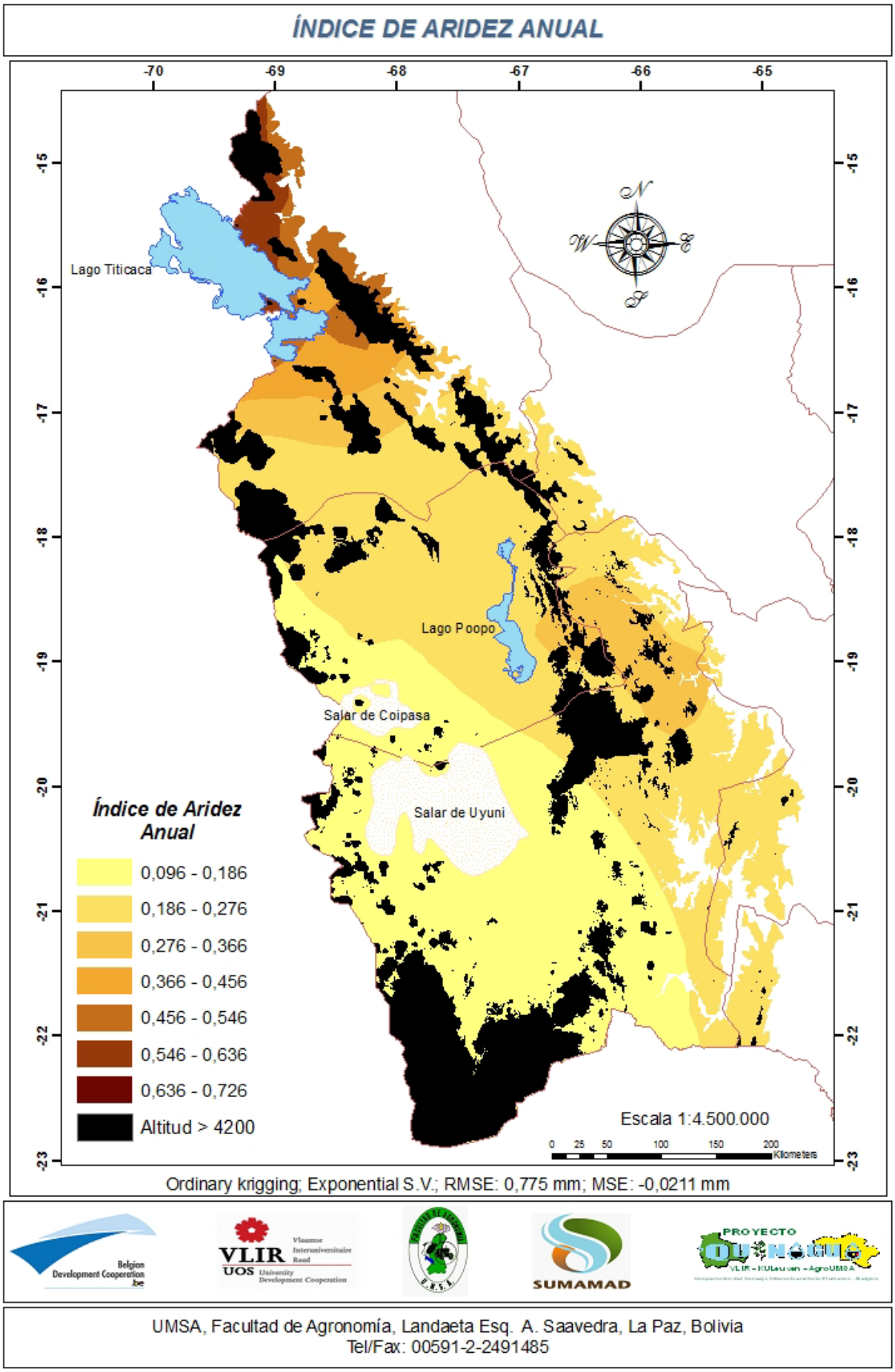


Figura 9. Déficit Hídrico en Verano

3.5. Índice de Aridez

Los índices de aridez clasifican las zonas de acuerdo a la relación entre la precipitación caída en una zona y su ETo. Valores bajos de esta relación expresan zonas con elevada aridez, pues reflejan que la precipitación no cubre los requerimientos hídricos de esa zona. El Mapa No. 15 muestra los índices de aridez anuales del Altiplano, reflejando que en promedio todo el territorio altiplánico presenta aridez elevada.

Los valores del Mapa No. 15, nuevamente expresan las condiciones medias que sufren muchas variaciones entre invierno y verano. Para evaluar estas variaciones se presentan la serie de mapas de la Figura No. 10 que presenta el índice de aridez en verano (considerando que esta es la época de cultivo) para años secos, normales y húmedos. Los mapas muestran que la aridez anual no expresa la verdadera aridez del altiplano que es menor durante la época de lluvias. Sin embargo también se aprecia que el Sud del altiplano, incluso en años húmedos tiene una elevada aridez y la precipitación no cubre ni un 50 % de la demanda evaporativa de la atmósfera. Contrariamente, el Norte del Altiplano podría clasificarse como zona húmeda durante el verano en años normales y húmedos debido a la elevada precipitación recibida y a los bajos niveles de la ETo en ese periodo. Nuevamente se aprecia la elevada influencia del Lago Titicaca, la mayor influencia de la Zona de Convergencia InterTropical al Norte, la mayor influencia del anticiclón del Pacífico al sud y la entrada de los vientos alisios en la zona.



Mapa 15. Índice de Aridez Anual

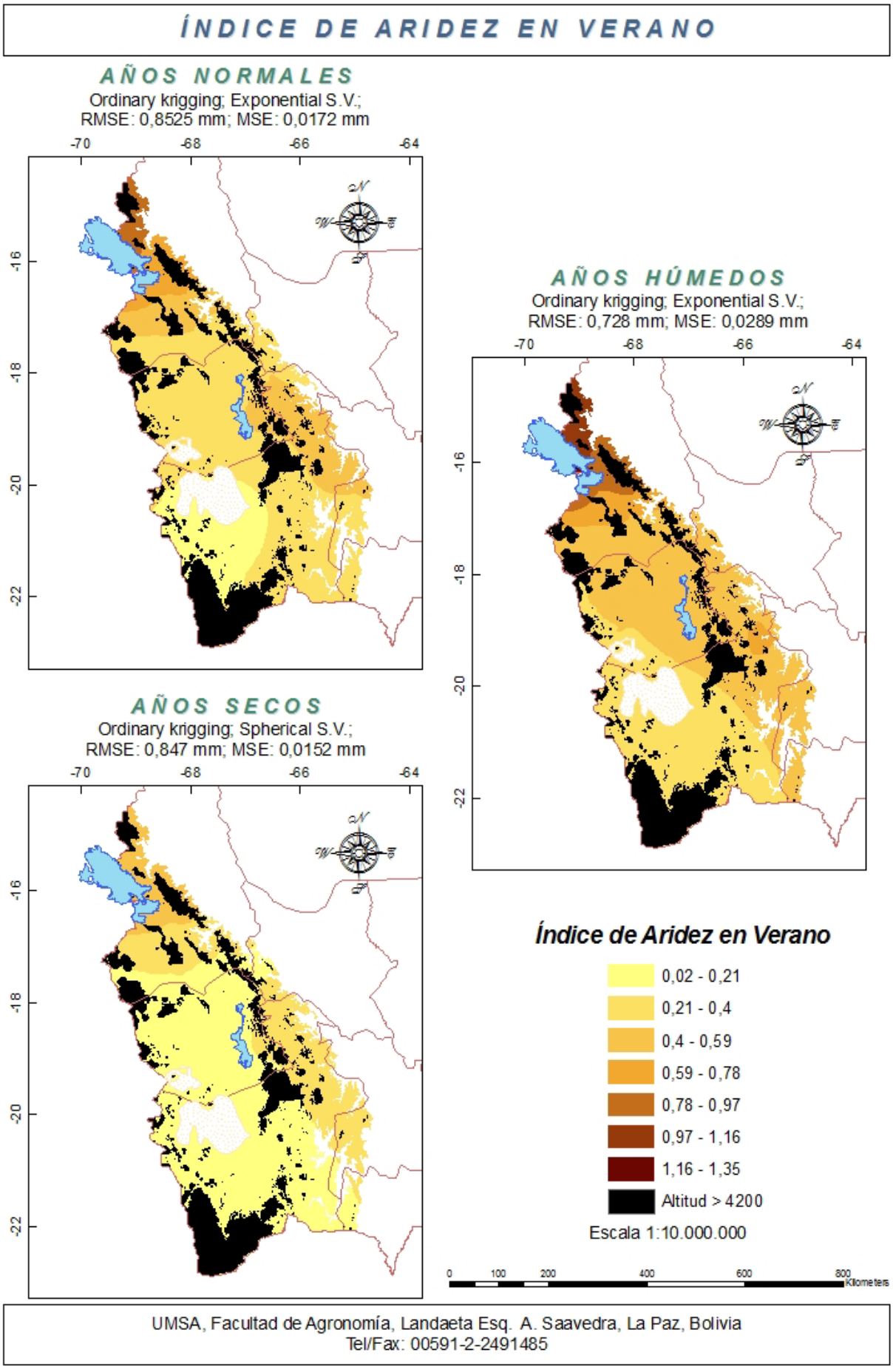


Figura 10. Índice de Aridez en Verano

3.6. Conclusiones

Las descripciones climáticas y agroclimáticas mostradas en las páginas previas demuestran las razones para que la agricultura a secano en todo el altiplano, solo pueda llevarse adelante durante el verano. Incluso en este periodo los riesgos climáticos (sequías, heladas) son elevados, especialmente en la zona Central y Sud. Solamente se puede considerar apto para la agricultura y sin elevadas restricciones, al sector circunlacustre, lo cual demuestra la urgente necesidad de apoyar fuertemente a la mayor proporción del altiplano con acciones tales como riego ya sea complementario, deficitario o tecnificado y otras medidas de manejo agrícola como el manejo de variedades, cultivos y otros. De esta manera se aprovechará la gran cantidad de radiación solar recibida durante todo el año para precisamente extender el ciclo agrícola, cualidad de la que no gozan latitudes más elevadas.

4. ZONIFICACION AGROCLIMATICA DE QUINOA

La quinua, quínoa o kinwa (*Chenopodium quinoa*) es un pseudocereal perteneciente a la subfamilia Chenopodioideae de las amarantáceas (Geerts et al., 2008). Es un cultivo que se produce en los Andes de Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador y del Perú además de los Estados Unidos, siendo Bolivia el primer productor mundial seguido del Perú y de los Estados Unidos. Se le denomina pseudocereal porque no pertenece a la familia de las gramíneas en que están los cereales "tradicionales", pero debido a su alto contenido de almidón y su formación de grano, su uso es el de un cereal.

El altiplano boliviano es la principal zona de cultivo mundial de quinua. El cultivo es muy importante para los agricultores del país; principalmente para las más de 70.000 unidades campesinas y pequeños agricultores, de Potosí y Oruro. La superficie cultivada en Bolivia asciende a las 55.000 ha, produciendo más de 26.500 TM al año.

Siendo que el Altiplano Boliviano se constituye en la zona de mayor producción de la quinua, en el presente trabajo se presentará la zonificación agroclimática del cultivo para el Altiplano, con el análisis de la factibilidad de aplicación de riego deficitario para lograr su cultivo en forma sostenible.

Para llevar adelante la zonificación del cultivo de la quinua es necesario conocer los requerimientos de agua del cultivo a lo largo del Altiplano Boliviano si esta fuera cultivada bajo condiciones de máxima disponibilidad de agua. Para ello se aplicó la ecuación de Allen et al. (2006):

$$ETc = Kc \times ETo$$

Donde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo

Kc = Coeficiente de cultivo

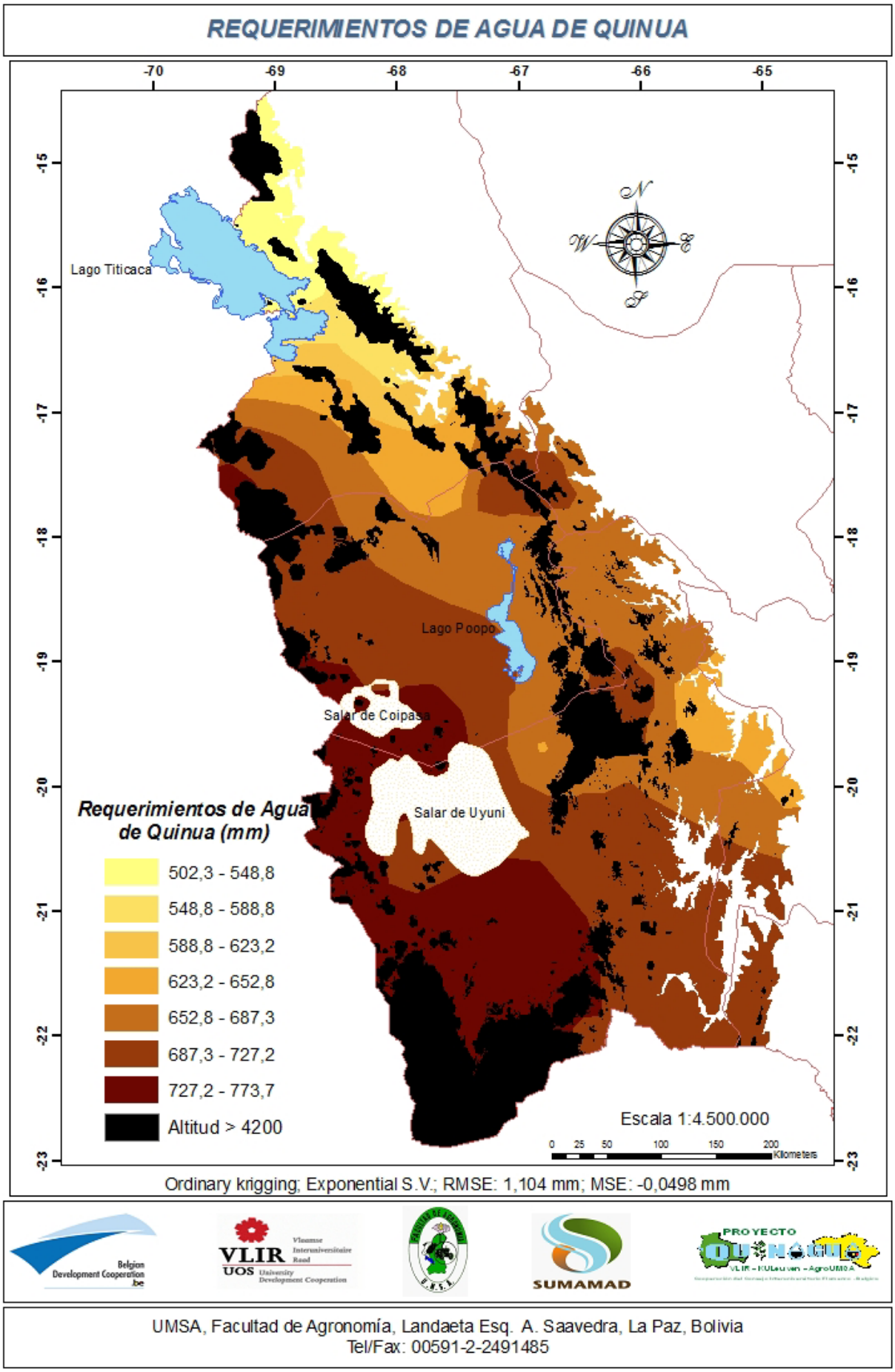
ETo = Evapotranspiración de Referencia

Los valores de Coeficiente de cultivo de la quinua, fueron extraídos de Geerts et al. (2006) y Garcia (2003) utilizando valores de Kc inicial igual a 0.15, Kc medio igual a 1.0 y Kc final igual a 0.6 aplicado a todas las estaciones mencionadas en el Cuadro 1. La distribución de los requerimientos de agua se muestra en el Mapa No. 16.

El Mapa No. 16 muestra que en el Altiplano Norte, el cultivo requiere menor cantidad de agua, debido a un clima más húmedo con menores extremos térmicos y mayor humedad atmosférica ofrecida por la atmósfera. Inversamente el Altiplano Sud se presenta como la zona con mayor requerimiento hídrico para la quinua por sus características de elevada aridez.

La comparación de los requerimientos de agua del cultivo determinados por el clima reinante de la zona productiva y la cantidad de agua recibida como precipitación, muestra diversos escenarios de déficit. Los mapas presentados en la Figura No. 11, muestran el déficit hídrico para el cultivo en mm en años normales, húmedos y secos. Estos escenarios muestran que el cultivo sufrirá fuerte estrés hídrico en el

Altiplano Sud y hacia el Oeste del Altiplano en todos los tipos de años, mientras que hacia el Norte, el estrés reduce hasta casi desaparecer en años normales y húmedos, siendo reducido en año secos. En contraposición a los resultados mencionados, las áreas más importantes para el cultivo de la quinua en el Altiplano Boliviano se encuentran concentradas en el Sud, concretamente en la zona intersalar.



Mapa 16. Requerimientos de Agua de Quinua

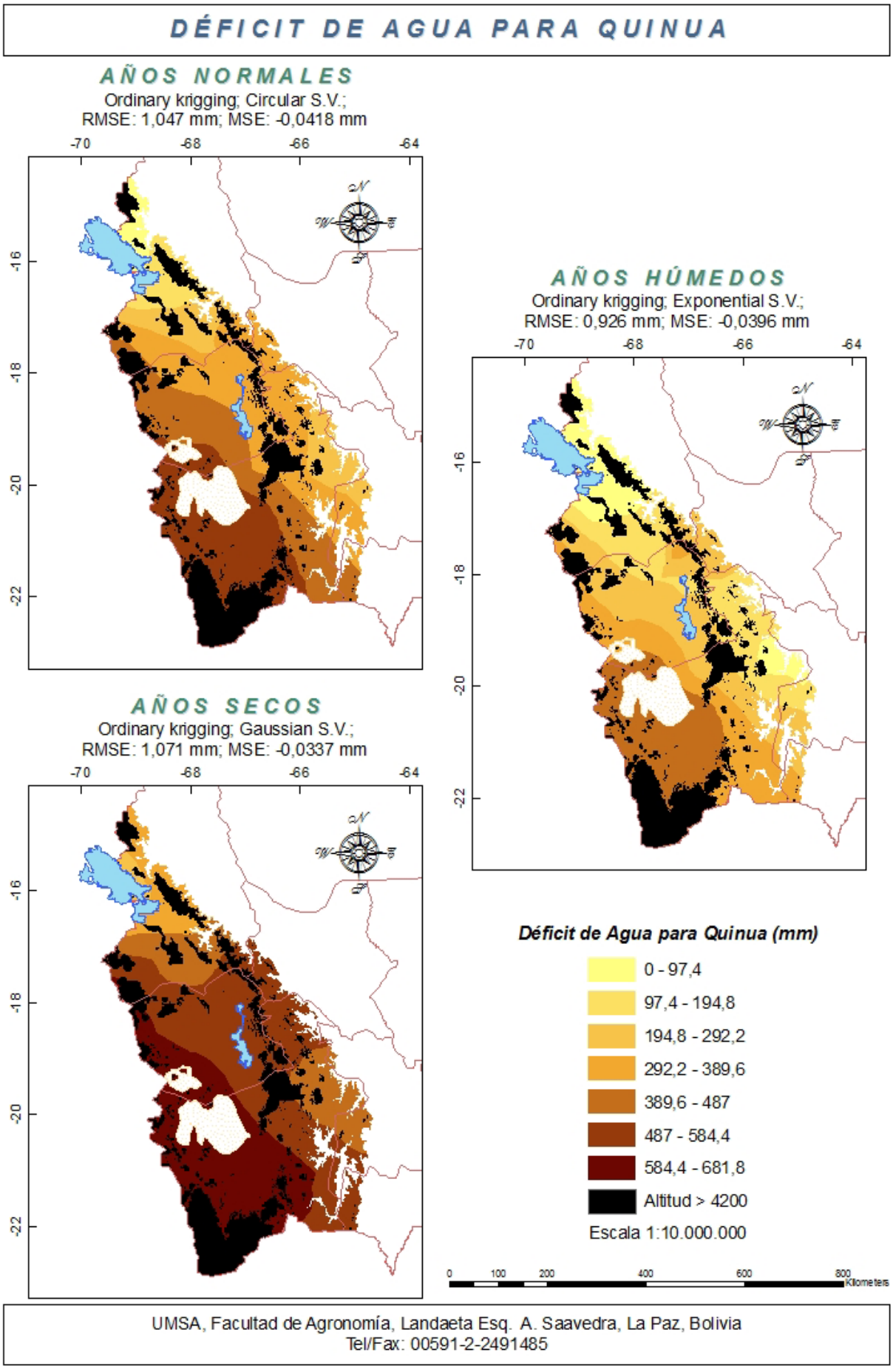
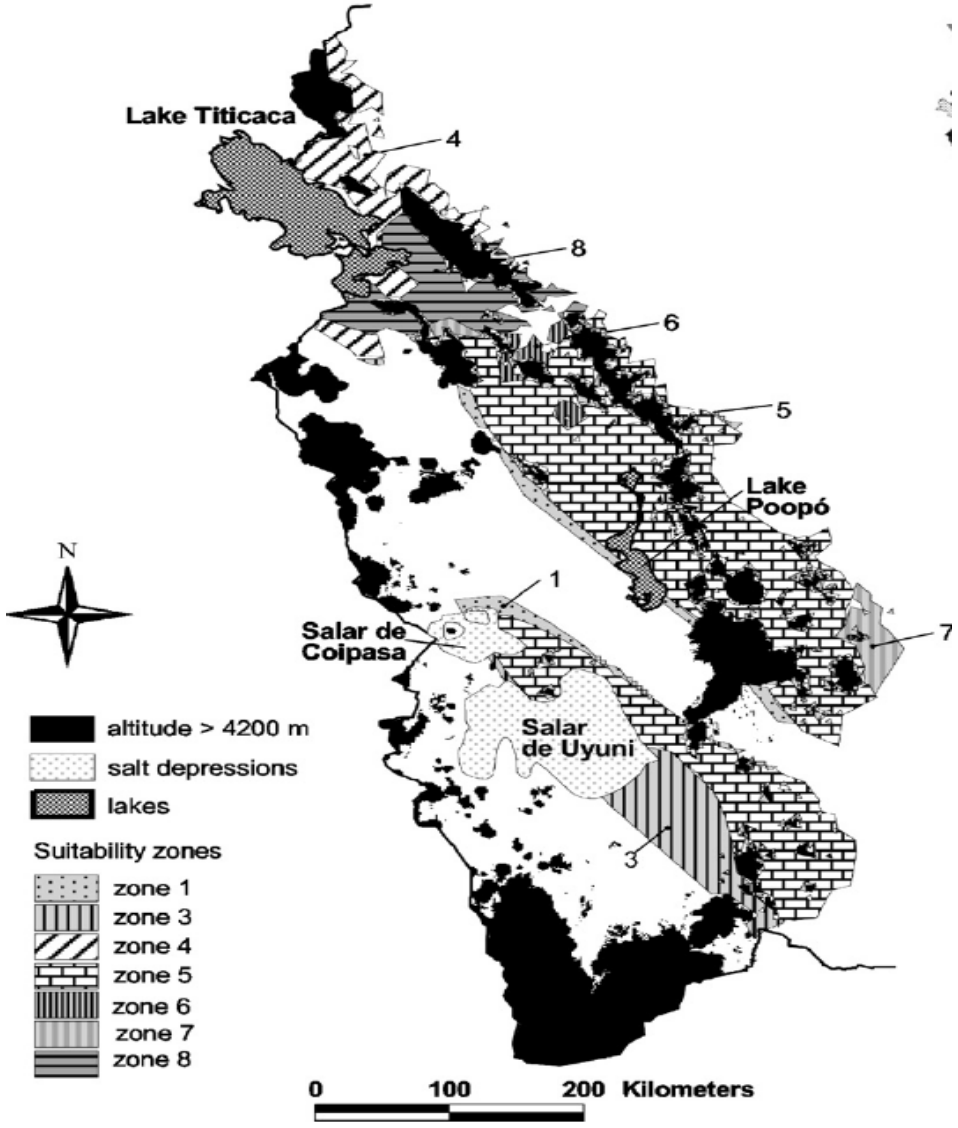


Figura 11. Déficit de Agua para Quinua

4.1. Análisis Geográfico de la Factibilidad de Aplicación de Riego Deficitario en Quinoa

Dado el elevado estrés hídrico que sufre el cultivo de la quinua en el Altiplano Sud, Geerts et al. (2006), realizaron una evaluación de la factibilidad de la aplicación de riego deficitario[1], a través del manejo de base de datos geográficos combinados con la características climáticas definidas en el Capítulo anterior. Las variables analizadas e integradas fueron la Evapotranspiración de Referencia (Mapa No. 14), la duración de la época de lluvias en años secos, normales y húmedos (Figura No. 7), el índice de aridez durante la época de lluvias en años secos, normales y húmedos (Figura No. 10), y el riesgo de helada para la zona (Mapa No.6)[2]. Esta información fue aplicada en capas en un Sistema de Información Geográfico conjuntamente al Modelo de Elevación Digital provisto por CIP (2005) a una resolución aproximada de 1 km. El resultado de la zonificación aplicada se extrae del mapa presentado por Geerts et al. (2006) (Mapa No. 17).



Mapa 17. Factibilidad de Agroclimática de Aplicación de Riego Deficitario

[1] Se asume riego deficitario como la cantidad de agua aplicada para garantizar la producción media del cultivo y evitar el fracaso debido a la sequía, pero sin alcanzar los niveles de aplicación máxima de riego

[2] La descripción completa de la metodología aplicada se encuentra en Geerts et al. (2006)

El Mapa No. 17, muestra ocho zonas delimitadas para la factibilidad agroclimática de aplicación de riego deficitario. La zonificación reveló que en el Este del altiplano (zona 5) y en la zona intersalar (zonas 3 y 5), la aplicación de riego deficitario para apoyar la siembra y durante floración y fructificación, puede ser de mucho apoyo para estabilizar el rendimiento de quinua y mitigar los impactos de la sequía durante el ciclo del cultivo. También ayudaría para lograr extender el periodo de cultivo a través de siembras tempranas apoyadas por riego. Las zonas alrededor del Lago Titicaca muestran que en años secos podría ser de importancia la aplicación de un evento de riego para la época de siembra y otro durante la época de cultivo. Las zonas 1, 6 y 7 son de menor importancia por su reducida extensión. La parte oeste del Altiplano (zona blanca) es muy vulnerable a la falta de agua, pero el riego deficitario no es factible si se aplica en forma aislada, debido a la fuerte presencia de heladas durante la época de cultivo, lo cual reduciría la efectividad y eficiencia de los recursos invertidos en los sistemas de riego. Esta zona, al presente no es utilizada para la producción de quinua sino para la producción de camélidos. En caso de que las condiciones climáticas a futuro reduzcan el riesgo de heladas, la zona sería apta para la producción de quinua bajo riego deficitario.

En base a los resultados de García (2003) y Geerts (2007) sobre los requerimientos de riego deficitario para diferentes estaciones meteorológicas del Altiplano, se aprecia la zonificación de estos requerimientos en años secos, normales y húmedos (Figura No 12). Los requerimientos son indicativos en base a aplicaciones orientadas a garantizar el establecimiento del cultivo (siembra) y a evitar estrés en la época de formación de flor y grano. Los valores mostrados se refieren a la diferenciación de las necesidades mínimas de agua del cultivo durante su ciclo vegetativo. Es necesario mencionar que en todos los casos, se requiere aplicar riego en la siembra en caso de que no se reciba suficiente cantidad de lluvia para garantizar el establecimiento del cultivo. Se sugiere una aplicación total máxima de 50 mm por aplicación, debiendo fraccionarse en caso de suelos con texturas muy livianas. El resto de la lámina sugerida debería tratar de garantizarse en todas las zonas durante los periodos de floración y fructificación, pues son los periodos que reportan mayores reducciones del rendimiento en caso de sequías prolongadas. Si ocurrieran largos periodos sin precipitación durante estos periodos críticos (al menos 20 días), incluso en años húmedos, se sugiere realizar una aplicación suplementaria en todas las zonas. Una vez que se ha garantizado el establecimiento del cultivo en la siembra, es importante evitar la aplicación de riego durante el periodo vegetativo, pues esto produce condiciones favorables para plagas y enfermedades y reduce la fortaleza del cultivo para enfrentar periodos secos.

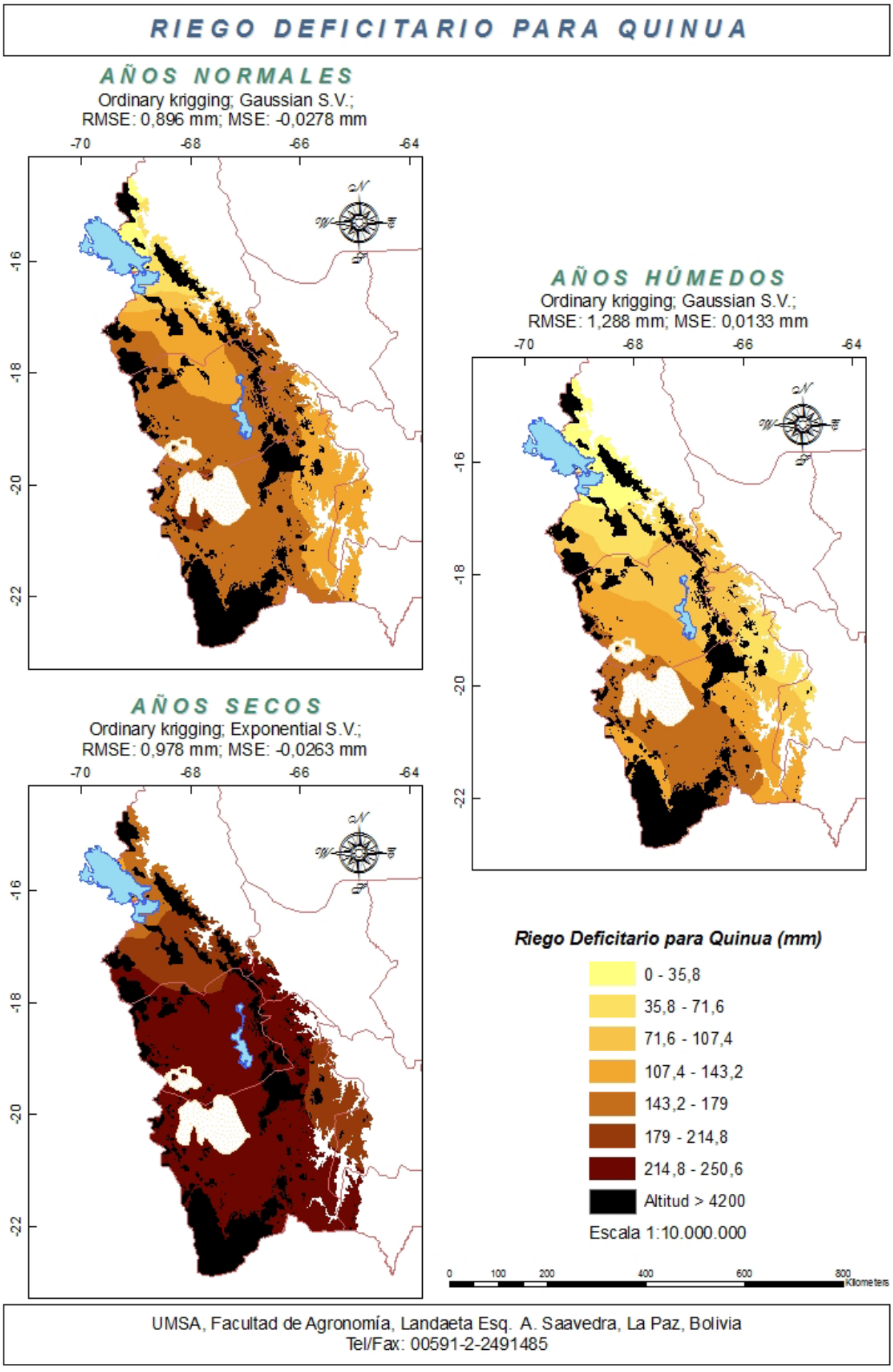


Figura 12. Riego Deficitario para Quinua

5. CAMBIOS PROYECTADOS Y OBSERVADOS EN LA CLIMATOLOGIA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

(Condensado en base a García et al, 2010; Valdivia et al., 2010 y Seth et al., 2010)

La evaluación de los impactos del cambio climático requiere información regional y local que es importante para el desarrollo de planes de adaptación. En el Altiplano Boliviano esta información es especialmente crítica por sus características y la orientación agrícola de su población, pero, al mismo tiempo, una serie de restricciones limitan su análisis. Las proyecciones de cambio climático sugieren cambios mayores que el promedio global a altitudes mayores. La altitud del Altiplano por encima de 3500 metros determina que se podría esperar que los cambios de temperatura sean mayores, afectando fuertemente a los glaciares (Bradley et al., 2006). Esto podría disminuir el almacenamiento natural de agua dulce que es fundamental para la agricultura de altura (Thompson et al., 2003) y plantear una amenaza para la población de la zona que lleva adelante sus actividades agrícolas en dependencia de las lluvias de verano y el agua de deshielo de los glaciares. Como se describió en los capítulos previos, climáticamente la región se caracteriza por ser semi-árida, recibiendo gran parte de su precipitación anual durante el verano austral ubicándose en el margen Sur del sistema monzónico de Sud América y siendo su fuente de humedad la cuenca del Amazonas.

En el altiplano los agricultores han practicado la agricultura por siglos (especialmente de papa y quinua, nativas de la región). La mayor parte de la agricultura que existe hoy en día sigue siendo de secano y bajo prácticas tradicionales (García et al., 2007; Valdivia et al., 1996) y en este marco los cambios en la precipitación podrían mitigar o agravar los problemas de disponibilidad hídrica enfrentados al presente tal como se aprecia en el Capítulo 1. A pesar de la importancia mostrada, la dificultad que engloba su fisiografía única hace que pocos análisis se hayan realizado para comprender el cambio de precipitación y temperatura en la zona.

Al presente se están probando diferentes técnicas para llevar adelante una reducción de escala por técnicas dinámicas para los Andes tropicales (Urrutia y Vuille, 2009) pero estos dependen substancialmente de los Modelos de Proyección General en los que están basados. La información de la proyección del clima, en base al ensamble multi-modelo puede usarse para diseñar políticas de adaptación. Los resultados presentados por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP, por su siglas en ingles) como resultado del Proyecto de Intercomparación de Modelos Conjuntos (CMIP3 por su siglas en ingles) para el escenario A1B del SRES han mostrado, en forma consistente, una reducción de la precipitación durante la estación seca (Junio-Agosto) en el futuro, pero poca consistencia y variaciones pequeñas en la precipitación media durante la temporada de lluvias (Diciembre-Febrero) (Christensen et al. 2007).

Seth et al. (2008) examinaron el ciclo anual del Monzón Sud-Americano en relación a las proyecciones del CMIP3 y confirmaron la variabilidad de los resultados de los modelos para la región amazónica. Vera et al., (2006) y Li et al., (2006) muestran una reducción potencial de la precipitación (Septiembre-Noviembre) en la región

central del monzón situada en el amazonas, asociada a un debilitamiento de la circulación de Walker, cuya respuesta resulta de una troposfera estable, húmeda y cálida (Vecchi y Soden, 2007), estableciendo que se requiere más energía estática de humedad para iniciar la convección en esas condiciones (Lintner y Neelin, 2006). Si bien, dentro de las simulaciones de los modelos climáticos de precipitación en zonas montañosas el problema de la topografía está insuficientemente resuelto y la precipitación no está bien representada, el objetivo del análisis es el de integrar y describir los cambios proyectados en la precipitación en un contexto coherente con las proyecciones de la circulación a gran escala. Si es cierto que el inicio de la formación del monzón Sud-Americano será debilitado, es importante conocer cuál será el efecto de este cambio sobre la precipitación del Altiplano que se encuentra en el margen sur de los monzones y cuál es la proyección de los modelos globales sobre el Altiplano y si esta coincide con lo investigado para el Amazonas.

Por otra parte, el análisis de la información histórica de estaciones climáticas confiables podría dar algunas luces sobre el comportamiento climático reciente y sobre la presencia e impactos del cambio climático en la zona altiplánica. Las percepciones y acciones de los agricultores en respuesta a este cambio también deben ser evaluadas para postular propuestas de acciones para la adaptación de la zona.

5.1. Proyecciones de Cambio Climático en El Altiplano

Para llevar adelante el trabajo de evaluación de cambio climático, se analizó el resultado de diez modelos climáticos de Circulación General del CMIP3: CCSM3, ECHAM5, CSIRO-Mk3, GFDL-CM2.1, GFDL CM2.0, MIROC3.2, CNRM-CM3. PCM, HadCM3, IPSL-CM4.

(http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/modeldocumentation/ipccmodeldocumentation.php) (Meehl et al., 2007). Los modelos fueron seleccionados de la base de datos CMIP3 considerando una resolución horizontal entre media y superior en atmósfera y orografía. Los datos de clima del siglo 20 (en lo sucesivo 20C) y el escenario SRES A2 (en lo sucesivo, A2) del Informe especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en ingles) fueron examinados. A2 describe un mundo con crecimiento económico medio, desarrollo económico y tecnológico lento, y crecimiento poblacional y uso energético elevados, con concentraciones de CO2 incrementándose rápidamente hasta 850 ppm en el año 2100. La selección del escenario más pesimista (A2) se basa en que investigaciones previas han demostrado que los patrones de cambio regional de precipitación son relativamente insensibles a los escenarios (Giorgi y Bi, 2005) y Vera et al. (2006) y al utilizar el escenario A2 y simular un mayor forzamiento, se puede examinar mejor la respuesta de la precipitación.

Los ciclos anuales de precipitación y temperatura se evaluaron usando los datos de la Universidad de Delaware expresados a un nivel de grilla de 0.5° (Willmott and Matsuura, 2009). De este set de datos, se consideró solamente el período 1970-1999 el que fue comparado cualitativamente con observaciones de estaciones de tierra como una verificación de los modelos para el Altiplano (65-70ºW, 15-20ºS). El análisis del clima futuro es realizado calculando las diferencias entre los períodos

2070-2099 y 1970-1999 y normalizando en relación a las desviaciones estándar mensuales del 20C. El análisis estadístico del ensamble de los modelos se representa mediante gráficos (box plots) que muestran los valores mensuales de la mediana, rango intercuartil (IQR) y atípicos. Aunque el ensamble de modelos no puede abarcar todas las posibles respuestas del sistema climático (Allen et al. 2000), los box plots muestran la dispersión en el comportamiento de los modelos y pueden mostrar el grado de incertidumbre.

El análisis de los datos obtenidos para el 20C indica que las observaciones de las estaciones de tierra (líneas azules en la Figura No. 13) muestran el ciclo anual de la temperatura media mensual que oscila entre 10ºC en Diciembre y 4º en Julio. La precipitación de las estaciones de tierra varía entre un máximo de 4 mm/día en Enero y un mínimo de menos de 0.5 mm/día en Julio. La Figura No. 13, también muestra el promedio de las estimaciones de UDEL (líneas horizontales negras) y el resultado de las simulaciones de los nueve modelos utilizados para el 20C (diagrama de cajas) para la región. En la zona especificada del Altiplano, la cuadrícula de UDEL incluye estaciones de menores elevaciones, que producen disparidad entre los dos conjuntos de datos (datos estimados por UDEL y datos de las estaciones de tierra). Los datos de estaciones de tierra se limitan a elevaciones del Altiplano y muestran temperaturas más bajas que las simuladas por los modelos. El sesgo cálido y húmedo es coherente con la relativamente baja resolución de los modelos y su incapacidad para representar a la elevación del Altiplano. A pesar de ello, el buen desempeño del ciclo anual permite utilizar la información para efectos de análisis.

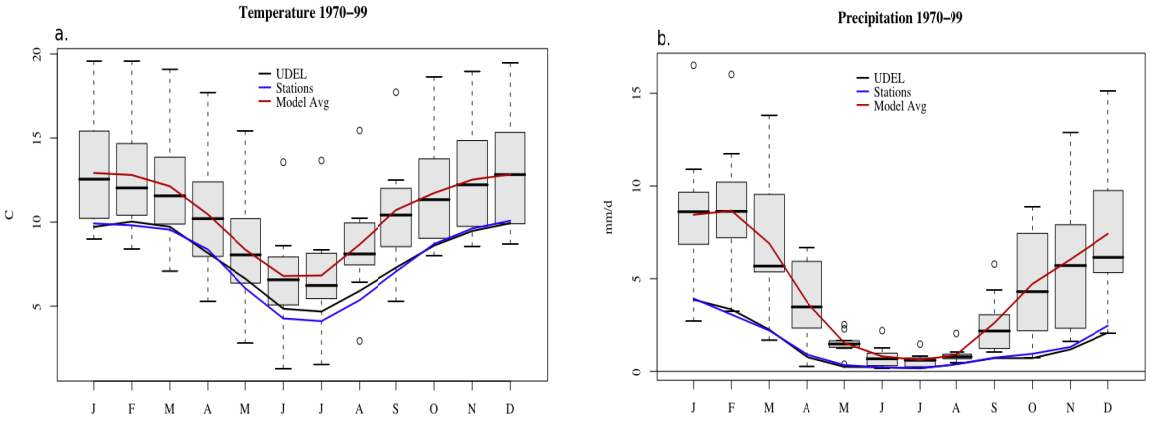


Figura 13. (a) Ciclo Anual de temperatura (°C) para el Altiplano (67-70W,16-19S) mostrando los promedios mensuales de las estaciones de tierra (azul), de los datos de UDEL (negro), promedio multi-modelo (rojo) and 20C distribución multi-modelo (diagrama de caja). (b) Igual pero para precipitación (mm/día) (Seth et al., 2010).

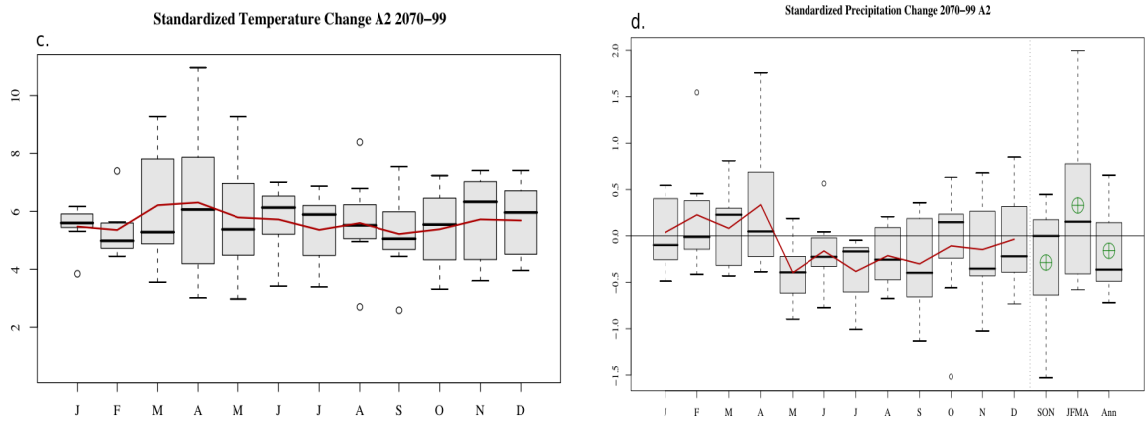


Figura 13. (cont.). c) Diferencias normalizadas mensuales entre 21C-A2 y 20C para el Altiplano del ensamblaje multi-modelo (diagrama de caja) y promedio multi-modelo (rojo). (d) Igual pero para precipitación. Promedios para SON, JFMA y anuales son también presentados con los círculos verdes representando los promedios de los modelos (Adaptado de Thibeault et al., 2009)

Las proyecciones de los modelos concuerdan en que las temperaturas en el Altiplano, tienden a incrementarse a lo largo del ciclo anual con desviaciones de la mediana de alrededor de los 4 °C. Estas proyecciones son consistentes con proyecciones previas para los Andes (Urrutia and Vuille, 2009; and Bradley et al., 2006). La Figura No. 13 demuestra incrementos en la precipitación durante la época de lluvias (Enero-Abril, +8%) y la intensificación de la época seca como se observa de las diferencias de las medianas durante el invierno (Mayo-Julio) con las reducciones persistiendo durante el actual inicio de la época de lluvias (Septiembre-Noviembre, -5%). Los resultados de la precipitación son consistentes con las proyecciones a mayor escala del Monzón Sudamericano (Seth, Rojas, Rauscher, 2009), sin embargo se debe notar que la distribución entre modelos es más grande que los cambios proyectados, lo cual sugiere mucha incertidumbre.

Los cambios proyectados para el ciclo anual de la climatología del siglo 21 y la relación mensual con la latitud se muestran también en la Figura No. 14, para las longitudes 65-70ºW. El ciclo anual climatológico muestra un aumento de las precipitaciones en la primavera (de Septiembre-Noviembre) en el Altiplano (15-201S), con picos de precipitación simulada en verano (Diciembre-Febrero). Entre las latitudes 10-20ºS el escenario A2 normalizado sugiere un descenso en la precipitación durante la primavera (Sep-Nov) justo cuando las primeras lluvias deberían estarse constituyendo. Una vez que se establecen las lluvias, durante la época alta, las lluvias son más abundantes que en el siglo 20 y el aumento persiste hasta Abril. Se percibe nuevamente condiciones secas rápidamente después del final de las lluvias. Esto sugiere que en el siglo 21, la estación de lluvias del Altiplano se demoraría en su inicio para intensificarse cuando las lluvias ya se hayan establecido.

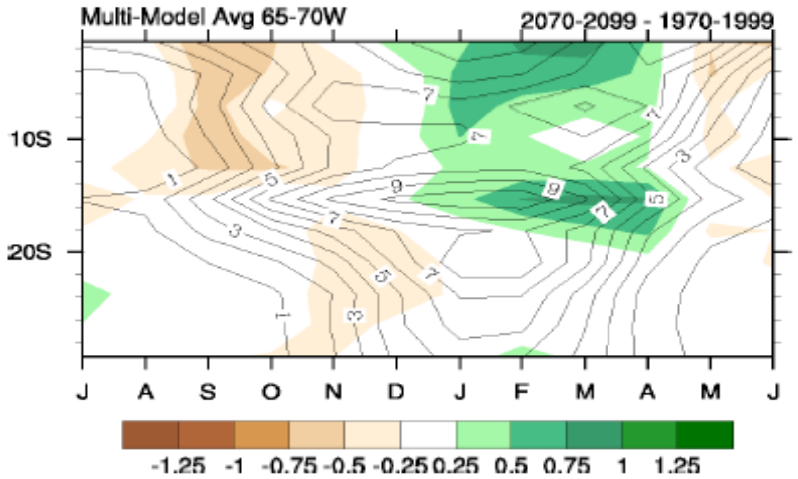


Figura 14. Promedio de la diferencia de la precipitación normalizada del multi-modelo para los periodos 2070-2099 menos 1970-1999 (en colores) y precipitación para el periodo 1970-1999 (curvas negras en intervalo de 1 mm/día, de 1-12) promediada sobre la longitud (65-70ºW), mostrando latitud versus mes.

Con el fin de verificar la evidencia de los cambios proyectados en el ciclo anual de precipitación se analizaron los registros de precipitación mensual desde 1960 de Patacamaya que son presentados en la Figura No. 15 a y b que presentan las series de tiempo de primavera (Septiembre-Noviembre) y verano (Enero-Marzo) con las tendencias lineales en rojo. Las series de tiempo de Viacha y Belen también muestran tendencias negativas en SON y positivas en EFM. Aunque estas tendencias no son definitivas, las direcciones de los cambios apoyan las proyecciones de los modelos de un inicio de estación más seco y mayor recepción de precipitación en la época más lluviosa.

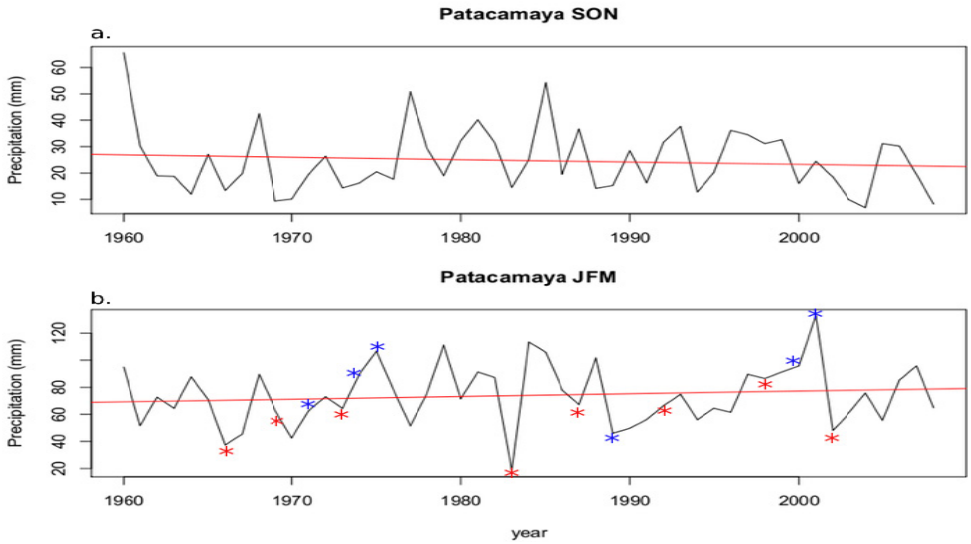


Figura 15. Series de tiempo observadas para 1960-2008 de Patacamaya para (a) SON y (b) EFM de precipitación (mm) mostrando las tendencias lineales (líneas rojas). También en (b) se muestran los años de presencia de anomalías de la temperatura superficial del mar por encima de 1°C (El Niño, estrellas rojas) y bajo -1°C (La Niña, estrellas azules).

Los resultados aquí presentados sugieren que, si bien los modelos muestran un sesgo cálido y húmedo en el Altiplano, la dinámica del ciclo anual es bien simulada. Los cambios en precipitación en el Altiplano, proyectados por los modelos parecen ser poco significativos en la media anual, pero con un posible cambio en la distribución estacional de precipitación. La estación de lluvias parece retrasarse pero también ser más intensa, con un largo periodo seco y un debilitamiento de la época de lluvias a principios de temporada. Aunque la incertidumbre es notoria, también se aprecia congruencia con los cambios proyectados a mayor escala. Adaptando el mecanismo propuesto por Seth, Rojas and Rauscher (2009), y considerando los cambios esperados en la circulación global, se puede explicar este retraso de la siguiente forma:

1. El aumento de las temperaturas en invierno provoca mayor evapotranspiración y secado de la superficie.
2. Como la recepción de radiación solar aumenta en la primavera y hay menor humedad en la atmósfera, la constitución de energía estática húmeda necesaria para iniciar la convección (Garreaud et al., 2009) demora en ocurrir (Lintner y Neelin, 2006).
3. El debilitamiento de la circulación tropical de los vientos alisios (aumento de la estabilidad) además inhibe el desarrollo de convección (Vecchi y Soden, 2007) en primavera.
4. Una vez que el umbral de la energía estática húmeda se logra, ya en verano, el contenido de humedad atmosférica es elevado, generando las condiciones para precipitaciones más intensas.
5. Cuando el monzón Sud-Americano se retira siguiendo la radiación solar, las temperaturas todavía elevadas incrementan la evapotranspiración y secan rápidamente los suelos produciendo una estación seca más intensa.

Aunque tentativa, la explicación propuesta es coherente con el análisis del monzón Sud-Americano propuesto por Seth et al. (2008) que sugiere el aumento de precipitación durante la época de lluvias y la disminución en el inicio de la época de lluvias en la región central monzónica. La coherencia implica que en estas zonas estacionalmente secas (el altiplano y las regiones del Monzón) la transición de la época seca a la húmeda puede demorar más, mientras que la transición inversa (de húmeda a seca) sería más rápida. Es interesante notar también que, desde 1991, el mayor balance negativo de masa del glaciar Chacaltaya, se ha producido durante los meses de Octubre-Diciembre (mucha radiación, menor precipitación) (Vuille et al., 2008).

5.2. Análisis de Eventos Extremos

Con el fin de evaluar la evolución de eventos extremos en el área (Thibeault et al., 2009), se analizó la información diaria tanto en el siglo 20 como la simulada por los modelos nombrados anteriormente. Este análisis incluye cuatro índices anuales: dos

derivados de la Temperatura Mínima (Días con heladas[3] y noches cálidas[4]) y dos de la precipitación diaria (Días consecutivos sin lluvia[5] y precipitación mayor al 95 % del percentil[6]) (Frich et al., 2002, Alexander et al., 2006). Los índices térmicos extremos fueron calculados para El Alto utilizando el resumen diario de la temperatura superficial del Centro de Datos Climáticos de Estados Unidos (NCDC). Los extremos de precipitación de Patacamaya (1951-1999) fueron provistos por el Equipo de Expertos de CCl/CLIVAR/JCOMM para la detección de cambio climático (ETCCDI). Los datos de extremos climáticos se encuentran disponibles en http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/data.shtml. Aunque no es posible llevar adelante mediciones comparativas directas entre los índices de extremos climáticos de estaciones de tierra y los mismos índices calculados por los modelos debido a su diferencia conceptual (Chen and Knutson, 2008; Alexander et al., 2006), el análisis de sus tendencias sirve como referencia acerca de las tendencias de los eventos extremos.

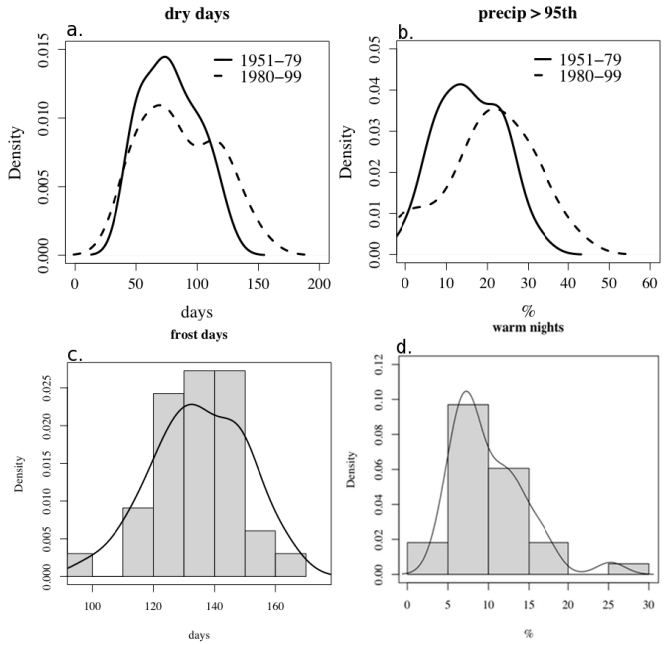


Figura 16. Función de distribución de probabilidad de indices extremos computados para la distribución de la precipitación diaria para 1951-1979 (línea sólida) y 1980-1999 (línea punteada para a) días sin lluvia (dry days) b) precip>95% y de las temperaturas mínimas de El Alto para 1973-2007 para c) días con helada (frost days) y d) noches cálidas (warm nights) (Adaptado de Thibeault et al., 2009)

Las funciones de distribución de probabilidad (PDF) de los índices extremos en Patacamaya de los eventos de precipitación se analizaron en dos periodos (1951-1979 y 1980-1999). Los índices indican cambios incrementales tanto en la variable *días sin lluvia* (Figura No. 16 a) como en la *precip>95%* (Figura No. 16 b) desde mediados hasta el final del siglo 20, confirmando estudios previos de Haylock et al., (2006). Los índices térmicos de El Alto se presentan en la Figura No. 16, c y d. Se

[3] Número total de días con temperatura mínima < 0°C
[4] Porcentaje del tiempo en un año en que la Tmin> percentil 90imo de temperatura para una fecha particular
[5] Máximo número de días consecutivos sin lluvia o con lluvia <0mm
[6] Fracción de la precipitación anual en que los eventos son mayores al percentil 95

han encontrado también tendencias de incremento en las *noches cálidas* con el efecto opuesto en los *días con helada*.

Pasando a las proyecciones para el siglo 21, aunque el ensamblaje de los resultados de los modelos no muestran cambios de magnitud en la distribución de los *días sin lluvia* en el periodo reciente (1940-1969 y 1970-1999), se puede observar que los periodos de *días sin lluvia* en 2020-2049 y más en 2070-2099 se incrementan sostenidamente (Figura No. 17 a). En forma similar las distribuciones de los datos proyectados de la *precip>95%* para el 2020-2049 muestran una tendencia al incremento con mayor efecto para el final del siglo 21, aunque los cambios entre mediados y finales del siglo 20 no se perciben significativos (Figura No. 17 b). Si se compara con datos observados de estaciones de tierra, en este caso con Patacamaya, se observa similar tendencia a la proyectada por los modelos.

La distribución de los *días con helada* (Figura No. 17 c) muestra una tendencia sostenida a la reducción desde el siglo 20 pero con mayor significancia para los valores previstos para el siglo 21, mostrando que los días con helada irán reduciendo significativamente hacia el final del siglo 21. Las *noches cálidas* en el siglo 21 se incrementan pero con mayor dispersión y variabilidad para el final del siglo 21 (Figura No. 17 d). Tanto la reducción de los *días con helada* como el incremento de *noches cálidas*, están en concordancia con reportes de percepciones de los agricultores acerca de las nuevas condiciones climáticas del altiplano, aunque los *días con helada* están levemente subestimados. También se aprecia que los rangos de los eventos de *días con helada* y *noches cálidas* proyectados para el siglo 21, se encuentran fuera de los rangos de variabilidad del siglo 21, lo que sugiere cambios significativos en la climatología de eventos extremos térmicos.

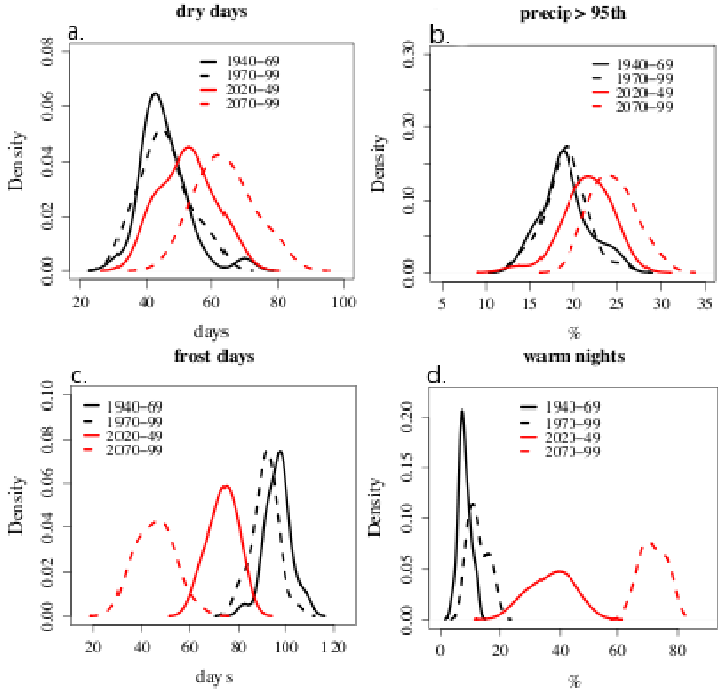


Figura 17. Índices extremos calculados del ensamblaje multi-modelo para los periodos mostrados en los gráficos para el escenario A2 para a) días sin lluvia (dry days) b) precip >95%, c) días con heladas (frost days) y d) noches cálidas (warm nights) (Adaptado de Thibeault et al., 2009a)

Los cambios proyectados de los eventos extremos de precipitación para el siglo 21 sugieren cambios menores que los proyectados para la temperatura. Los rangos de los cambios de frecuencia de los extremos de precipitación para el siglo 21 coinciden con los del siglo 20, aunque la media del siglo 21 se ubica en el extremo de la distribución del siglo 20.

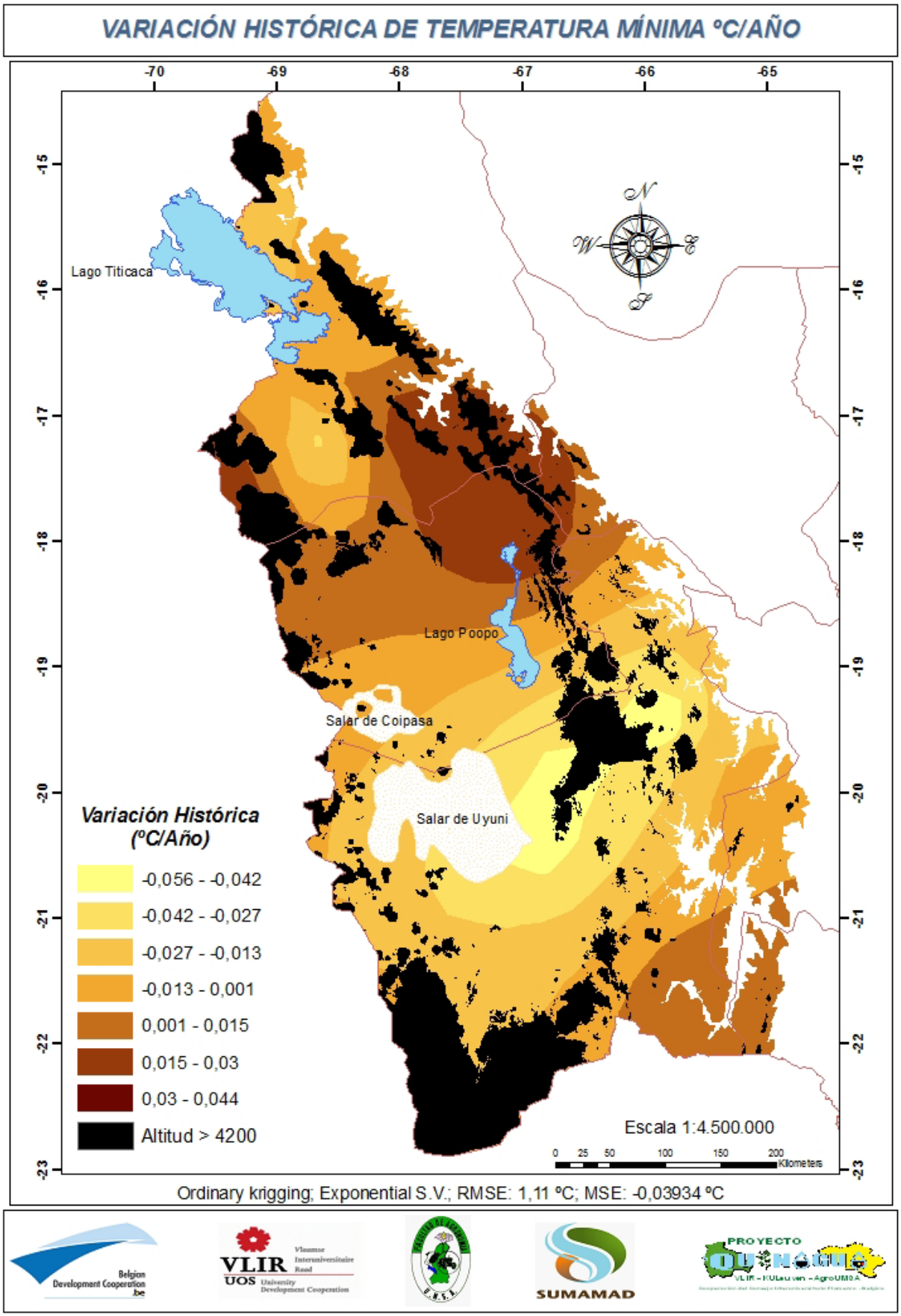
Los cambios proyectados en los índices térmicos y de precipitación tienen coherencia y consistencia con los cambios proyectados en el ciclo anual con una extensión de la estación seca y elevación general de la temperatura.

5.3. Tendencias Históricas de Cambio

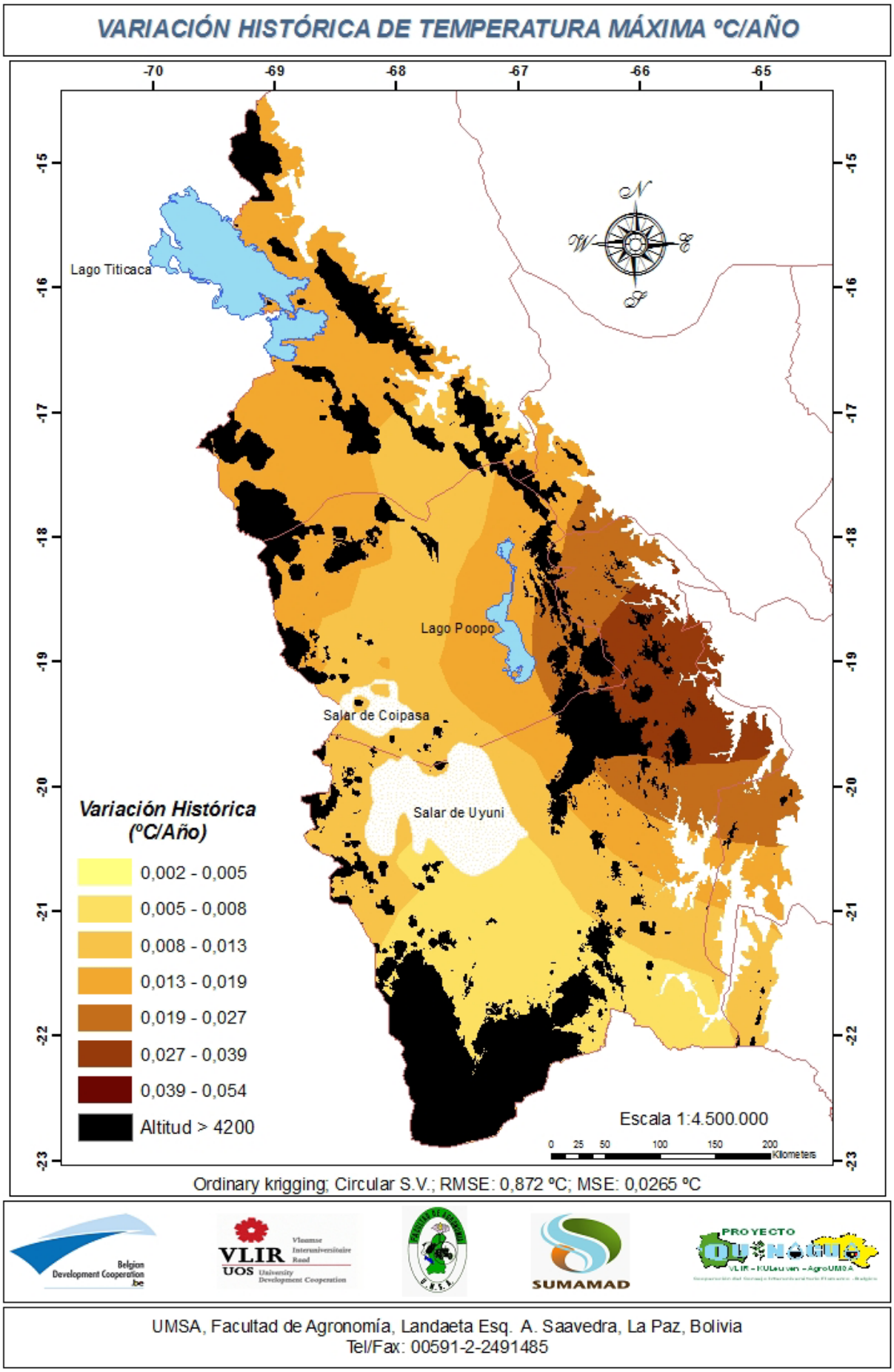
Para analizar las tendencias de cambio de temperatura y precipitación en el Altiplano, se requería trabajar con bases de datos de registros históricos cuyo control de calidad era necesario. Para llevar adelante este trabajo, se seleccionaron las estaciones establecidas en el Cuadro No. 1 y marcadas con asterisco (*) y dentro de ellas, se analizó los valores de Temperatura Máxima, Mínima y Precipitación diaria. Estas estaciones cumplían el requisito de contar con al menos 20 años de información y tenían menos de 10 % de datos faltantes. Con los datos de temperatura se calcularon los valores de Evapotranspiración de Referencia anual aplicando la metodología propuesta por Allen et al., (2006) y se calculó el Déficit Hídrico para la zona. Posteriormente se analizo la existencia de tendencias de cambio aplicando el Test de Mann–Kendall. Los mapas observados fueron relacionados con percepciones de los agricultores determinadas en varias comunidades del Altiplano.

El Mapa 18 presenta la variación detectada en la temperatura mínima anual para las estaciones analizadas, mientras que el Mapa 19 muestra la misma variación pero para las Temperaturas máximas. En el caso de la Temperatura mínima media anual, se observan ciertas consistencias geográficas en el incremento o descenso de sus valores. En general las zonas circunlacustres y del Altiplano Sudoeste, muestran tendencia al descenso, mientras que una elevación significativa de las temperaturas es identificada en el Altiplano Central y parte del Norte. En contraste, las temperaturas máximas muestran un patrón más homogéneo de calentamiento, aunque con menor significancia estadística y menores valores de variación. Desde un punto de vista energético, la variación de la Temperatura Mínima es el reflejo de la concentración de gases de efecto invernadero que reducen la emisión de Radiación Terrestre. De esta manera el incremento especialmente de la Temperatura Mínima, podría estar ligado al efecto del calentamiento global. Inversamente, en las zonas que se percibe un descenso de la Mínima, este comportamiento podría estar ligado a la humedad atmosférica, pues su disminución, corresponde a un aumento del déficit radiativo nocturno por una disminución de la radiación atmosférica y una disminución del aporte de energía por condensación del vapor de agua. En otras palabras, un descenso sostenido de la temperatura mínima, mostraría también un descenso sostenido de la humedad atmosférica de la zona que puede asociarse con la desertificación. Esta última podría deberse, en el caso del Altiplano, a problemas de manejo local, avance indiscriminado de la frontera agrícola u otras acciones negativas para el ecosistema.

La disgregación de los valores presentados en los Mapas 18 y 19 en variaciones estacionales (Figura No. 18 y 19) muestra que en el caso de las Temperaturas Mínimas, las variaciones son mayores en invierno que en verano (mayores enfriamientos o mayores calentamientos) aunque no se ha encontrado significancia estadística en esta diferencia, por lo que los valores son solamente referenciales. Las Temperaturas Máximas, en cambio, muestran mayor similitud estacional en sus tasas de cambio.



Mapa 18. Variación Histórica de Temperatura Mínima



Mapa 19. Variación Histórica de Temperatura Mínima

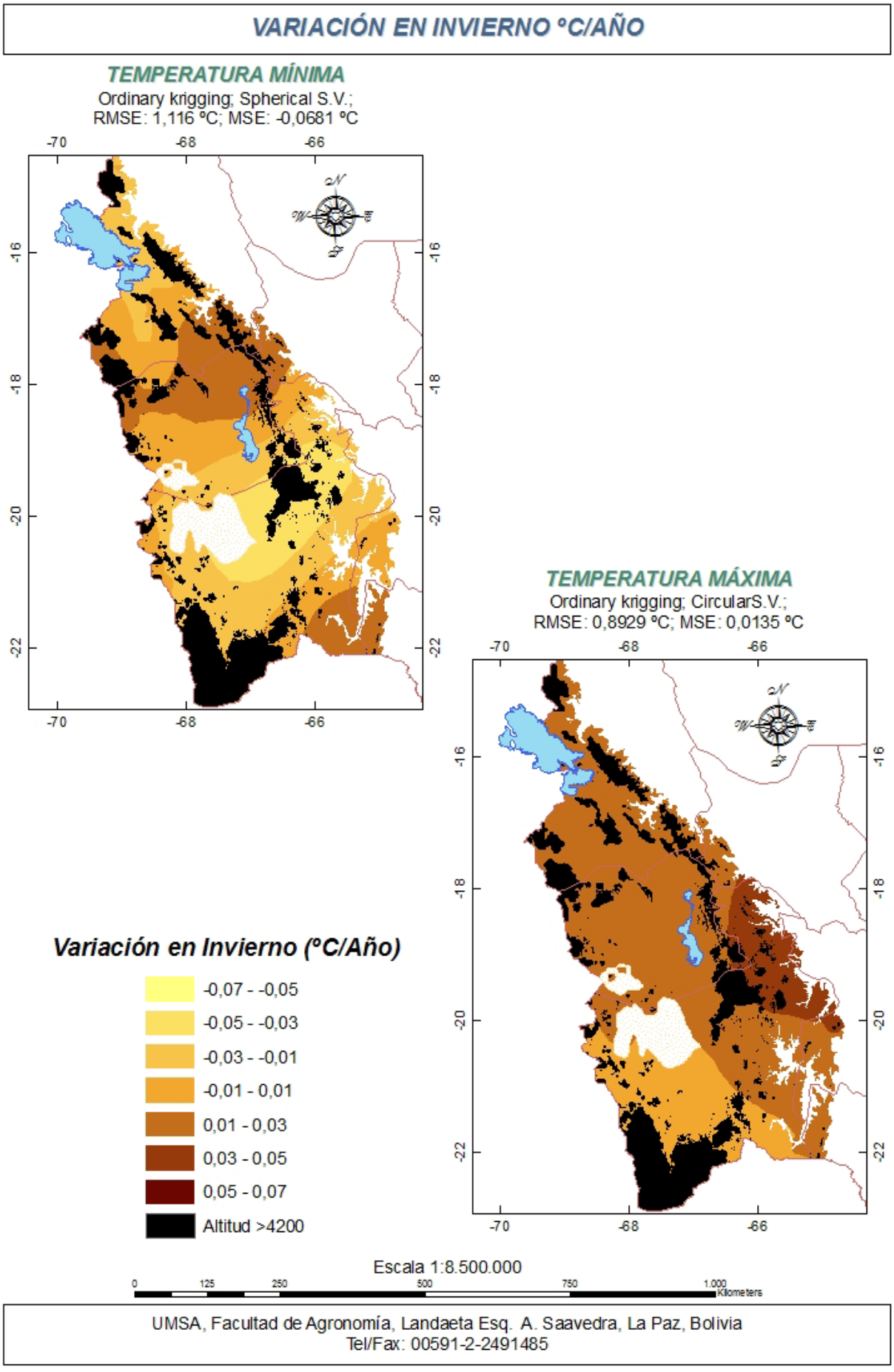


Figura 18. Variación en Invierno

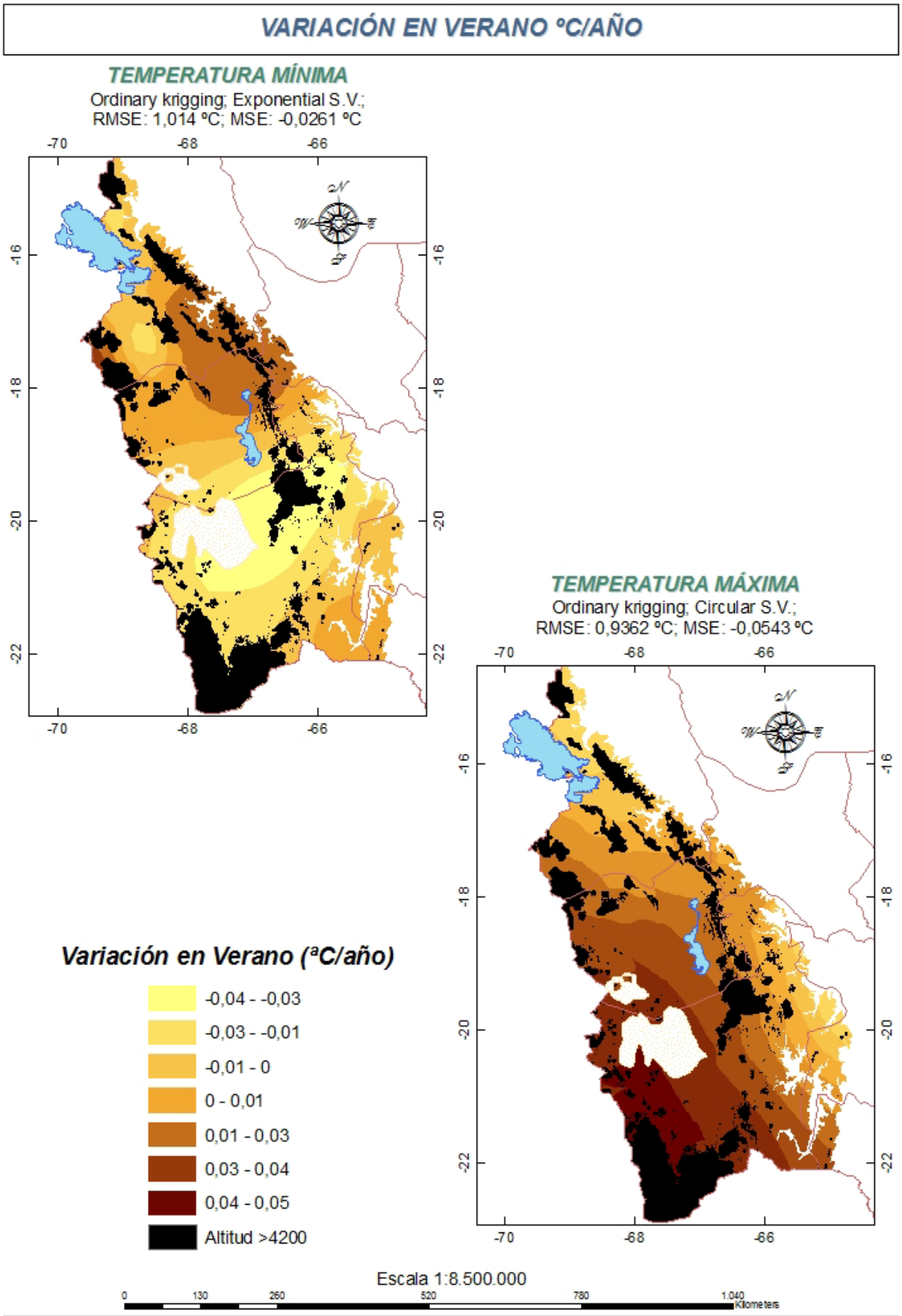
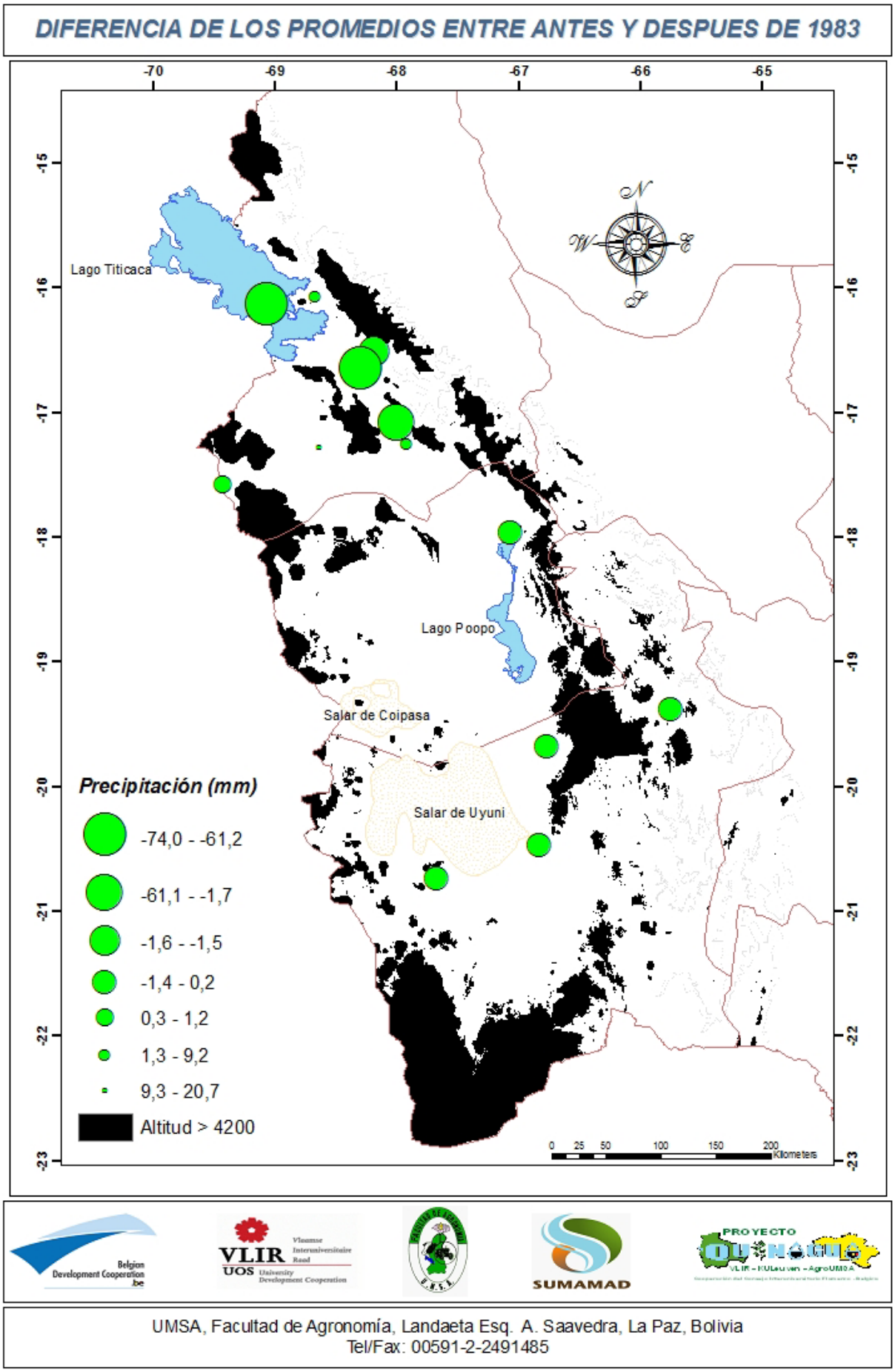


Figura 19. Variación en Verano

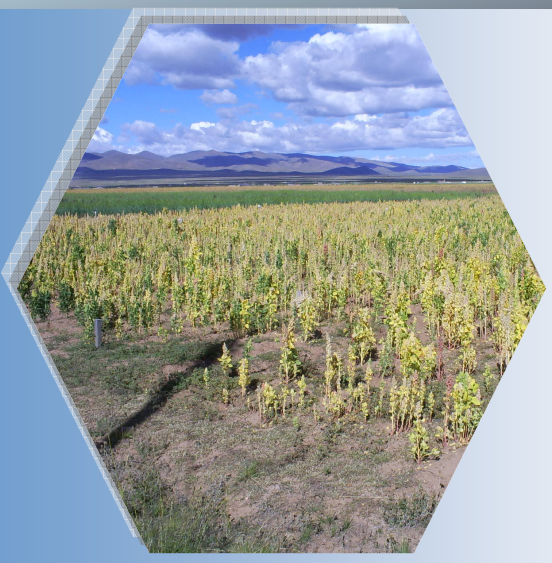
En el caso de la precipitación (Mapa 20), ésta presenta un patrón homogéneo de reducida variación que no es significativa estadísticamente. Solamente las estaciones de Copacabana y Viacha han mostrado tendencias significativas de reducción de precipitación. Sin embargo, en este análisis no se consideran los cambios del ciclo anual de la precipitación ni su concentración que podrían no estar reflejados en las tendencias mostradas en el Mapa No. 20.

5.4. Conclusiones

La información presentada en este documento puede ser utilizada para trabajos de caracterización, planificación o consulta. Las limitaciones propias del Altiplano Boliviano, pueden ser exacerbadas bajo escenarios de cambio climático, siendo que factores limitantes tales como un tardío inicio de la época de lluvias determinará una urgente necesidad de sistemas de riego complementario o el fracaso del año agrícola en zonas del Altiplano Central y Sud especialmente. Si las proyecciones de extremos se cumplen, el trabajo agrícola requerirá de mayor atención desde un punto de vista de políticas y líneas de investigación dinámicas que puedan responder a un clima cada vez más variable. Por ello es necesario que los entes de trabajo agroclimático, enfoquen nuevas acciones creativas para reaccionar ante los posibles eventos tanto agudos como crónicos que puedan traer un clima diferente para la zona. Es claro que los agricultores del Altiplano Boliviano, han iniciado y establecido estrategias de adaptación al cambio climático en forma reactiva ante las nuevas condiciones que se están presentando, especialmente de incremento de temperatura. Estas acciones provocarán el incremento de necesidades de riego conjuntamente con las nuevas situaciones de concentración de lluvia e incremento de temperaturas. Las proyecciones basadas sólo en objetivos de desarrollo establecidos en la última década podrían ser pocas en relación a los requerimientos crecientes de agua, llevando al conflicto por el uso de agua.



Mapa 20. Diferencia de los Promedios entre antes y después de 1983

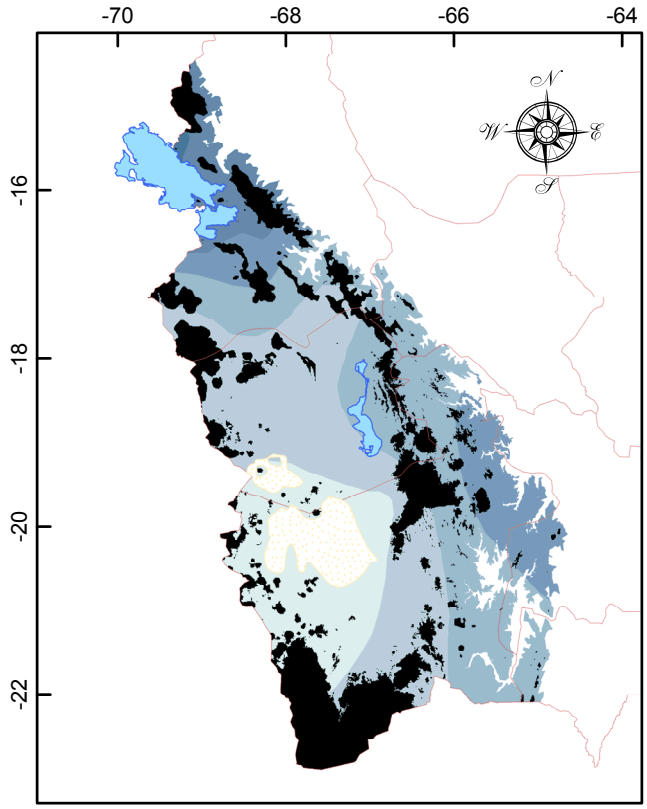


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
Héroes del Acre (Ex - Asilo San Ramón)
Telefs.: (592-2) - 2481477 - 2491558 - Fax 2484835
Casilla 930 - email:agrdec@umsanet.edu.bo
La Paz - Bolivia

PRECIPITACIÓN OCT - DIC

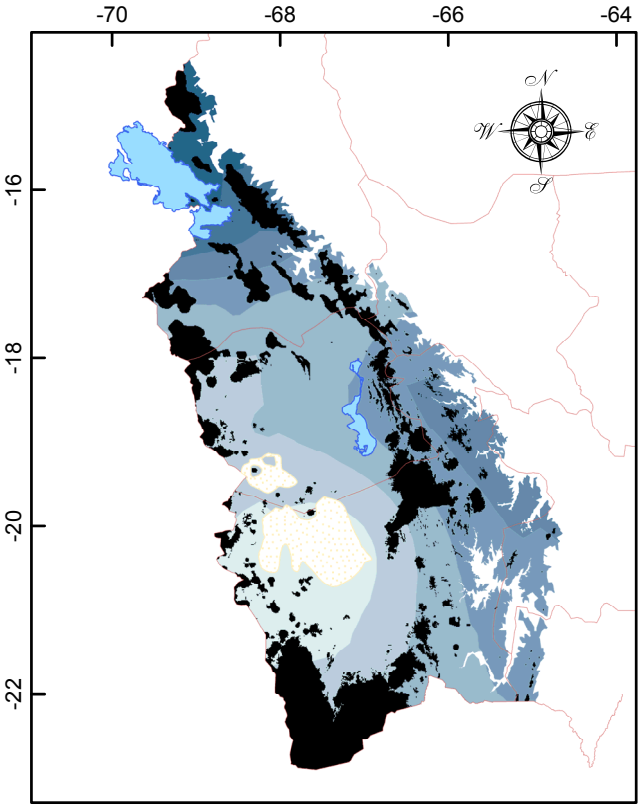
AÑOS NORMALES

Ordinary krigging; Spherical S.V.;
RMSE: 0,9132 mm; MSE: -0,0043 mm



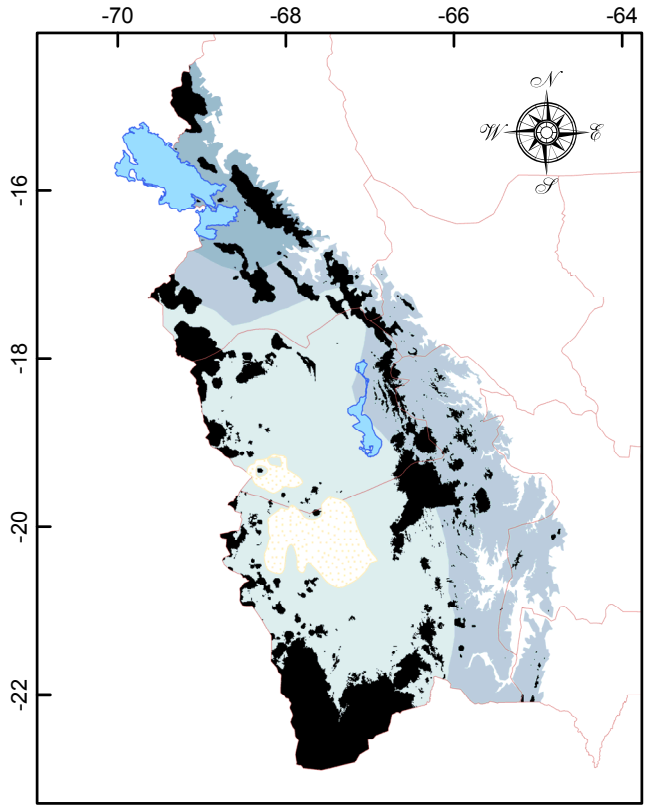
AÑOS HÚMEDOS

Ordinary krigging; Gaussian S.V.;
RMSE: 0,7943 mm; MSE: -0,0336 mm



AÑOS SECOS

Ordinary krigging; Gaussian S.V.;
RMSE: 0,8544 mm; MSE: -0,0279 mm



Precipitación (mm)

- 0,5 - 43,5
- 43,5 - 86,5
- 86,5 - 129,5
- 129,5 - 172,5
- 172,5 - 215,5
- 215,5 - 258,5
- 258,5 - 301,5
- Altitud > 4200

Escala 1:10.000.000

0 100 200 400 600 800 Kilometers

UMSA, Facultad de Agronomía, Landaeta Esq. A. Saavedra, La Paz, Bolivia
Tel/Fax: 00591-2-2491485