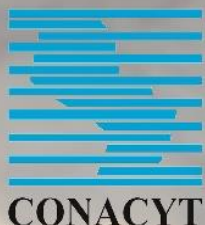


Caracterización y análisis de las forzantes atmosféricas para un periodo de sequías en el Paraguay

RICARDO R. PEREIRA G.



Caracterización y Análisis de las Forzantes Atmosféricas para un Periodo de Sequías en el Paraguay

Investigación para el Desarrollo

Julio del 2016

www.proyectoclima.com.py

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACYT

Programa Paraguayo para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología – PROCENCIA

Proyecto de iniciación científica: 14-INV-341

Asesor del proyecto: Max Patén

Tesista: Ricardo René Pereira Gavilán

Asesor Informático: Alcides Domínguez

Investigación para el Desarrollo

Presidente Cesar Cabello

Director Ejecutivo Bruno Osmar Martínez

Gerente de proyectos: Karina Godoy

Directora de Área: Rossana Scribano

Agradecimientos

Quiero agradecer a las instituciones que hicieron posible realizar este trabajo;
Prociencia; Programa Paraguay para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología del Conacyt
Investigación para el Desarrollo; que me abrió sus puertas y me permitió desarrollar mi tesis.
Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección de Aeronáutica Civil; que me facilitó todos los datos meteorológicos históricos que fueron el insumo para la realización de este trabajo.
Facultad Politécnica; fue la institución donde me formé como profesional de las Ciencias de la Atmósfera.
Al Centro de Previsión y Estudios Climáticos (CPTEC) y al Servicio Meteorológico Argentino (SMN); que me han abierto sus puertas para el aprendizaje de nuevas técnicas y metodologías que me ayudaron a llegar a los resultados de este trabajo
A todos mis profesores quienes me han enseñado e inculcado el amor hacia las ciencias de la atmósfera y el medio ambiente.

Indice

1. Introducción

1.1. Importancia del tema.....	7
1.2. Justificación.....	9
1.3. Antecedentes.....	10
1.4. Objetivos.....	11

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Circulación General de la Atmósfera.....	11
2.2. Características de la Circulación Atmosférica en Sudamérica.....	15
2.3. Jet de Capas Bajas en Sudamérica.....	17
2.4. La Alta de Bolivia.....	19
2.5. Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS).....	20
2.6. Régimen de lluvias en Paraguay.....	22
2.7. Sequías.....	24
2.7.1. Riesgo de sequía.....	26
2.7.2. Tipos de Sequías.....	27
2.7.3. Consecuencias.....	27
2.8. Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	28

3. Metodología

3.1. Tipo de estudio	35
3.2. Datos.....	35
3.2.1. Datos en Superficie.....	35
3.2.2. Datos Grillados.....	35
3.3. Determinación de eventos de sequía.....	38
3.3.1. Evento de sequía 1976-1978.....	39
3.3.2. Evento de sequía 2008-2009.....	42

3.3.1. Evento de sequía 2011-2012.....	44
3.4. SPI Areal.....	47
4. Resultados	
4.1. Análisis del evento de sequía ocurrido entre 1976-1978.....	51
4.1.1. Nivel de 850hPa.....	51
4.1.2. Nivel de 700hPa.....	58
4.1.3. Nivel de 500hPa.....	63
4.1.4. Nivel de 250hPa.....	68
4.2. Análisis del evento de sequía ocurrido entre 2008-2009.....	71
4.2.1. Nivel de 850hPa.....	71
4.2.2. Nivel de 700hPa.....	75
4.2.3. Nivel de 500hPa.....	78
5. Conclusiones.....	80
6. Bibliografía.....	82
7. Anexos.....	84

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del tema

A nivel global, los fenómenos como la sequía, heladas o las inundaciones son objetos de estudio por parte de científicos e investigadores, ya que se han convertido en un problema mayor para las grandes industrias y los gobiernos de todo el mundo. Los estudios han llevado a encontrar ciertas características básicas de los periodos de sequías, como la falta de precipitación por largos periodos de tiempo, o la escasez de agua en una región por la falta de abastecimiento hidrológico. En simples palabras, la sequía en una región está asociada a la falta, escasez o ausencia de agua en cualquiera de sus estados.

Estos eventos son elementos importante a considerar en la planificación a mediano y largo plazos para el crecimiento económico. Es importante desarrollar herramientas objetivas que ayuden a manejar mejor estas situaciones para disminuir el impacto negativo en la población.

Identificar eventos de sequía cuando se ha establecido o ya afectó a una región, hoy en día ya no es suficiente. Tanto la agricultura como la ganadería, y también los sectores sociales, necesitan estar prevenidos mucho antes para la planificación de acciones de prevención y mitigación ante estos eventos. La intensidad de la sequía desde el punto de vista meteorológico, esta dada por el tiempo y déficit de agua (según un valor normal), que puede tener una región; sin embargo, desde un punto de vista socioeconómico, la intensidad podría estar asociada al consumo de agua de una zona, tanto para las personas, para la industrias, como para el uso en la agricultura y ganadería. Esto quiere decir, que se debe diferenciar y definir bien cuando se refiera a la intensidad de un evento de sequía, ya que mientras desde el punto de vista meteorológico podría ser intenso, no necesariamente lo sea desde el punto de vista socioeconómico, o viceversa. Esto dependerá de la zona afectada por el evento. De ahí la importancia de caracterizar la sequía espacial y temporalmente.

La utilización de índices de sequía como el SPI (Estándar Precipitation Index) es de suma importancia para el estudio de estos eventos. Por su facilidad en el cálculo y su sencillez con la cantidad de variables que necesita (solo usa datos de precipitación), es posible identificar eventos secos a lo largo de una serie histórica, y una vez identificados, aplicar metodologías para el análisis sinóptico. Encontrar una circulación característica

que se encuentre presente en cada evento de sequía estudiado, determinará los patrones que deben considerar los meteorólogos cuando hacen sus pronósticos.

La sequía es uno de los eventos climatológicos más dañinos a nivel global. Su influencia negativa afecta a varias áreas en la vida del hombre. Por ejemplo:

Económico

- Grandes pérdidas en la exportación de granos de producción local.
- Falta de alimentos para el ganado. La muerte del ganado ocasiona pérdidas económicas enormes.
- Perdidas para el Estado, ya que éste debe subsidiar los gastos a los agricultores y ganaderos.

Social

- El déficit en la producción de granos afecta también al consumo humano.
- La falta de agua para abastecer la demanda genera diversos problemas en la sociedad.

Ambiental

- Una sequía extrema puede llevar a una región a la aridez, lo que perjudica enormemente a la fauna y flora de la región.
- Una sequía prolongada puede afectar a los recursos hídricos de una región, bajando los niveles de ríos, arroyos y afluentes; incluso, en algunos casos secándolos.

Hasta ahora en el Paraguay, se han determinado los eventos de sequía por su impacto social y ambiental, cuando sus efectos negativos ya han sido observados. No se ha aplicado una manera objetiva para prever estos eventos de tal manera a mitigar sus efectos sobre la sociedad. Son pocos los trabajos de investigación sobre sequías en el Paraguay, incluso en la región. Las investigaciones más avanzadas se tienen en Brasil y Argentina, utilizando diversas metodologías experimentadas a nivel mundial. Sería interesante encontrar una metodología práctica y eficiente para identificar estos eventos, y luego analizar las configuraciones en la circulación general en varios niveles de la atmósfera que propicien la ocurrencia de estos eventos. Si se encontrara esto, sería de mucha importancia para la predicción de sequías en nuestro país.

La metodología adoptada se basa en el Índice Estandarizado de Precipitación o SPI por sus siglas en inglés (Stándar Precipitation Index) para hallar los eventos secos y húmedos en el periodo de 1961 a 2014. Luego se analiza desde el punto de vista sinóptico, algunos eventos de sequía, como ejemplos de la metodología utilizada para encontrar los patrones característicos en la dinámica atmosférica.

1.2 Justificación

La ocurrencia de precipitaciones en una región determinada depende en especial de la disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera, el cual por medio de diferentes procesos físicos y ciertas condiciones se transforma en hidrometeoros. La circulación atmosférica es la encargada de distribuir el vapor de agua a diferentes regiones desde las fuentes a los sumideros. Virji (1981) describió las principales características de la circulación atmosférica sobre Sudamérica para los meses de verano, encontrando en la tropósfera superior un intenso anticiclón conocido como la Alta de Bolivia. Wang y Paegle (1996) estudiaron al Jet de Capas Bajas (JCB) y la importancia que desempeña para el transporte de humedad desde el Amazonas hacia latitudes mayores. Nogués-Paegle y Mo (1997) estudiaron la evolución de períodos secos a húmedos en la región sur de Brasil y norte de la Argentina y la relación con la corriente en chorro en capas bajas durante el verano y la ZCAS (Zona de Convergencia del Atlántico Sur). Es decir, eventos de fuerte (débil) actividad convectiva sobre la ZCAS en los meses de verano, están asociadas a déficit (exceso) de precipitación sobre el sur de Brasil, gran parte de Paraguay, Uruguay y nordeste de Argentina (Doyle – Barros et al. 2000).

Cuando la cantidad de agua disponible en una región no abastece lo requerido ya sea por plantas, animales, uso humano o para el mismo suelo; entonces, podemos definir esta anomalía como sequía. La sequía meteorológica es aquella donde ocurre un periodo prolongado con menos precipitación que la media estadística y suele preceder a otras formas de sequía como la hidrológica, en donde las reservas de agua disponibles en bancos de agua como ríos, lagos, acuíferos etc. caen también por debajo de la media. Cuando este fenómeno se intensifica por largos periodos, en casos extremos se puede llegar a la aridez.

Este trabajo tiene como principal objetivo caracterizar los eventos de sequía en el Paraguay, incluso en la región, para que en un futuro próximo sirva a los meteorólogos, como herramienta para la predicción a corto y largo plazos de dichos eventos, y así lograr mitigar los efectos negativos en los sectores que suelen ser más perjudicados.

1.3 Antecedentes

La economía de nuestro país está fuertemente influenciada por los sectores ganaderos y agrícolas, y éstos a su vez dependen de la situación climática en la región. Es bien sabido que la variabilidad climática puede producir eventos extremos que traen consigo grandes problemas para estos dos sectores, motores de la economía paraguaya.

El fenómeno de la sequía tiene como principal factor a la precipitación (variable a lo largo del año, pero manteniendo una media anual casi constante), que controla la formación y la persistencia de las condiciones de la sequía y determina junto con la temperatura zonas climáticas. Cuando se hace un análisis del impacto de la sequía a lo largo de las estaciones del año se puede asegurar según la percepción de las personas, que las sequías más importantes, ocurren en la estación de verano. No obstante, la escasez de agua durante otras estaciones del año también representa un problema en la calidad de vida de las personas.

Este fenómeno repercute negativamente en la producción agrícola y ganadera en nuestro país. Hay áreas del territorio paraguayo, tanto rurales como urbanas, más vulnerables a este fenómeno, donde los impactos sociales, ambientales y productivos agrícola-ganaderos son más graves. Además, tanto las sequías como las inundaciones afectan el transporte fluvial y las comunicaciones (Lic. Mirtha Ovelar, Diario ABC 04/09/2012). La sequía afectó entre 40% y 60 % de la producción agrícola según la zona y los rubros en el periodo cálido 2008-2009. El maíz fue el más afectado pues se estimó la caída de la producción de hasta de 80%. Los empresarios aseguran que la sequía y la bajante del río Paraguay causaron pérdidas de alrededor de 400 millones de dólares, solamente en fletes de barcos para ese periodo (Diario ABC 24/03/2009). Existen algunos estudios sobre caracterización y monitorización de sequías en la región desde el punto de vista agro meteorológico y de la variabilidad climática; pero, no hay uno que analice este fenómeno específicamente en el Paraguay.

En ese sentido, las sequías son eventos extremos muy perjudiciales a nivel socioeconómico, ya que pueden determinar el crecimiento económico del país. La falta de agua disponible para el consumo humano, como también para el consumo agrícola provoca que la producción de semillas como también las plantaciones disminuya en cantidad y calidad. Para el sector ganadero, la mortandad de cabezas de ganado imposibilita la exportación de carne a otros países, como también para el consumo local.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Determinar las forzantes atmosféricas que producen un periodo de sequía en nuestro país de tal forma a caracterizarlas en su longitud temporal y espacial, como así también su intensidad desde el punto de vista meteorológico y socio-económico.

1.4.2 Específicos

- Obtener y procesar todos los datos obtenidos de las variables atmosféricas de la región para su posterior análisis..
- Caracterizar a las sequias en la región, a partir de los datos disponibles.
- Encontrar la relación entre estos eventos y algunos índices como el SPEI, NAO y otros eventos como El Niño, La Niña y las ZCAS.
- Explicar cómo estas forzantes actúan sobre la región para determinar un periodo de sequias y como esta impacta en los diferentes sectores.
- Crear un informe sobre las conclusiones que hemos llegado al finalizar este proyecto.

2. Revisión Bibliográfica

2.1 Circulación General de la Atmósfera

La atmósfera es un fluido en constante movimiento, compuesta de varios gases en cantidades desiguales que van disminuyendo o aumentado según la altura. El dinamismo de la atmósfera se debe a varios factores, pero el causante principal de este movimiento es el calentamiento desigual de la superficie de la Tierra. Como la Tierra es de forma casi esférica (achatado en los polos) los rayos solares no llegan con la misma intensidad en todo el planeta, ya que es atenuada por los gases que se encuentran en ella y a medida que aumenta la latitud deben recorrer un mayor trecho (*Figura 1*). Es por eso que en términos

medios, las temperaturas más elevadas se encuentran en el Ecuador, y va disminuyendo hacia latitudes más altas con mínimos en los polos (**Figura 2**).

Esta diferencia de calor causa que la Tierra busque un balance de energía, entre la superficie y la atmósfera, y del Ecuador hasta latitudes mayores donde existe un déficit de calor. Las parcelas de aire caliente ascienden debido a su baja densidad mientras que las más frías descienden. Esta condición básica es la más importante, ya que da lugar a las células de circulación global de la atmósfera, que distribuyen el calor almacenado en regiones cercanas al Ecuador hacia los polos. Esta células crean una circulación de ascenso y descenso de masas de aire que generan los principales vientos como los Alisios y los vientos del Oeste (**Figura 3**).

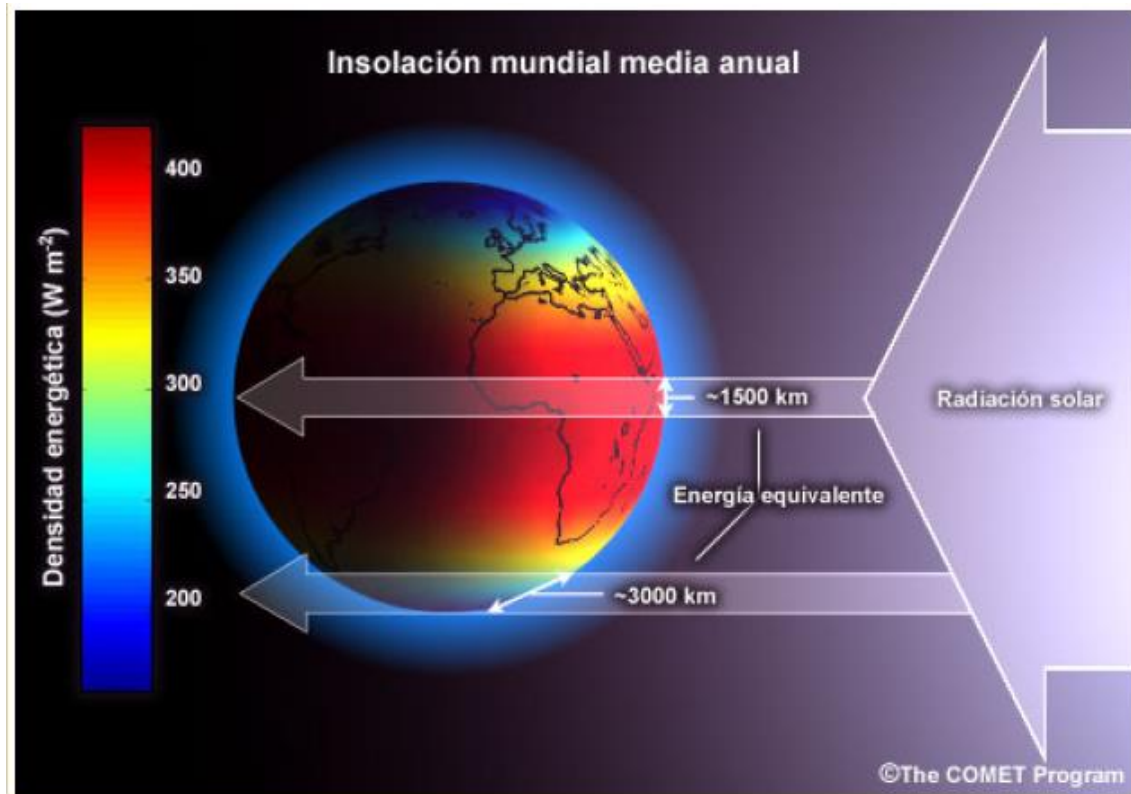


Figura 1: Variaciones latitudinales de la radiación solar entrante anual (insolación), la densidad de energía y la distancia a la superficie.

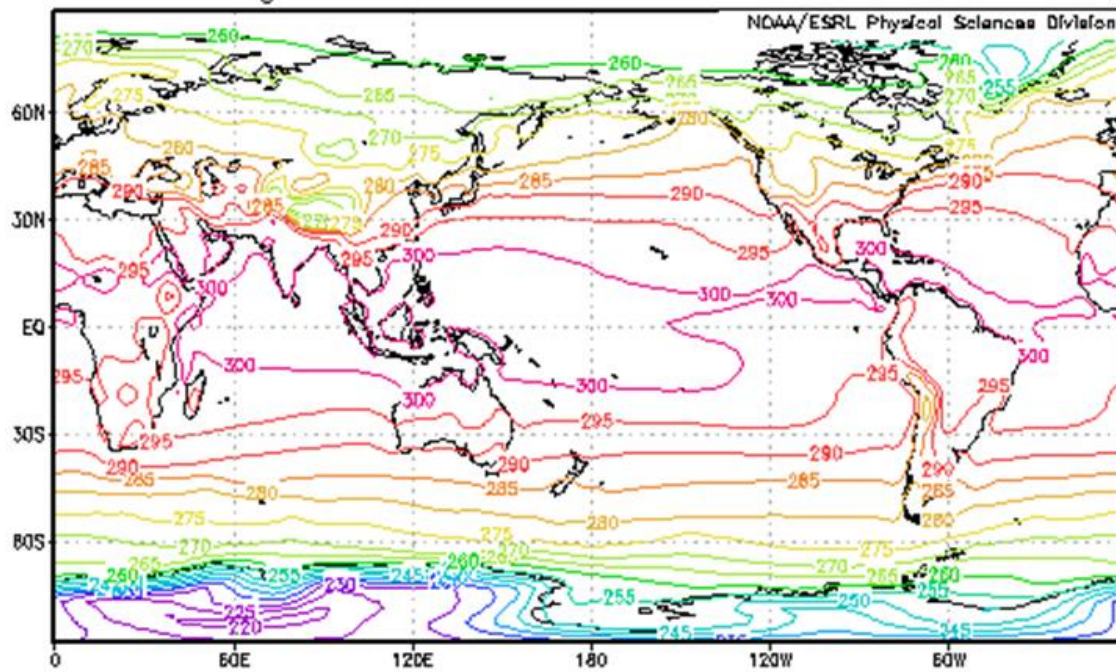


Figura 12: Temperatura media anual (1971-2010) del aire en K, a 2 m del suelo.

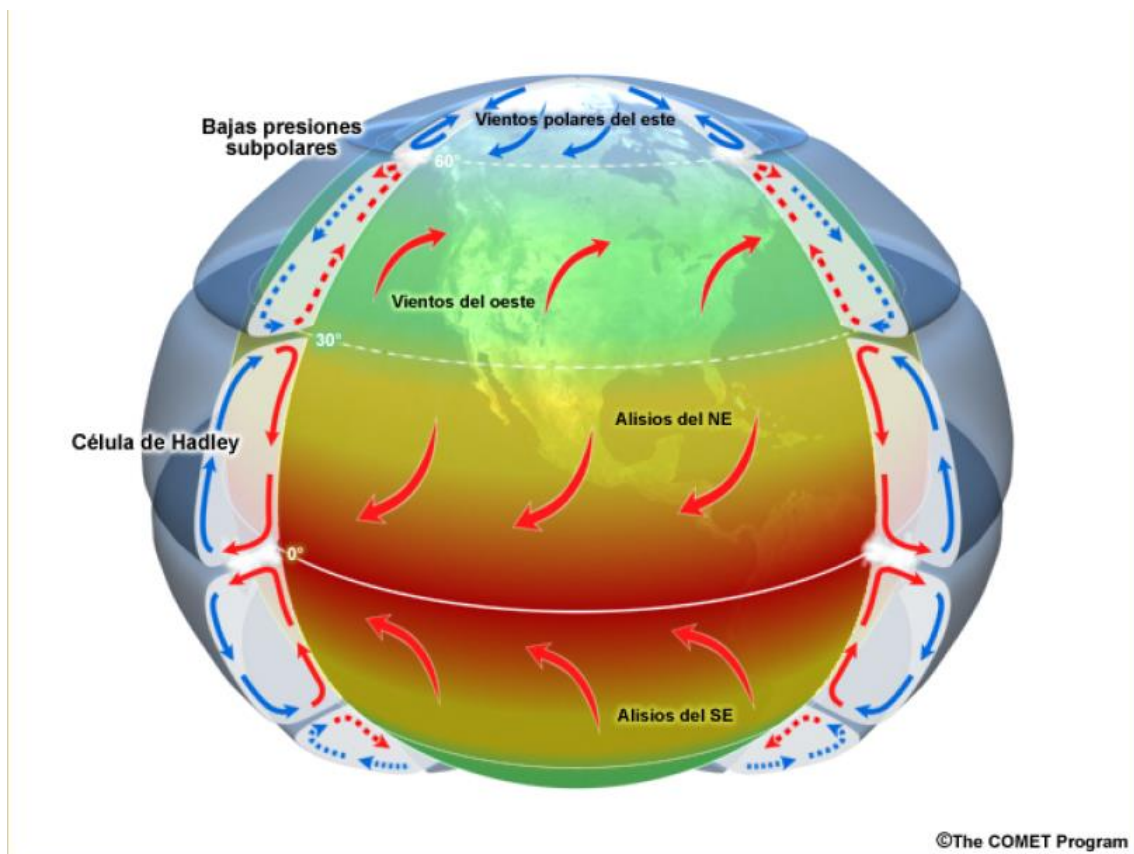


Figura 13: Células de circulación global, vientos en superficie y calentamiento neto de la superficie.

Las células de Hadley, Ferrel, y Polar desempeñan un importante papel en la circulación atmosférica, y vienen a constituir un efecto y no una causa de la circulación atmosférica global. Ello significa que la circulación atmosférica es el resultado de una combinación de muchos factores que actúan sobre el patrón barométrico del aire determinado por los centros de acción (anticiclones y ciclones o depresiones).

La circulación latitudinal aparece como consecuencia de que la radiación solar incidente por unidad de área es más alta en las bajas latitudes ecuatoriales, y disminuye, según la latitud aumenta, alcanzando su pico mínimo en los polos. La circulación longitudinal, por otro lado, aparece dado que el agua tiene una capacidad mayor de calentamiento que la tierra aunque necesita mucho más tiempo que el aire para absorber y expulsar calor ya que el aire es diatérmico; es decir, se deja atravesar por los rayos solares sin calentarse, mientras que las aguas absorben lentamente ese calor de los rayos solares y lo liberan cuando la atmósfera está más fría. Incluso en microescala este efecto es perceptible, ya que da origen a la brisa marina durante el día, cuando el aire calentado en la parte terrestre próxima al mar se eleva al disminuir su densidad y ello crea una especie de vacío que es ocupado por la brisa que viene del mar.

Durante la noche, la situación se invierte: el aire sobre la tierra se enfría, así su densidad aumenta y desciende, mientras que el aire sobre los mares se calienta al contacto con las aguas y asciende, dejando a su vez, una especie de vacío que es ocupado por el aire frío de la tierra próxima, creándose así un sistema de brisas terrestres durante las noches.

A grandes rasgos, la distribución de energía en el planeta es llevada a cabo en su mayoría por la atmósfera, en compañía de un gran sistema como los océanos que se encargan de distribuir también el calor absorbido por medio de las corrientes oceánicas y en su interacción con la atmósfera. En términos medios, la circulación atmosférica posee características propias ya conocidas y que tienen variaciones en diferentes escalas de tiempo dependiendo de la cantidad de energía que debe distribuir. Así, estas variaciones son las que se han estudiado desde hace muchos años para entender los diferentes fenómenos ocurridos en la interacción océano, atmósfera y superficie terrestre.

2.2 Características de la Circulación Atmosférica en Sudamérica

La circulación atmosférica y el clima en el Pacífico suroriental están controlados por un sistema de alta presión semipermanente sobre el océano, cuyo núcleo se ubica frente a las costas del sur de Perú y norte de Chile. Este sistema conocido como el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) produce condiciones muy estables en la tropósfera baja, temperaturas del mar relativamente bajas debido a los procesos de afloramiento, vientos predominantes del sur y una extensa cubierta de estatocúmulus. Esta nubosidad juega un papel importante en el balance superficial de radiación solar incidente, impidiendo el calentamiento de la superficie del mar y de la columna de aire que interactúa directamente con ella.

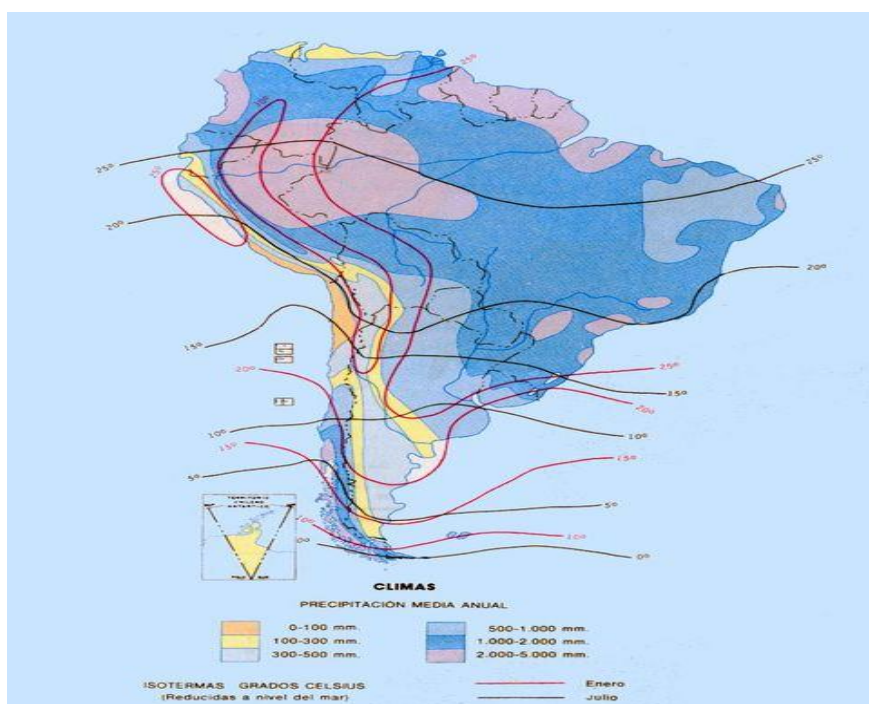


Figura 2: Clasificación de los climas en América del Sur según la precipitación media anual (1971-2000).

Fuente: <http://www.zonu.com/>

Los fenómenos atmosféricos son fuertemente influenciados por la distribución de la topografía y la vegetación en la superficie del continente. Los diversos rasgos de las condiciones atmosféricas, el clima y la variabilidad climática sobre sudamérica, incluye los rasgos de las latitudes tropicales, subtropicales y medias. Otro fenómeno importante en la región es El Niño y la Oscilación del Sur, que tiene su origen en el sistema acoplado océano-atmósfera en el Pacífico tropical, por lo que tiene una fuerte influencia sobre las áreas tropicales y subtropicales de América del Sur. En la parte continental, la cordillera de los Andes se ubica paralelamente a la costa Oeste del continente sudamericano, desde el Norte de Venezuela hasta la Patagonia Argentina.

Otra característica importante de la topografía de América del Sur es el Altiplano, ubicado en la zona central entre los paralelos 15S-21S, con una elevación en promedio de 3700m. Esto sumado a los efectos topográficos, constituye un factor determinante para el clima de la región. La temperatura en la superficie es relativamente baja y su ciclo diario muestra una gran amplitud, debido al fuerte calentamiento diurno y la considerable pérdida radiactiva nocturna.

La Cordillera de los Andes representa un formidable obstáculo para la circulación atmosférica en la tropósfera, actuando como una barrera climática y obstaculizando el paso de la humedad, permitiendo la existencia de condiciones secas al Oeste y húmedas al Este en los subtrópicos, los patrones se invierten en latitudes medias.

El escudo brasileño tiende a bloquear la circulación atmosférica de los niveles bajos sobre los subtrópicos en América del Sur. Otro aspecto importante es la extensa área de continente en bajas latitudes 10N-20S, que condiciona el desarrollo de intensa actividad convectiva que da origen a la selva más grande del mundo, en la cuenca del Amazonas. En las costas orientales de America del Sur , debido a su relieve poco accidentado las masas de aire húmedas no presentan dificultades de penetración por la cual las precipitaciones son mayores. Otro factor importante son las corrientes marinas calientes y frías responsables de mayores o menores índices de humedad y temperatura de las masas de aire.

La **Figura 3** muestra la variación de la precipitación con la latitud, que ha sido obtenido al promediar los valores de precipitación entre los 110°-10° O de longitud. Se observa que la ubicación de mayor precipitación se encuentra aproximadamente a los 8N,

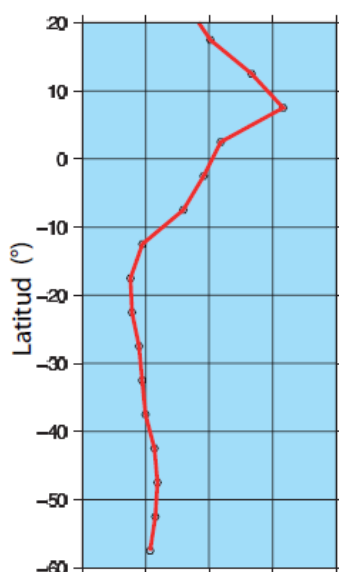


Figura 3: Variación de la precipitación con la latitud promediada entre los 110°-10° O de longitud

y que la zona de convergencia de vientos conocida como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) casi coincide con la zona de máxima precipitación.

En la **Tabla 1** se enumeran las principales características de la precipitación, obtenida de los promedios de los parámetros meteorológicos, basado en el trabajo de René Garreaud (2002).

<i>Precipitación</i>	<i>Circulación</i>
ZCIT	ZCIT
Convección continental	Vientos Alisios
Convección altiploánica	Alta subtropical
ZCAS	Vientos del Oeste
Convección Pampas	Low Level Jet
Mid latitude storm tracks	ZCAS
Precipitación orográfica	Alta de Bolivia
Desierto costero	Baja del NE del Brasil
Semiárida NE Brasil	Vientos tropicales del este
Zona seca de la Patagonia	Vientos del oeste
Desierto oceánico	Jet stream

Tabla 1: Características de la precipitación asociada a la circulación de la atmósfera sobre América del Sur. Trabajo desarrollado por René Garreaud (2002).

2.3 Jet de Capas Bajas en Sudamérica

Existen antecedentes tanto observacionales como de modelos numéricos que documentan la presencia de un transporte meridional de vapor de agua durante los meses de primavera y verano, el cual puede extenderse desde la Amazonía hasta el Sur de Brasil y Norte de Argentina en la cuenca del Río de la Plata (Nogués Paegle and Mo, 1997, Berbery and Collini, 1999, Saulo et al., 2000, Seluchi and Marengo, 2000, Misra et al., 2000 y Lau and Zhou, 2000, entre otros). Este flujo de vapor de agua es producto de la confluencia de vientos que se origina a partir de un primer flujo proveniente de la Amazonía pasando por el Altiplano Boliviano. La convección profunda en esa región provee humedad al flujo, que posee una componente predominantemente Norte. Este flujo se deflexiona por causa de la cordillera de los Andes que cambia su sentido, y sumado a esto, existe otro flujo de aire proveniente del este del Brasil. Estos vientos confluyen acelerándose en especial en el norte de Argentina, gran parte de Paraguay e incluso llegando a veces al sur de Brasil. Este flujo también está asociado a un sistema de baja

presión en superficie inducido térmicamente cuya circulación horaria también ayuda a la aceleración del Jet de Capas Bajas en el Noroeste argentino y parte de Paraguay.

Velasco y Fritsch (1987), Silva Díaz (1987), muestran la relación existente entre la formación de sistemas convectivos organizados en la mesoescala y la convergencia de vapor de agua corriente abajo de los Jet de Capas Bajas (JCB). Esto ha motivado investigaciones para entender los mecanismos que originan el JCB, su ciclo diurno, y su rol de modulador de la convección organizada.

El JCB se encuentra en niveles bajos de la atmósfera, estudiado en la mayoría de las veces en el nivel de 850 hPa, aunque también puede extenderse entre los 100 hPa por encima y por debajo de ese nivel. La red actual de estaciones que cuentan con radiosondeos en la región es incapaz de medir ni espacial ni temporalmente la escala de estos Jets en bajos niveles

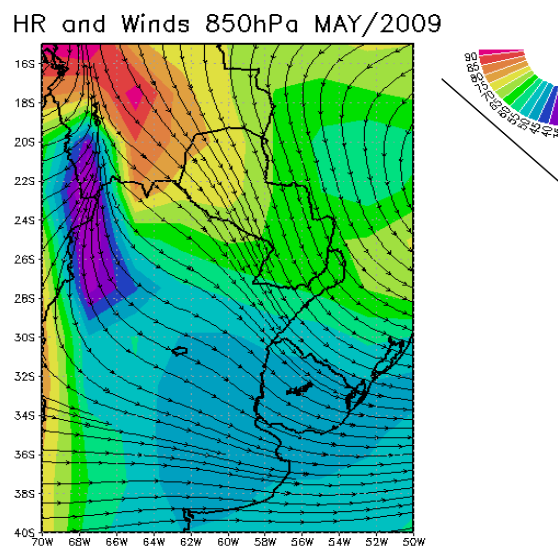


Figura 4: Líneas de corriente y humedad relativa en 850 hPa. Muestra un flujo proveniente del noroeste que confluye en el sur de Paraguay. Situación media para el mes de mayo del 2008.

Según (Bonner 1968), el criterio a la condición de la intensidad del viento y otra a la cortante vertical del mismo especifica que el perfil vertical de vientos debe presentar velocidades de por lo menos 12 m/s en los primeros 1.5 km y disminuir en la vertical desde el máximo por lo menos 6 m/s hasta el mínimo más cercano al máximo o bien hasta 3 km si este mínimo se encuentra por encima de este nivel. Si bien resulta arbitrario utilizar este criterio a la región al este de los Andes tiene la ventaja de permitir la comparación de estadísticas con las obtenidas en otras regiones geográficas en las que ha sido ampliamente utilizado. Douglas et al. (1998) y Saulo et al. (2000) lo han empleado

a fin de identificar los eventos más intensos de JCB en Santa Cruz, encontrando en la composición de 12 casos, máximos medios en la velocidad de ~ 20 m/s en 1.7 km sobre superficie en un flujo del NW, velocidades de ~ 7 m/s en superficie y cortantes de ~ 5 m/s/km por encima del máximo y por debajo de los 3 km. Saulo et al. (2000) aplicó este criterio a las salidas operativas del modelo regional ETA producidas por el CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos), dado su capacidad para proveer una descripción realista de la circulación local y para detectar patrones de mesoescala, lo cual ha permitido progresar en la caracterización del JCB durante la primavera y el verano de 1997-1998.

2.4 La Alta de Bolivia

De los muchos tipos de patrones estacionarios en la tropósfera superior observados en la atmósfera, algunas de ellas bien definidas, la mayoría se encuentran en los trópicos y subtropicos en forma de anticiclones cerrados. Cada uno de estos anticiclones de nivel superior denota regiones de alta presión, acompañados en muchos casos por una vaguada al Este. En general se reconoce que en niveles superiores de alta presión como estos son parte de una clase de factores inducidos térmicamente que se forman en regiones de altas precipitaciones en respuesta al calentamiento por condensación, y supone a menudo una manifestación en alto nivel de las regiones del monzón de verano.

La Alta de Bolivia es una característica dominante de la circulación en niveles altos de la atmósfera de verano en Sudamérica. El calor latente que se desprende de las tormentas sobre la meseta ha sido la principal fuente de calor de la alta de Bolivia, más el calor

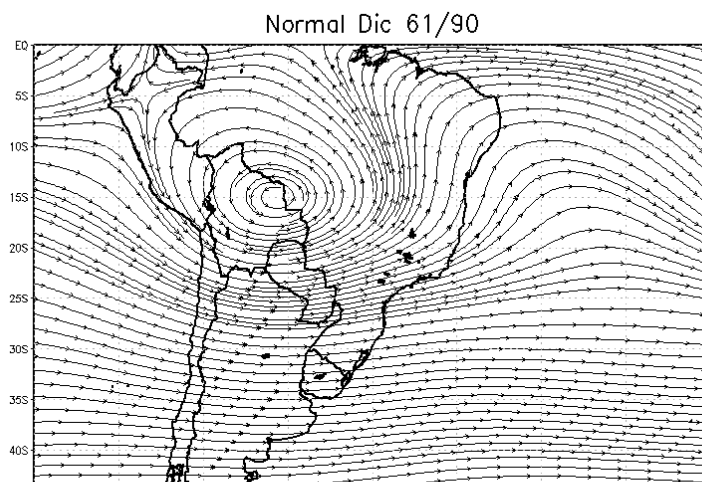


Figura 5: Alta de Bolivia en el nivel de 250 hPa, en su posición normal para el mes de diciembre según la normal climatológica 61/90.

sensible ya obtenido tiene más calor. Parte de este calentamiento ha sido equilibrado por la advección de aire frío del Este, y se definió que la Alta de Bolivia está limitada por la capa fría por encima de 175mb como resultado de la alta actividad convectiva. Es que el intenso calor sensible de la atmósfera sobre el altiplano impulsa la convergencia de los vientos cargados de humedad, la liberación de calor latente en las tormentas y la formación de la Alta de Bolivia.

La Alta de Bolivia está relacionada a otros aspectos del clima en América de Sur. Se ha encontrado que está relacionada a la variación estacional de las precipitaciones en esta región (Kousky and Kagano 1981; Nishizawa and Tanaka 1983; Horel et al. 1989), también se sabe que la Alta de Bolivia y la Baja Térmica del Noroeste Argentino están relacionadas dinámicamente (Kreuels et al. 1975; Horel et al. 1989) y el clima seco del Noreste brasileiro (Nishizawa and Tanaka 1983).

Algo importante es que la relevancia de este anticiclón no se limita solo desde el aspecto climático sino que ésta puede ser resuelta en escalas de tiempo más cortos, incluso de días (Virji 1981). Dependiendo de su ubicación en intensidad, una Alta de Bolivia activa en un día se ve reflejada por la convección profunda en el altiplano boliviano, lo cual facilita el libre ascenso de la parcelas de aire húmeda producto de la convergencia en niveles bajos. En Paraguay esto da una idea de las probabilidades de desarrollo de células de tormenta sobre el territorio diariamente, ejemplo de como este sistema es importante tanto para cortas escalas de tiempo como también a escala climatológica.

2.5 Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS)

El Brasil se extiende en una gran área y posee uno de los bosques tropicales más grandes del mundo que es la gran selva amazónica. En el periodo cálido de este hemisferio, el continente empieza a calentarse mucho más rápido que el océano, aumentando así el contraste térmico entre continente – océano. La zona amazónica contribuye en gran cantidad con humedad y sumado a esto el calentamiento de la superficie y el aire cercano a ella contribuyen al desarrollo de convección profunda en esa región. Lenters y Cook (1995) descubrieron mediante modelos numéricos de circulación general que el calentamiento continental durante los meses de verano están asociados a la baja térmica del noroeste argentino, al Este de los Andes, como también está asociado al anticiclón semipermanente del océano Atlántico Sur. Esta interacción provoca convergencia de vientos responsables de la advección de humedad desde el

océano Atlántico hacia el continente al NW-SE del Brasil, esta región de máximos de precipitación es conocida con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur o ZCAS.

Una de las características de las ZCAS es la permanente área de nubosidad convectiva por un periodo medio de 4 a 5 días (Silva Díaz, 1997) donde se ha descubierto que las zonas más afectadas en términos de magnitud y persistencia de la precipitación es el Sureste del Brasil (Quadro, 1994). Nogue - Paegle y Mo (1997) vieron que una fuerte (débil) actividad convectiva sobre la ZCAS produce un déficit (exceso) de precipitación en la zona del Norte y Noroeste de Argentina, Sur de Paraguay, y el extremo Sur del Brasil.

En bajos niveles, la configuración de la ZCAS está caracterizada por el flujo de humedad de NO a SE y está favorecida por un Jet de Capas Bajas en esa región. Los vientos Alísios transportan vapor de agua desde el océano Atlántico hacia el continente sudamericano hasta la Amazonía, esto también se da gracias a la Alta Semipermanente del Atlántico Sur (ASAS) cuya ubicación media es de unos 30°S. Su circulación acelera la convergencia de humedad ya existente, al haber tanta humedad disponible esto genera una variabilidad convectiva en la región de la ZCAS (Pallota- Nakasato, 2010).



Figura 6: Imagen satelital en el espectro visible sobre Sudamérica. Muestra el campo nuboso sobre el centro y sureste del Brasil, mejor conocido como la ZCAS.

En la **Figura 6** se observa ciertos topes nubosos de forma aparentemente desorganizada pero que realmente son parte de esta zona de convergencia de humedad sobre el Brasil acompañando también la línea frontal que se extiende sobre el Océano Atlántico. Es importante saber que la ZCAS necesita de un sistema frontal estacionario o semi estacionario por unos días (como mínimo 5 a 6 días) para ser considerado como

ZCAS. Los frentes estacionarios ayudan a que la humedad proveniente del Amazonas, sumado ya al transportando desde el océano por la circulación misma de la Alta Semipermanente del Atlántico Sur (ASAS), no escapen hacia latitudes más altas y converjan todas en una misma región, como así también la propia pendiente del frente ayuda al levantamiento de las parcelas de aire húmedas provocando convección profunda.

El régimen de lluvias del periodo cálido en el continente sudamericano posee algunas características muy notorias en la circulación atmosférica. Cada una de estas forzantes determina este régimen anual y regula la cantidad de lluvia caída en las regiones. La ZCAS es una de las características más redundantes del régimen lluvioso en el Brasil, pero también se relaciona y está ligado a los eventos lluviosos que se dan a sus alrededores. El papel que juega la ASAS para el transporte de humedad océano – continente es fundamental, como también la orientación activa del LLJ para la confluencia y convergencia de vientos transportadores de humedad. Se sabe que la Alta de Bolivia debe estar presente aproximadamente al W del centro del Brasil para que la convección tenga un buen apoyo en altura (M. Saavedra et al. 2011). La ubicación de la ASAS también ayuda a que el frente pueda estacionarse al S del Brasil con la rama aproximadamente en dirección NW-SE, esto sirve de apoyo para que el flujo de humedad se mantenga en el área, es decir, que converjan en dicha región.

2.6 Régimen de lluvias en Paraguay

El régimen normal de lluvias más significativo en Paraguay va desde comienzo de octubre hasta fines de marzo o abril. La mayor parte de las precipitaciones son de origen convectivo, ya que este régimen se sitúa en el periodo cálido de Hemisferio Sur. Esto se debe al calentamiento radiactivo de la superficie, más el contenido de vapor de agua en el aire, provoca que las parcelas de aire cercanas a la superficie asciendan adiabáticamente hasta llegar a condensarse y formar nubes, en este proceso ocurre una liberación de energía y la nube crece de forma vertical. Este tipo de nubes son características del régimen lluvioso en Paraguay, provocando los mayores acumulados de lluvia a lo largo del año.

Se observa en la **Figura 7** que las isoyetas tienen sentido meridional y varían zonalmente desde un mínimo de 600 mm en el Oeste del Chaco a más de 1800 mm en el Sureste de la Región Oriental (Grassi et al, 2005). La cuenca del río Paraná es la más húmeda en nuestro territorio, con promedios anuales que superan los 1800 mm, mientras que la cuenca del río Paraguay recibe máximos de 1600 mm en la Región Oriental, en tanto que son mínimas en el Chaco con 600 mm en el Alto Pilcomayo, frontera con Argentina y Bolivia. Las precipitaciones también tienen una gran variación estacional con valores mínimos en los meses de julio y agosto; estos valores en el Chaco Paraguayo representan cerca del 1% de la lluvia total anual, mientras que en el extremo Sureste de la Región Oriental alcanza el 5% del total anual.

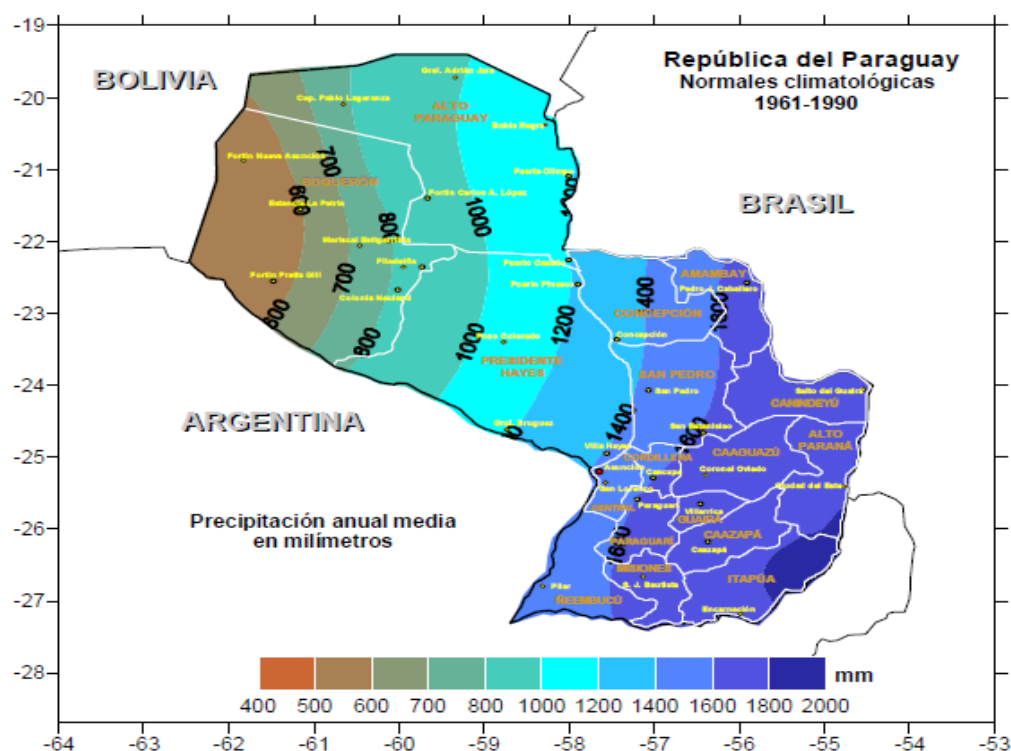


Figura 7: Precipitación anual normal (1961 – 1990). Fuente: Un análisis del comportamiento de la precipitación en el Paraguay – FPUNA.

La zona oeste, centro y norte del Chaco tiene una época normal de periodos secos (**Figura 8**), allí se puede notar que a partir de abril las precipitaciones se reducen notablemente y esto se acentúa más hacia el oeste de Boquerón; por eso es muy importante la época de precipitación (octubre a marzo) en dicha zona, porque es la época de recarga para soportar la época de sequía o escasa precipitación.

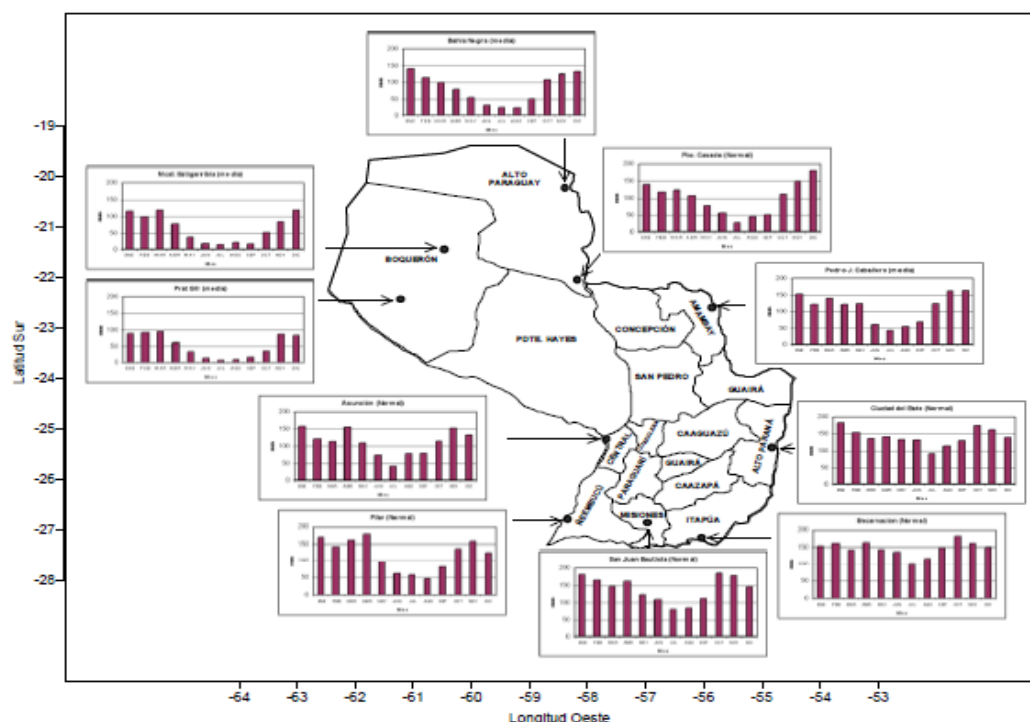


Figura 8: Ciclo anual de la precipitación en Paraguay en diferentes localidades. Fuente: Dirección de Meteorología e Hidrología – DINAC.

2.7 Sequías

La sequía es, de acuerdo al diccionario de la Real Academia Española (RAE), el tiempo seco de larga duración. Durante la sequía, el agua disponible de una determinada región geográfica se ubica por debajo de los parámetros habituales; por lo tanto, no resulta suficiente para satisfacer las necesidades de los seres humanos, los animales y las plantas.

La Sociedad Meteorológica Americana (1997) definió grupos de sequías y tipos en cuatro categorías: meteorológico o climatológico, agrícola, hidrológico y socioeconómico. Para eventos secos prolongados, es decir que dura varios meses o años inclusive, las condiciones atmosféricas de la sequía meteorológica que resulta con la ausencia o reducción de precipitación se pueden desarrollar rápidamente y terminar de la misma manera. Los eventos secos a corto plazo – un par de semanas de duración– producen sequedad en capas superficiales (zona de las raíces de las plantas), las cuales se producen en un momento crítico durante la estación de crecimiento, conllevando una sequía agrícola que reduce rápidamente los rendimientos de cultivos, a pesar de que los niveles profundos del suelo estén más húmedos.

La sequía socioeconómica se refiere a la oferta y la demanda de un bien económico relacionando elementos de sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. Una de las principales variables para analizar las características de las sequías para actividades de abastecimiento de agua, entre ellos la generación de energía hidroeléctrica, recreación y de terrenos dedicados a cultivos que se fertilizan con riego, donde el desarrollo del cultivo dependen en gran parte de la disponibilidad de agua en el arroyo.

De estos conceptos, la sequía se ha definido por la comunidad meteorológica internacional en términos generales como "ausencia prolongada o marcada deficiencia de precipitación", una "deficiencia de precipitación que se traduce en escasez de agua por alguna actividad o por algún grupo", o un "período de tiempo seco suficientemente prolongado por la falta de precipitaciones que causan un desequilibrio hidrológico grave" (Organización Meteorológica Mundial 1992; American Meteorological Society 1997).

La sequía es uno de las anomalías ambientales más difícil de evaluar por su gran complejidad, pues a la vez que depende de las escasas o ausentes precipitaciones, también se relaciona con la capacidad de almacenamiento del suelo y la ocurrencia del fenómeno en relación con el ciclo vegetativo anual. En sentido más estricto, riesgo natural es la probabilidad de que un espacio geográfico sea afectado por las consecuencias de distinta vulnerabilidad de un proceso natural, que afectarán los asentamientos y las actividades humanas.

La irregular distribución geográfica y la dificultad para definir su inicio son otras características esenciales de las sequías.

La ocurrencia de una sequía depende de los siguientes factores determinantes que impulsan la emergencia del fenómeno:

- la evapotranspiración
- el déficit de la precipitación

La sequía pertenece al esquema climático normal de las regiones semiáridas y, en consecuencia, está relacionada con la alta variabilidad de las precipitaciones.

La variación de la precipitación en un lugar dado y entre épocas determinadas constituye el factor de impulso principal de las sequías. A su vez, dependen del condicionamiento impuesto por los cambios en la presión atmosférica con las consiguientes alteraciones en la circulación general de la atmósfera.

Las sequías están asociadas a condiciones predominantemente anticiclónicas que persisten durante un cierto tiempo. Otro factor condicionante es la modificación de la cubierta vegetal y de las condiciones del suelo producidas por esos cambios en la circulación atmosférica que pueden constituir un proceso de realimentación para prolongar la sequía.

Las sequías se pueden caracterizar por una carencia del factor de impulso que son las precipitaciones debido a valores de temperatura que hacen que la evapotranspiración potencial se mantenga alta, aunque la evapotranspiración real de ese momento sea pequeña por falta de agua. La sequía no es, como se ve, una entidad tan bien definida como la inundación, porque procede de un decrecimiento en los promedios de precipitación en relación a la necesidad de agua en un período particular y en un área particular.

Las sequías resultan de condiciones hídricas en las que prevalece la escasez de agua como resultado de precipitaciones insuficientes en una serie de años sucesivos. La cantidad de lluvia disminuye el promedio y en consecuencia se empobrecen las pasturas, disminuye el rendimiento de los cultivos, falta agua para la gente y los animales.

2.7.1 Riesgo de sequía

Una clasificación global permitirá diferenciar varias categorías de áreas geográficas de riesgo de sequía, pertenecientes al riesgo hídrico:

- Áreas de déficit en distintos eventos históricos y actuales
- Áreas de déficit según el grado de permanencia o duración
- Áreas de déficit según la frecuencia
- Áreas de déficit según la magnitud areal
- Áreas de déficit hídrico según las poblaciones, infraestructura y equipamiento impactado.

Otra clasificación en cinco categorías que combinan los parámetros frecuencia y magnitud del riesgo hídrico es la de Fuschini Mejía (1989). De esta sistematización se han seleccionado las siguientes categorías que interesan para evaluar el riesgo de sequía:

- Época de equilibrio: con leves excesos y sequías agrícolas, según el registro histórico de la zona.
- Épocas de sequías anormales, pero que tienen carencias de baja frecuencia en el registro histórico.
- Épocas de sequías excepcionalmente anormales, que tienen carencias de muy baja frecuencia en el registro histórico. Esas carencias pueden ser anuales, plurianuales y tiene importancia la sucesión de estados de épocas inmediatamente anteriores. En este caso tiene mucha importancia no sólo la duración sino la extensión del fenómeno.

2.7.2 Tipos de sequía

Debemos diferenciar entre la sequía hidrológica como "permanencia del déficit hídrico" de una sequía "aparente" o sequía agrícola (cuando el agua no coincide con las épocas en que las necesidades agropecuarias las exigen).

La sequía agrícola es de corta duración y afecta el ciclo vegetativo de las pasturas y los cultivos. En general no altera demasiado los balances hídricos anuales y un indicador es la baja de la napa freática.

La sequía hidrológica altera el balance hidrológico anual debido a su duración (permanencia de la carencia de lluvias) y los indicadores son: el descenso notable de la napa freática, la seca de las lagunas. Es extensa en superficie y no coexiste con la inundación. Puede morir la vegetación y comenzar la erosión eólica.

2.7.3 Consecuencias

Dado que el agua tiene múltiples usos, los cuales varían en las distintas regiones del país, la sequía trae consecuencias negativas en el medio ambiente y en todas aquellas actividades humanas que dependen del agua.

En términos generales, los usos del agua se clasifican como usos in-situ y usos extractivos. Los primeros corresponden a aquéllos que permiten emplear el agua sin consumirla y aprovechar el recurso sin extraerla de su fuente original. Los usos in-situ más importantes son: turismo, deportes y recreación; acuicultura; pesca deportiva y recreativa; y usos ambientales del agua.

Los extractivos corresponden a aquellos que emplean el recurso por medio de la extracción del agua del cauce. Si el agua regresa al cauce una vez utilizada (Ej: generación hidroeléctrica) se habla de un uso no consuntivo. Entre los usos consuntivos (el agua no regresa al cauce) se incluyen las extracciones para riego, para agua potable y para las actividades industrial y minera.

Los efectos de la sequía se asocian generalmente a la agricultura y ganadería. Sin embargo, todos los sectores y actividades mencionadas anteriormente se ven afectados por la escasez de agua.

La sequía tiene consecuencias no sólo en la cantidad de agua disponible. En efecto, los bajos caudales que están asociados a una sequía pueden afectar la calidad del agua ya que se reduce la capacidad de dilución de los contaminantes y aumenta la polución.

2.8 Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El Standard Precipitation Index o SPI por sus siglas en inglés, es una de las principales y más utilizadas herramientas para el estudio de los eventos de sequía en el mundo (Santos et al. 2010; Vicente - Serrano 2006). Permite estudiar las anomalías de la precipitación de una estación en un periodo determinado (resolución temporal) con datos históricos de la misma. También es utilizado para conocer anomalías en los periodos húmedos. El SPI no es una herramienta de predicción, pero se puede utilizar para luego estimar bajo ciertas condiciones y técnicas.

Conceptualmente, para una escala de tiempo dada, el SPI es la diferencia de precipitación a partir de la media dividida entre la desviación estándar. Matemáticamente, el SPI se basa en la probabilidad acumulativa de un evento de lluvia determinado que ocurre en la estación para este estudio. Los datos pluviométricos históricos de la estación se ajustan previamente a una distribución teórica a los tales de cada mes en el periodo de referencia. Existen muchas distribuciones teóricas que se pueden utilizar, entre ellas se encuentran Gamma y Pearson III. Diversos autores analizan las ventajas y desventajas de estas distribuciones en distintas regiones, no habiendo una única distribución recomendada para el cálculo del SPI.

Algunos trabajos recomiendan la distribución Pearson III, por ejemplo Blain (2011) para San Pablo (Brasil), Wu et al. (2007) y Guttman (1999b) para Estados Unidos y Kumar et al. (2009) para India. Otros autores recomiendan el uso de la Gamma, por

ejemplo Thom (1968) para Estados Unidos, Lloyd-Hughes y Saunders (2002) para Europa y Angelidis et al. (2012) para Portugal. En algunos casos, no se encuentran diferencias entre estas dos distribuciones (Soto et al. (2005) para México).

Para éste trabajo se ajustaron los datos de precipitación a una distribución Gamma ya que esta ajusta adecuadamente las distribuciones a la mayoría de los meses y estaciones a lo largo de la serie temporal. Según Blain (2012) la distribución Gamma se ajusta mejor a estas latitudes.

Esta distribución está definida por:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}e^{(-x/\beta)}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \quad (1.1)$$

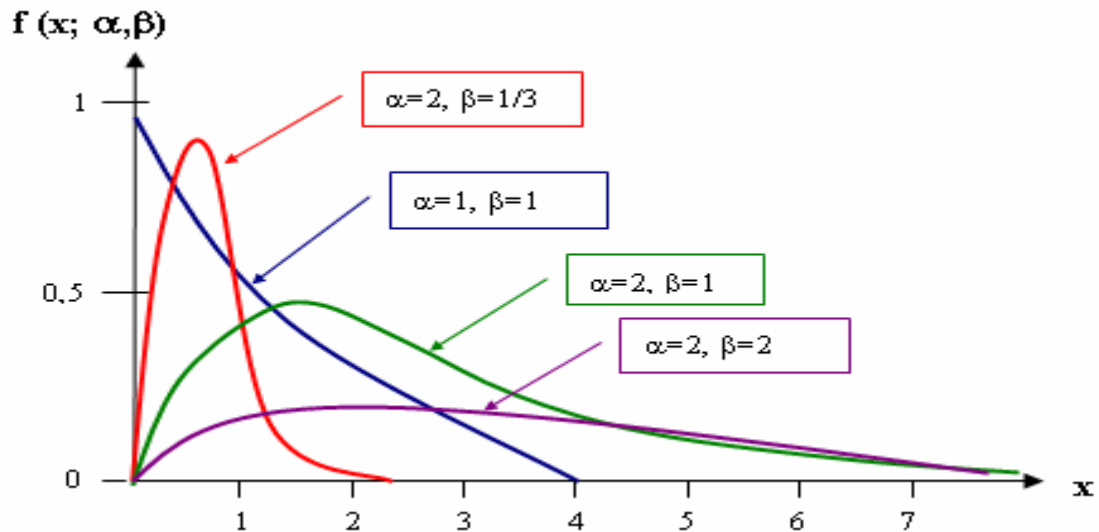


Figura 15: Funciones de densidad gamma para distintos pares de parámetros α y β

Donde los dos parámetros de la distribución son α (parámetro de forma) y β (parámetro de escala). La cantidad $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma. Progresivamente mayores valores de α resultan en menor sesgo, y un desplazamiento de la probabilidad de densidad a la derecha. Para valores muy grandes de α (mayores que 50 a 100) ésta se aproxima a la distribución normal en su forma. El parámetro α es adimensional. El rol del parámetro β es alargar o estrechar la función gamma a la derecha o izquierda. Estos parámetros se pueden estimar mediante la aproximación de Thom (1958):

$$\gamma = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (1.2)$$

$$A = \ln \bar{X} - \frac{\sum \ln X}{n} \quad (1.3)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\gamma} \quad (1.4)$$

(Gabriel Constantino Blain. *Revisiting the probabilistic definition of drought* v.71, n. 1, p.132-141, 2012)

Una vez que la distribución de anomalías de precipitación se ha transformado a una distribución normal, permite la obtención de valores universalmente válidos; además, de comparables entre otras estaciones meteorológicas y la expresión de valores en términos de probabilidad de ocurrencias de las anomalías. El cálculo resultante de la precipitación estandarizada permite la especificación de probabilidad, porcentaje de promedio y el déficit de precipitación acumulada.

Una vez que la *pdf* (probability density function) fue tomada, la probabilidad acumulada $H(PRE)$, asociada con una cantidad de precipitación, son obtenidos por una función de densidad acumulada.

$$cdf(x) = \int_0^x pdf(t) dt \quad (4.4)$$

$H(PRE)$ es estimada por la distribución mixta:

$$H(PRE) = \left(\frac{m}{N} \right) + \left(1 - \frac{m}{N} \right) cdf(x) \quad (4.5)$$

Donde:

m es la cantidad de ceros de una serie de datos compuesta de N observaciones.

Entonces:

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < Hg(x) \text{ o } Hp(x) \leq 0.5 \quad (4.6)$$

$$SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0.5 < Hg(x) \text{ o } Hp(x) \leq 1 \quad (4.7)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \text{ para } 0 < Hg(x) \text{ o } Hp(x) \leq 0.5 \quad (4.8)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \text{ para } 0.5 < Hg(x) \text{ o } Hp(x) \leq 1 \quad (4.9)$$

y además:

$$Co = 2,515517 \quad d_1 = 1,432788$$

$$C_1 = 0,802853 \quad d_2 = 0,189269 \quad C_2 = 0,010328 \quad d_3 = 0,001308$$

Además, conceptualmente, un valor particular del índice de sequía siempre estará relacionado con una particular ***H(PRE)*** no importa dónde y cuándo fue obtenido (Blain, 2012).

La bondad del ajuste se evalúa usando el test de Kolmogorov - Smirnov (como los valores a ser testeados son los mismos valores usados para el cálculo de los parámetros de la distribución, este test es también conocido como Test de Lilliefors (Massey, 1951; Wilks, 1995) y el test de Anderson-Darling (Stephens, 1974)

Como la distribución de la precipitación puede contener valores nulos se aplica un factor de corrección al ajuste que depende de la probabilidad de precipitación nula (Wu et al., 2007). Para crear la distribución de probabilidad, se combina la distribución original con un coeficiente que tiene en cuenta la probabilidad de precipitación nula, la cual es estimada dividiendo la cantidad de casos de precipitación con valor nulo por la cantidad de observaciones.

Hay que tener cuidado con la interpretación del SPI ya que la distribución Gamma no está definida para valores iguales a cero o negativos. Cuando hay muchos ceros en la serie de precipitación, entonces la serie de SPI podría estar sesgada y no estar distribuida normalmente (Wu et al., 2007).

No siempre es válido el cálculo del SPI, dado que no siempre la serie de precipitación utilizada se puede ajustar a la distribución teórica elegida y/o en algunos casos la serie de valores no es normal. Existen criterios para identificar valores de SPI no confiables. Se realizan para esto los tests de normalidad de Anderson-Darling y Lilliefors. De acuerdo a Wu et al. (2007) es considerada no-normal si cumple simultáneamente:

1. Test Shapiro-Wilk: $W < 0.96$;
2. $p\text{-valor} < 0.10$;
3. $\text{abs}(\text{mediana}) > 0.05$

También se requiere que la probabilidad de precipitaciones iguales a cero no sea muy alta ($< 0.10\%$).

EXTREMADAMENTE HÚMEDO	2.0 O MAYOR
MUY HÚMEDO	DE 1.5 A 1.99
MODERADAMENTE HÚMEDO	DE 1.0 A 1.49
CERCANO A LO NORMAL	ENTRE 0.99 Y -0.99
MODERADAMENTE SECO	ENTRE -1.0 Y -1.49
SEVERAMENTE SECO	ENTRE -1.5 Y -1.99
EXTREMADAMENTE SECO	-2.0 O MENOR

Tabla 2: Categorías de intensidad de los valores de SPI según (McKee 1992).

Las escalas temporales de 2, 3, 6, 9, 12, 24 meses, reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de las diferentes fuentes de recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo cambian respecto de anomalías de precipitación en una escala temporal relativamente corta: 2, 3 o 6 meses, en tanto que en el agua de las corrientes superficiales, subterráneas y de reservorios; revela anomalías de lluvia en periodos más largos: 9, 12 o 24 meses. El SPI representa entonces, el número de desviaciones estandar que cada registro de precipitación se desvía del registro histórico, siendo además, independiente de la localización de la estación meteorológica y del rango de valores de tal manera que diferentes estaciones y áreas climáticas se representan a través de una misma base (McKee y col., 1993). Edward y McKee (1997) consideran que un episodio seco comienza cuando el índice SPI presenta un valor inferior o igual a -1 y finaliza en el momento en el que dicho índice adquiere un valor positivo. En la **Tabla 2** podemos ver la clasificación que le dan estos autores según el valor que va tomando el SPI.

Manipulando las diferentes escalas de tiempo, se obtienen los diferentes tipos de sequía siendo la sequía hidrológica la más prolongada a través del tiempo. Una de las utilidades del SPI es que no hace referencia a la zona climática, sino que puede aplicarse a cualquier región donde se requiera un estudio de las condiciones secas y húmedas, debido a que sólo utiliza como variable la precipitación. Además, que es de cálculo fácil y flexible (McKee, 1993).

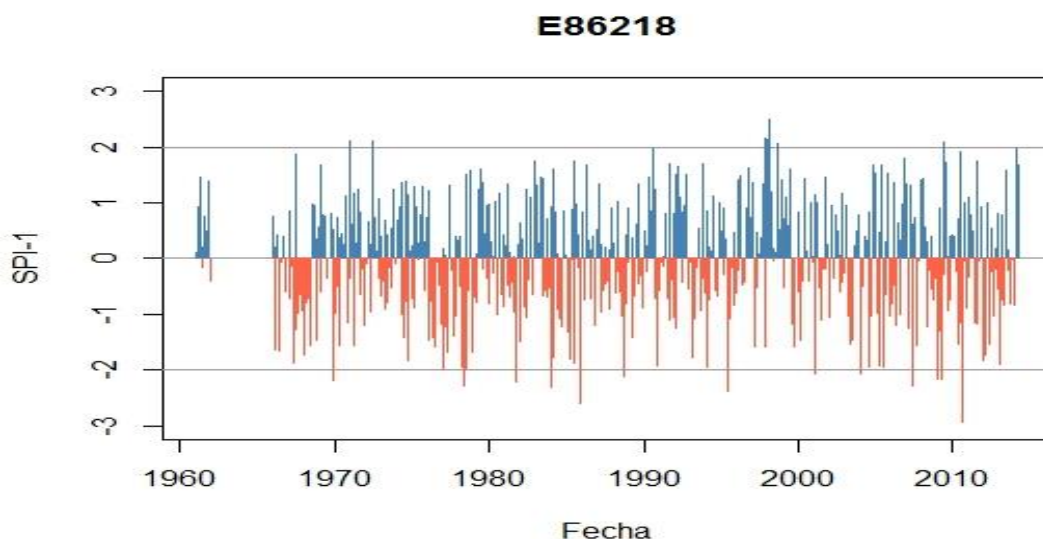


Figura 9: Serie temporal del SPI de 1 mes para la estación de Asunción (Estación Silvio Petrossi, 86218 indicativos de la OMM). El periodo se toma de 1961 hasta 2013. El color rojo indica periodos secos y el color azul es indicativo de periodos húmedos. Los valores de la ordenada indican la intensidad de los periodos húmedos y secos.

Según Guttman (1994) se necesitan al menos 20 a 30 años (siendo 30 años el período mínimo para caracterizar el clima en una zona o región), y 50 años o más para que el cálculo sea óptimo. Lo ideal para hacer los cálculos es que la serie de datos sea completa, pero normalmente esto no es posible, debido a diversos factores como:

- Falta de observaciones con la frecuencia propuestas por la OMM.
- Ausencia del personal que haga las mediciones.
- Desperfectos o ausencia de los artefactos necesarios para la medición.
- Errores en la digitalización de los datos anotados en planillas y registros en hojas.
- Otros.

Es así que se tomó un porcentaje de faltantes, que para este trabajo fue del 20% de los datos de precipitación en el caso del SPI.

Cada evento de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida por su principio y fin, y una intensidad para cada uno. La suma positiva del SPI para todos los meses dentro de un evento de sequía se puede llamar "magnitud" de la sequía.

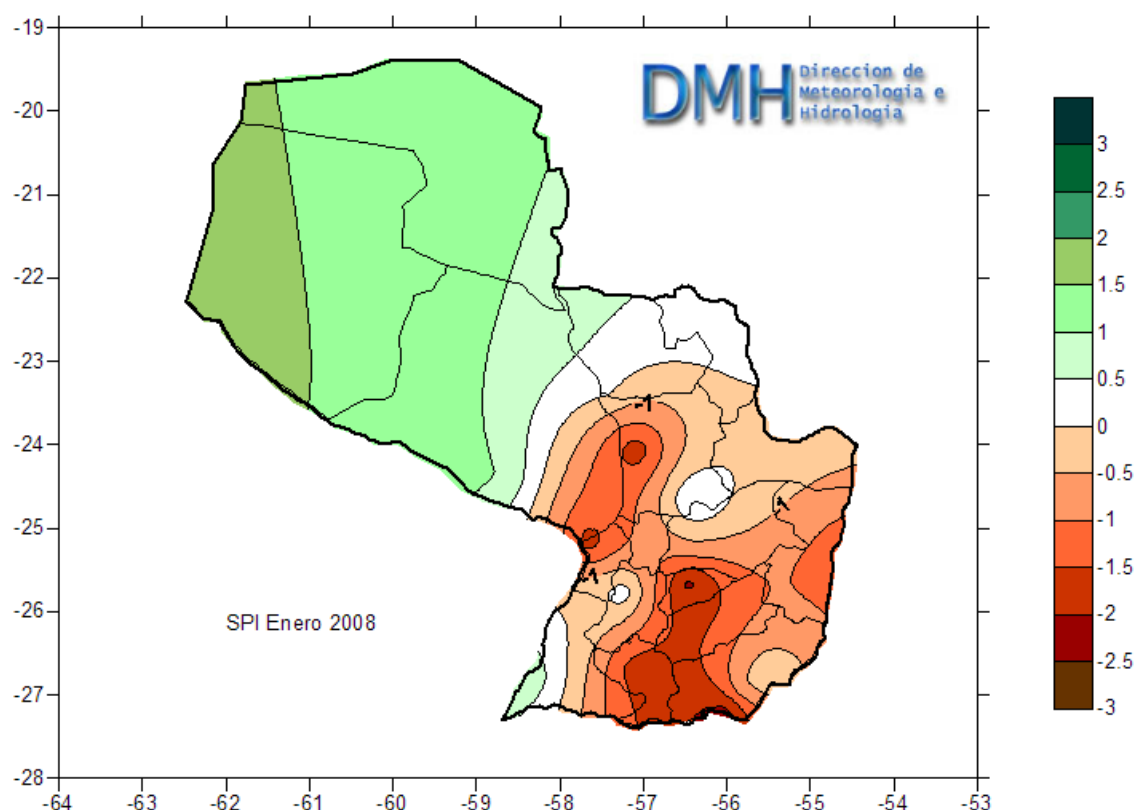


Figura 10: Mapa interpolado de los valores de SPI-1 para el mes de enero del 2008.

Los trabajos más recientes que utiliza el SPI en la región son los realizados por M. Portela, A. Silva y J. Benítez que analizaron la variabilidad temporal de los eventos de sequía en el sur de Paraguay y norte de Argentina.

Los procesos de control de calidad de los datos de precipitación, como también la homogenización de dichos datos y la obtención de los valores de SPI fueron hechos en conjunto con los miembros del CRC-SAS, ya que este proceso ha llevado aproximadamente dos años por tratarse de una base de datos regional para el sur de Sudamérica y siendo este trabajo parte de ese proyecto.

3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de estudio

En atención a la clasificación tipológica de la investigación, este trabajo se constituye de acuerdo a su finalidad, en una investigación del tipo básico, con enfoque cualitativo. En cuanto a su profundidad, posee las características de una investigación descriptiva, de naturaleza empírica y documental, sustentada en fuentes primarias y secundarias.

3.2 Datos

3.2.1 Datos en superficie

El diseño para la población y muestra a adoptar es longitudinal retrospectiva. Los datos utilizados para el cálculo del SPI provienen de la base de datos del CRC-SAS -Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur- con países responsables como Argentina y Brasil, países miembros como Paraguay y Uruguay y países asociados como Bolivia y Chile (<http://www.crc-sas.org/es/>) con el cual, la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH-DINAC) tiene convenio, proveyendo los datos de Paraguay con rigurosos controles de calidad, creando una base de datos controlada y en conjunto con los datos de los países que pertenecen al proyecto. Para el cálculo del SPI se utilizó una serie histórica de datos de precipitación, desde el 01/01/1961 hasta el 31/12/2013 para 22 estaciones meteorológicas del Paraguay pertenecientes a la DMH-DINAC.

Este trabajo se encuentra como parte del proyecto del CRN-3035 (<http://serviciosclimaticos.blogspot.com>), y becada por el Instituto Inter-Americano (IAI) que es una organización intergubernamental compuesta de 19 países de las Américas dedicada a la búsqueda de la excelencia científica, la cooperación internacional y el intercambio abierto de información científica con el fin de mejorar la comprensión de los fenómenos del cambio global y sus implicancias socioeconómicas.

3.2.2 Datos grillados

Los datos utilizados para el análisis sinóptico son de reanálisis, del proyecto del National Center for Environmental Prediction y el National Center for Atmospheric Research (NCEP-ENCAR) (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds090.0/>). Los datos de reanálisis son datos que describen el estado de la atmósfera en una malla regular de puntos. Esto se logra al utilizar los datos obtenidos in-situ de las variables meteorológicas en una serie histórica y la simulación con modelos meteorológicos de manera a que se genere una malla regular de datos a diferentes niveles de la atmósfera. La resolución de los datos

grillados utilizados son de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ grados y de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ grados, es decir, para la primera resolución se tiene un valor de grilla cada 50 km aproximadamente, siendo una muy buena resolución para este trabajo, y con metodologías de interpolación mejorada.

Al ser un estudio de caracterización es adecuado que se utilicen todos los datos posibles y al ser de tipo climatológico se necesitan al menos de 30 años o más para la obtener los valores normales de las variables meteorológicas utilizadas para el análisis. Para el análisis sinóptico sólo se necesitó los datos de reanálisis para los eventos estudiados.

Se listan a continuación las estaciones meteorológicas a ser utilizadas:

- Estación 86011 – Adrián Jara, latitud 19.5 S, longitud 59.4 W
- Estación 86033 – Bahía Negra latitud 20.2 S, longitud 58.4 W
- Estación 86065 – Pratt's Gill, latitud 22.7 S, longitud 61.5 W
- Estación 86086 – Puerto Casado, latitud 22.2 S, longitud 58.1 W
- Estación 86068 – Mariscal Estigarribia, latitud 22.0 S, longitud 60.6 W
- Estación 86097 – Pedro Juan Caballero, latitud 22.6 S, longitud 55.9 W
- Estación 86128 – Pozo Colorado, latitud 23.3 S, longitud 59.2 W
- Estación 86134 – Concepción, latitud 23.4 S, longitud 57.5 W
- Estación 86170 – Gral. Bruguez, latitud 24.4 S, longitud 58.6 W
- Estación 86185 – San Pedro, latitud 24.1 S, longitud 57.1 W
- Estación 86192 – San Estanislao, latitud 24.7 S, longitud 56.4 W
- Estación 86210 – Salto del Guairá, latitud 24.1 S, longitud 54.5 W
- Estación 86218 – Asunción, latitud 25.2 S, longitud 57.7 W
- Estación 86221 – Paraguarí, latitud 25.8 S, longitud 57.3 W
- Estación 86233 – Villarrica, latitud 25.7 S, longitud 56.5 W
- Estación 86234 – Coronel Oviedo, latitud 25.3 S, longitud 56.4 W
- Estación 86246 – Minga Guazú, latitud 25.4 S, longitud 54.5 W
- Estación 86255 – Pilar, latitud 26.8 S, longitud 58.3 W
- Estación 86260 – San Juan Bautista, latitud 26.7 S, longitud 57.2 W
- Estación 86268 – Caazapá, latitud 26.2 S, longitud 56.4 W
- Estación 86285 – Capitán Miranda, latitud 26.9 S, longitud 55.8 W

- Estación 86297 – Encarnación, latitud 27.2 S, longitud 56.0 W

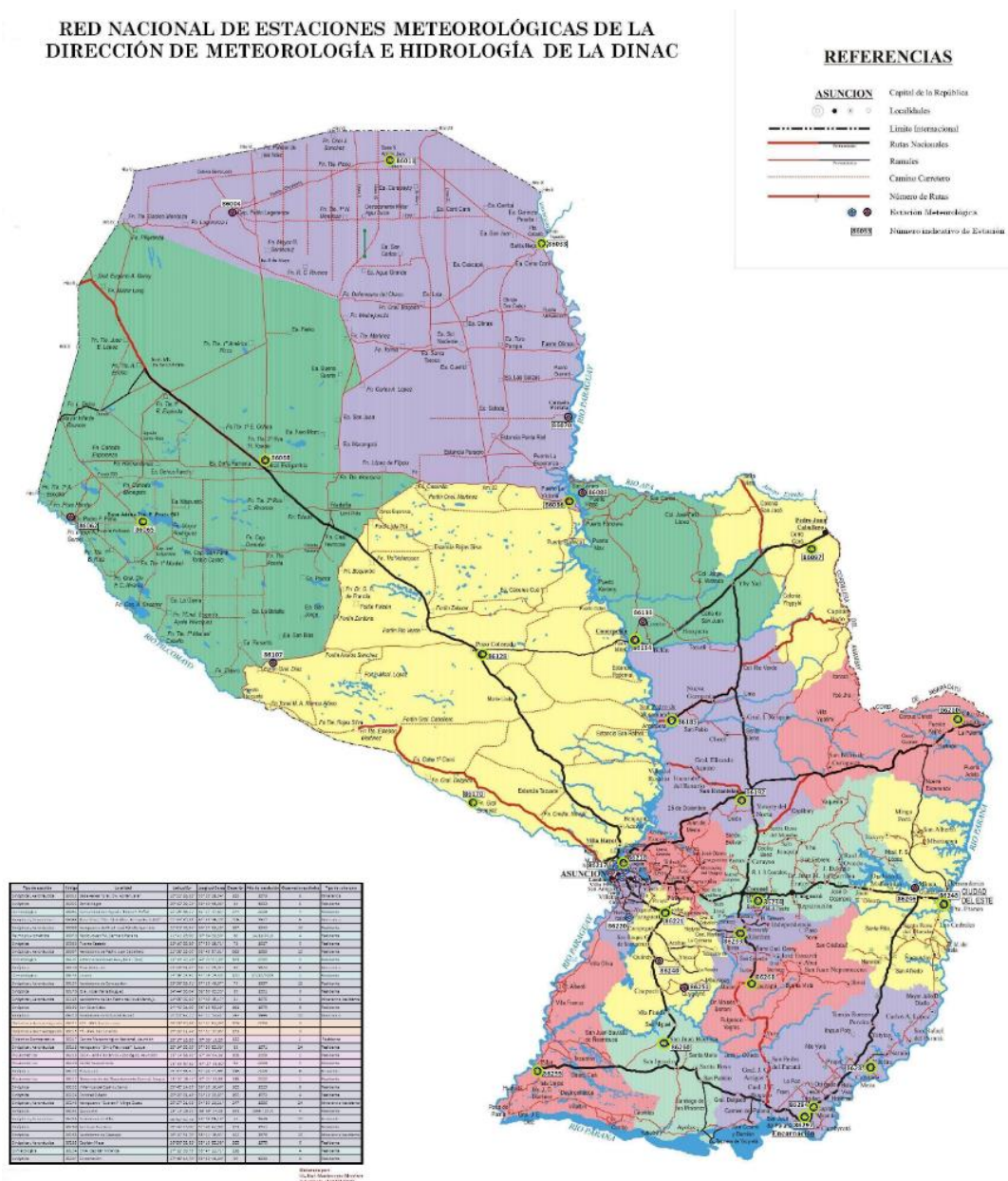


Figura 11: Localización de las estaciones utilizadas. Las estaciones están marcadas con un círculo verde limón.
Fuente (<http://www.meteorologia.gov.py/adm/uploads/Estaciones%20de%20la%20Red.JPG>)

3.3 Determinación de eventos de sequía

Cuando se calcula el SPI a diferentes escalas temporales, se determinan las anomalías de precipitación en una serie de tiempo. Estas anomalías pueden ser positivas, lo que nos

indican mayores acumulados de precipitación con respecto a una normal climatológica para cada mes, mientras que anomalías negativas indican un déficit en la precipitación media mensual. Como se observa en la **Figura 9**, valores positivos de SPI señalan periodos húmedos, mientras que valores negativos muestran periodos secos en la serie temporal de una estación meteorológica. Esto todavía no representa ni tampoco determina los eventos de sequía ya que solo se visualiza periodos secos que podrían no ser significativos a nivel meteorológico. Sin embargo, los periodos más extensos con déficits de precipitación y con valores muy negativos (intensidad) de SPI llaman la atención y podrían representar los eventos de sequía que se quieren estudiar. Es por eso que surge el siguiente cuestionamiento: si se quiere estudiar la sequía, sabiendo que son eventos que comienzan y terminan de forma errática y no muy bien definida, entonces, ¿cómo saber cuándo comienza y termina dicho evento?

La metodología aplicada para la determinación de eventos de sequía meteorológica fue primeramente propuesta por miembros del proyecto CRN-3035 del IAI debido a la problemática surgida en este trabajo (Reporte Técnico CRC-SAS-2015-001). Esta consiste en generar una serie temporal de valores de SPI-3 para cada estación meteorológica. Según McKee et. al. (1993) un evento de sequía se da cuando los valores de SPI son menores a -1 por lo menos tres meses consecutivos, cuyas categorías se da según la **Tabla 2**.

Para este trabajo se ha elegido analizar tres eventos de sequía meteorológica previamente determinados mediante el SPI-3, de tal forma a poder compararlas posteriormente y encontrar patrones repetitivos o similares entre eventos. Se eligió el SPI-3 ya que como se ha mencionado anteriormente, las escalas como las de SPI 2, 3, 6 están relacionadas a las anomalías de precipitación que afectan las condiciones de humedad del suelo, altura de ríos, arroyos, lagos, embalses, como también la disponibilidad para consumo a corto y mediano plazo. Sin embargo, las escalas temporales 9, 12, 24 y 48 están mejor relacionadas a anomalías de precipitación mucho más extensas que afectan a los recursos hídricos subterráneos y de reservorios como acuíferos y otros. No obstante, se puede emplear la misma metodología con otras escalas temporales dependiendo del tipo de sequía que se quiera estudiar. En este trabajo se ha estudiado solo a la sequía meteorológica; sin embargo, se sabe que ésta podría llevar a otros tipos de sequías más prolongadas.

Son varios los índices que pueden ser utilizados para identificar el comienzo y fin de una sequía. Se puede asumir que los eventos de sequía comienzan cuando el índice

utilizado toma valores por debajo de un umbral establecido, y finalizan cuando supera dicho umbral nuevamente. Por ejemplo, Lloyd-Hughes y Saunders (2002) utilizan el SPI para detectar ocurrencia de sequías, consideran que una sequía moderada ocurre cuando $SPI \leq -1$ y para una sequía extrema el umbral correspondiente es -2 . De esta manera, las características importantes que pueden estimarse para una sequía son:

- **Duración:** período durante el cual el índice se encuentra por debajo del umbral seleccionado;
- **Intensidad:** promedio de valores del índice durante el período en que el mismo está por debajo del umbral seleccionado
- **Magnitud:** acumulación del déficit por debajo del umbral seleccionado durante el período de la sequía - se estima como el producto de la duración y la intensidad.

Dado que un evento de sequía generalmente afecta simultáneamente áreas que se extienden más allá de una única estación meteorológica, otro factor a tener en cuenta para caracterizarla es la extensión del área bajo sequía. Otras características que describen las sequías incluyen el tiempo desde el inicio hasta que se alcance la máxima intensidad y el tiempo entre diferentes eventos (Mishra et al., 2009).

3.3.1 Evento de sequía 1976-1978

Mediante el SPI-3 se ha determinado el evento de sequía ocurrido entre los años 1976 y 1978, dividida en varios eventos secos, que engloban así al evento de sequía meteorológica. En la **Figura 18** se observa la serie temporal de algunas estaciones meteorológicas de Paraguay, que se ha tomado de distintos puntos del país para tener una idea general de la afectación espacio – temporal del evento. Cabe destacar que un valor de SPI-3 negativo significa que la media entre los dos meses anteriores al mes analizado y ese mismo mes, es menor a la normal (Para el cálculo de SPI se utilizó la normal climatológica 1971/2010), es decir, los dos meses anteriores y ese mes han sido más secos de lo normal.

Según esta metodología, en Asunción la sequía comenzó en el mes de abril con un primer pico en julio, terminando el primer periodo seco en mayo. A partir de ahí se registró un corto periodo neutro para que el SPI-3 disminuya de nuevo a valores menores a $-0,5$ durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 1977.

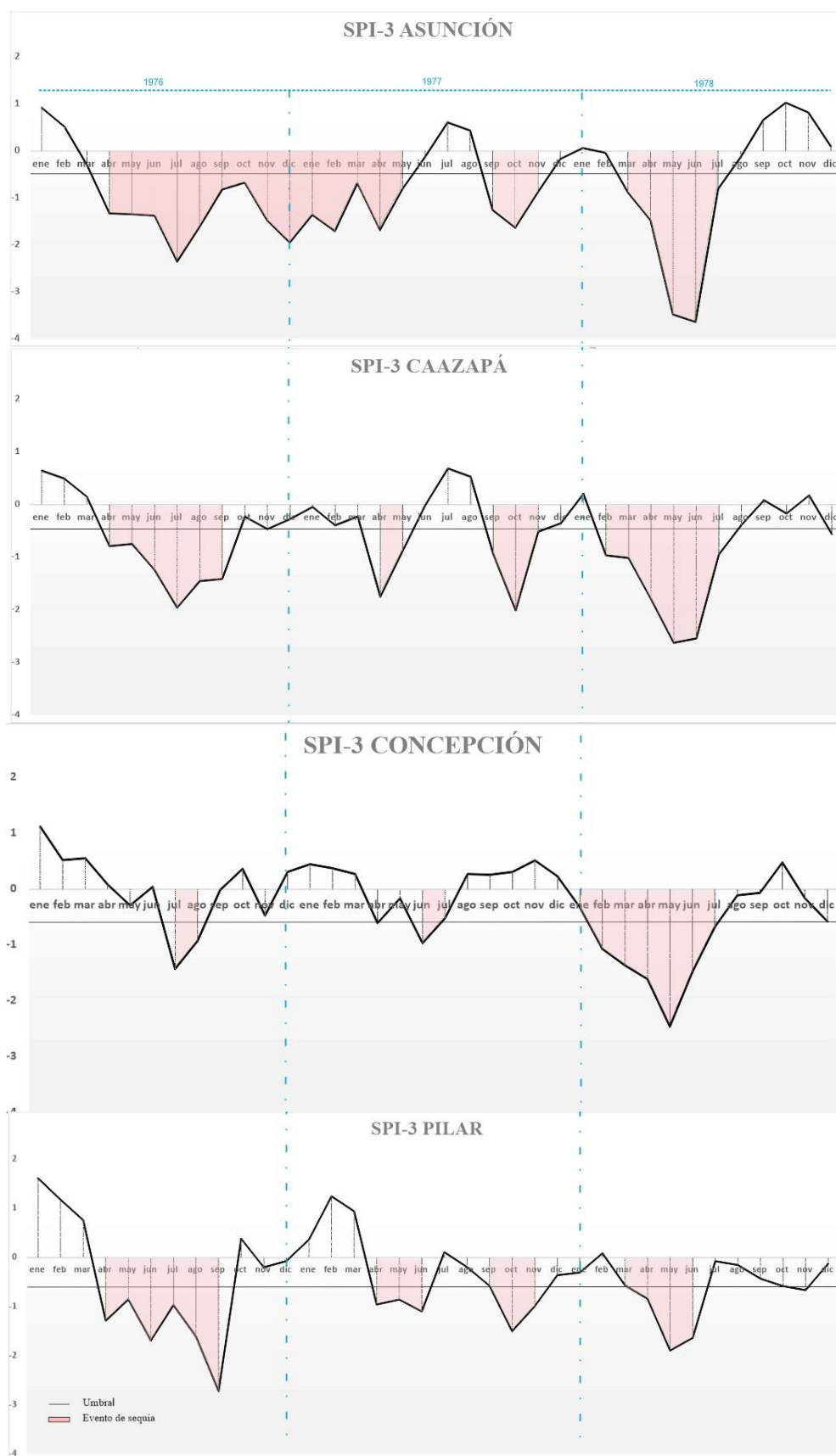


Figura 12: Serie temporal de SPI-3 de algunas estaciones meteorológicas del Paraguay. Se observa que las áreas sombreadas son los periodos secos determinados como eventos de sequía según la metodología utilizada.

El periodo seco más significativo se obtiene entre marzo y julio de 1978, donde en el mes de junio el SPI-3 tomó un valor de -3.67 en Asunción.

En Caazaapá y Concepción la situación fue similar con valores de SPI-3 moderados, lo que indica que esos eventos secos han sido periodos de un evento de sequía más prolongado. También en estas estaciones se puede observar valores muy negativos de SPI-3, específicamente en el mes de mayo de 1978. En un plano general de la **Figura 12** se observa fácilmente que entre los meses de enero y agosto de 1978 ha sido el periodo más intenso del evento de sequía ocurrido en ese entonces, en especial para las zonas del centro, este y norte del país, ya que en el sur (Estación de Pilar) la intensidad no ha sido tan representativa en comparación a las otras zonas.

El problema que surge en los análisis es la baja densidad de estaciones meteorológicas en el país, además de faltantes de datos en la serie histórica de muchas estaciones. Para el cálculo del SPI se necesita una buena cantidad de datos sin grandes vacíos en la serie temporal. De hecho, existen métodos para el rellenado de datos (Imputación) pero bajo ciertas condiciones.

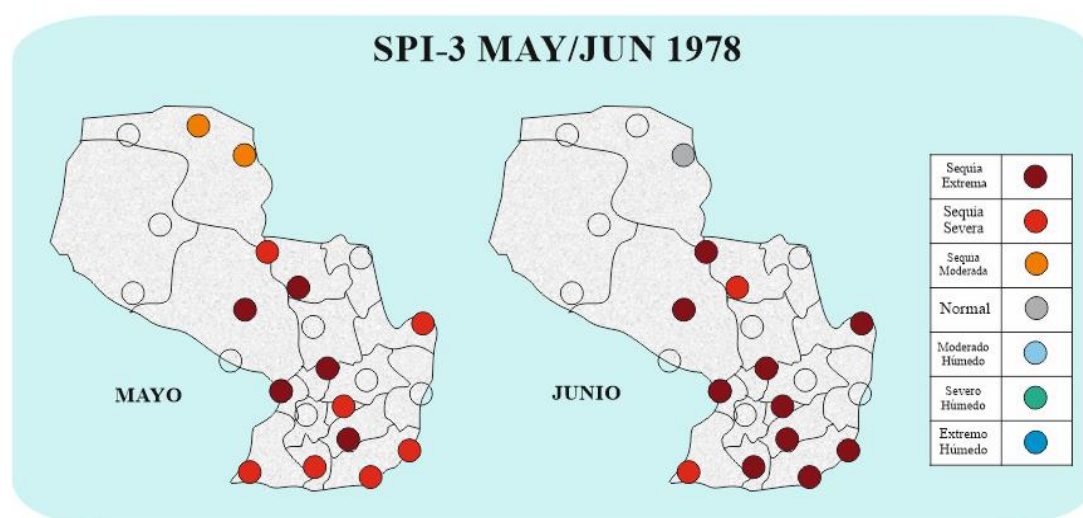


Figura 13: Categorías del SPI-3 para los meses de mayo y junio de 1978. Los círculos son las estaciones meteorológicas pertenecientes a la DMH-DINAC, cuyos datos fueron utilizados en este trabajo.

El umbral utilizado para la determinación de los eventos ha sido elegido a conveniencia. Siendo un estudio de casos, se puede admitir básicamente según los reportes de la prensa y demás medios, las zonas y la magnitud de los eventos de sequía. Al utilizar como umbral el valor de SPI -0,5, el periodo seco catalogado como sequía se aproxima cercanamente a lo ocurrido. Este valor de umbral puede variar según ciertas consideraciones, ya que se necesitaría de un estudio de campo para encontrar un valor de

umbral más exacto y que incluso podría variar según zonas climáticas o por otros factores. No se ha profundizado en este tema ya que escapa de los objetivos principales del trabajo, y que por su complejidad podría estar abierto a otros estudios.

Para este trabajo, el acumulado total de un mes (por ejemplo junio de 1978) está determinado por la suma del total de precipitación caída en ese mes, y solo se permite hasta tres valores diarios faltantes dentro del mismo, sin importar la secuencia. Si el cálculo no se puede realizar, el valor mensual se registra como no disponible (Informe técnico CRC-SAS-2015-001). Esto genera problemas a la hora del cálculo del SPI en el caso de que no haya valores disponibles (Círculos transparentes de la **Figura 13**). Una vez definido a la sequía en escala temporal y espacial, se determina la duración y el momento en qué afectó ese evento.

3.3.2 Evento de Sequía 2008/2009

En la **Figura 20** se observa la serie temporal desde enero del 2008 hasta diciembre del 2009 de algunas estaciones meteorológicas en donde según los valores, en Asunción el evento comenzó en junio del 2008 con un primer pico en diciembre del mismo año y luego otro en abril del 2009, terminando ese mismo mes.

El evento fue menos prolongado hacia el sur del país, en donde por ejemplo se ha tomado las estaciones de Pilar y Encarnación. En Pilar la sequía más intensa se produjo a comienzos del 2008 con valores por debajo de -3, luego se tiene otros dos eventos aislados en enero y abril del 2009 con valores de SPI-3 rondando -2. En Encarnación, según la serie temporal la sequía comenzó en diciembre del 2008 para luego extenderse hasta junio del 2009, con un mínimo en enero de ese mismo año.

Más al Este, en Pedro Juan Caballero, el evento de sequía comenzó en enero del 2009 y terminó en junio de ese mismo año, con un mínimo en abril. Se puede observar en la **Figura 14** que todas las estaciones muestran el evento en particular extendiéndose entre diciembre del 2008 y mayo del 2009, con sus respectivas variaciones. También se puede percibir un posible desplazamiento SO-NE del evento, comenzando tempranamente hacia el sur del país en el 2008, y luego afectando al norte en 2009. Este movimiento podría ser aleatorio, solo en este evento, como también podría estar asociado a un patrón característico.

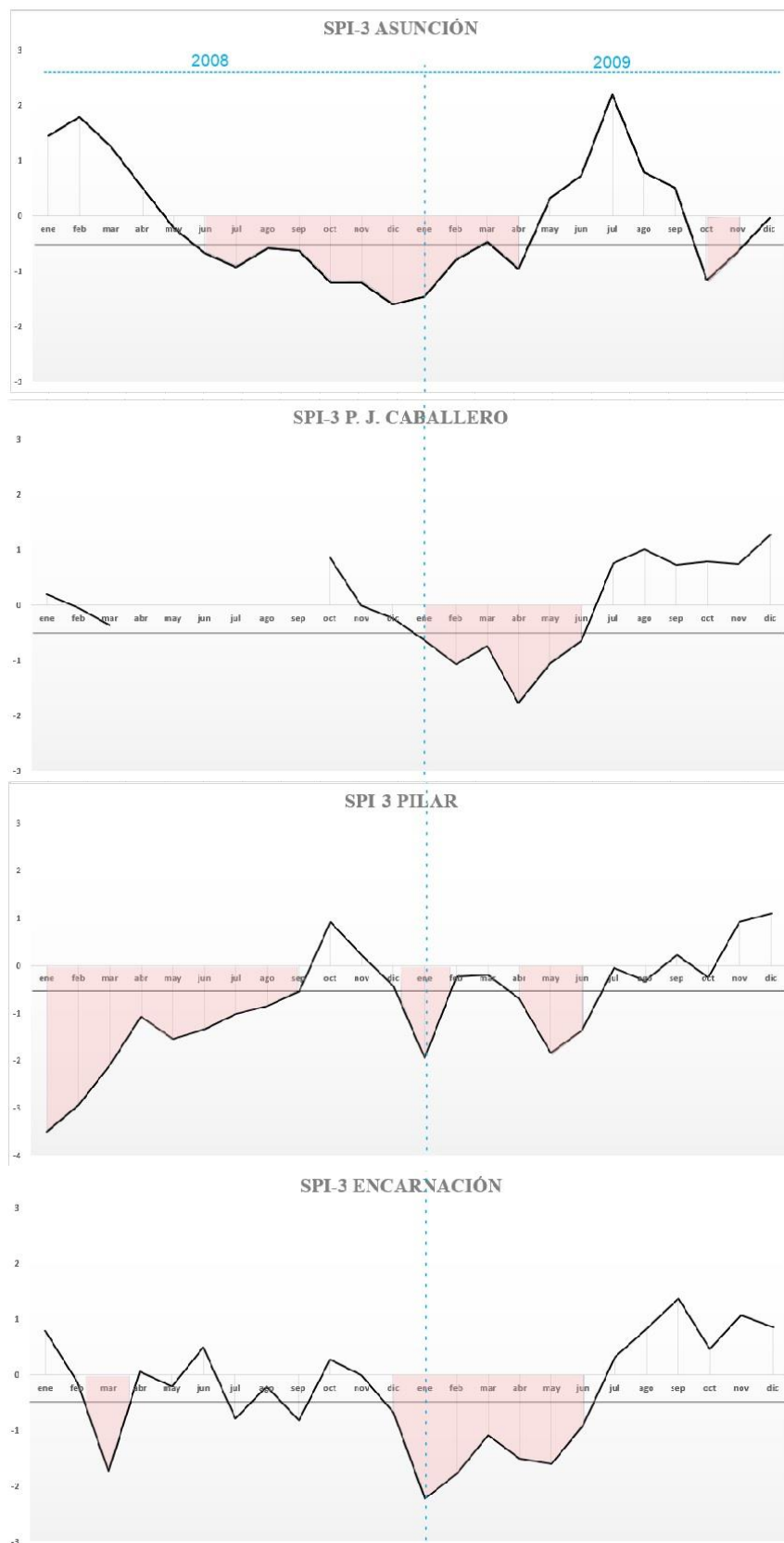


Figura 14: Serie temporal de SPI-3 de algunas estaciones meteorológicas del Paraguay. Se observa que las áreas sombreadas son los periodos secos determinados como eventos de sequía según la metodología utilizada.

Los resultados se muestran en mapas mensuales de tal forma a determinar la longitud espacial de la sequía. Así se obtiene el gráfico de la **Figura 15**, en donde se observa los valores de SPI-3 en una escala de colores determinado por lo visto en la **Figura 14**, y así poder observar las zonas de mayor y menor intensidad del evento que afectó al país.

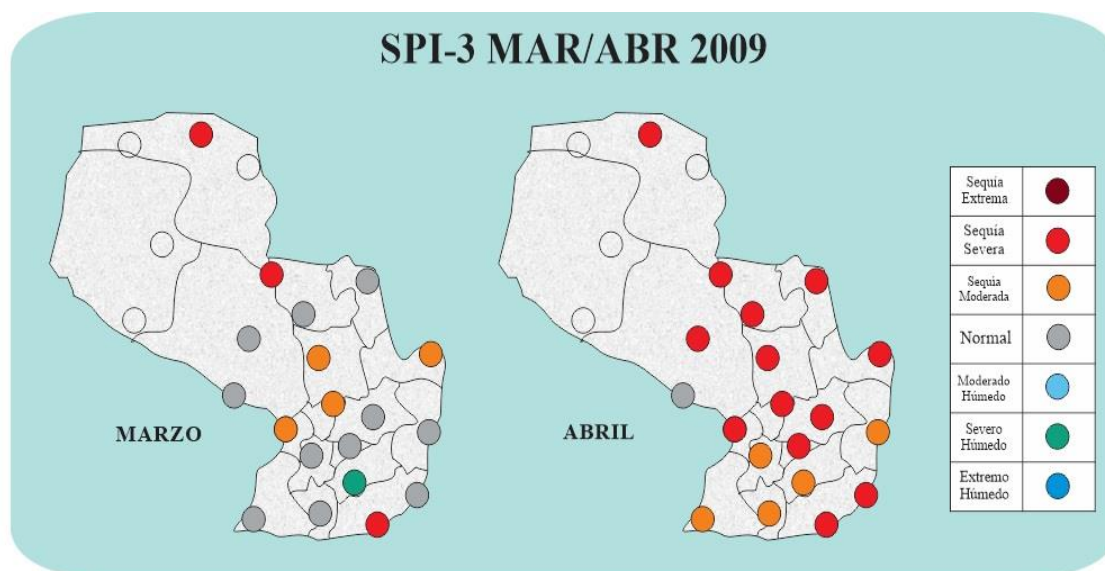


Figura 15: Distribución espacial del SPI-3 para marzo y abril del 2009. Los círculos representan a cada una de las estaciones meteorológicas y los colores según el valor del SPI.

Según la distribución de valores de SPI-3 en la **Figura 15**, se observa que la zona más afectada por este evento en el mes de abril y los dos meses anteriores fue el Este, parte del Centro y Norte de la Región Oriental, siendo la zona Sur la menos afectada. Similar situación ocurrió con los meses anteriores, teniendo una leve oscilación de intensidad de Oeste a Este, desde el inicio de la sequía hasta su fin. Es por eso que para el mes de diciembre, en la **Figura 14**, se observa un pico negativo en los valores de SPI-3 para luego tener una tendencia a valores positivos y disminuir la intensidad de la sequía.

3.3.3 Evento de Sequía del 2011/2012

Entre los años 2011 y 2012 ocurrió un evento de sequía que afectó en especial a la zona este y sur del país. En algunos puntos el evento comenzó entre noviembre y diciembre del 2011 (**Figura 16**) como por ejemplo en la estación de Ciudad del Este, mientras que en otros como la estación de Asunción comenzaron en los primeros meses del 2012. Llama la atención lo que se observa como ejemplo en la serie temporal de la estación de La Victoria, donde antes que tener un evento seco, se produjo anomalías de precipitación muy por encima de la normal, y que perduró por bastante tiempo.

Comenzó en agosto del 2011 y se extendió inclusive hasta agosto del año siguiente, con valores picos de SPI-3 entre 2 y 2,5. Esto se observa mejor en la **Figura 17**, donde se ve que gran parte de la región oriental estuvo bajo la influencia de la sequía en los primeros meses del 2012, en especial en el sur del país donde según los reportes de prensa de aquellos meses también coinciden en que este evento afectó a la producción de soja en esas zonas. A diferencia de los eventos anteriores, la sequía que afectó entre el 2011 y 2012 fue de débil a moderada; sin embargo, los perjuicios causados fueron cuantiosos ya que afectó a zonas rurales que dependen de los recursos hídricos para el uso en la plantación y el ganado.

Y su característica más peculiar es el evento opuesto a la sequía en el norte de la región oriental y Este del Chaco, donde las anomalías de precipitación medidos por el SPI son bastante positivos. Esto habría sucedido por acumulados importantes de lluvia que superaron ampliamente la normal climatológica, y asociado a esto la peresistencia de los sistemas convectivos en esas zonas, mientras que a partir del centro y sur del país se instaló casi en el mismo periodo de tiempo una sequía de intensidad considerable.

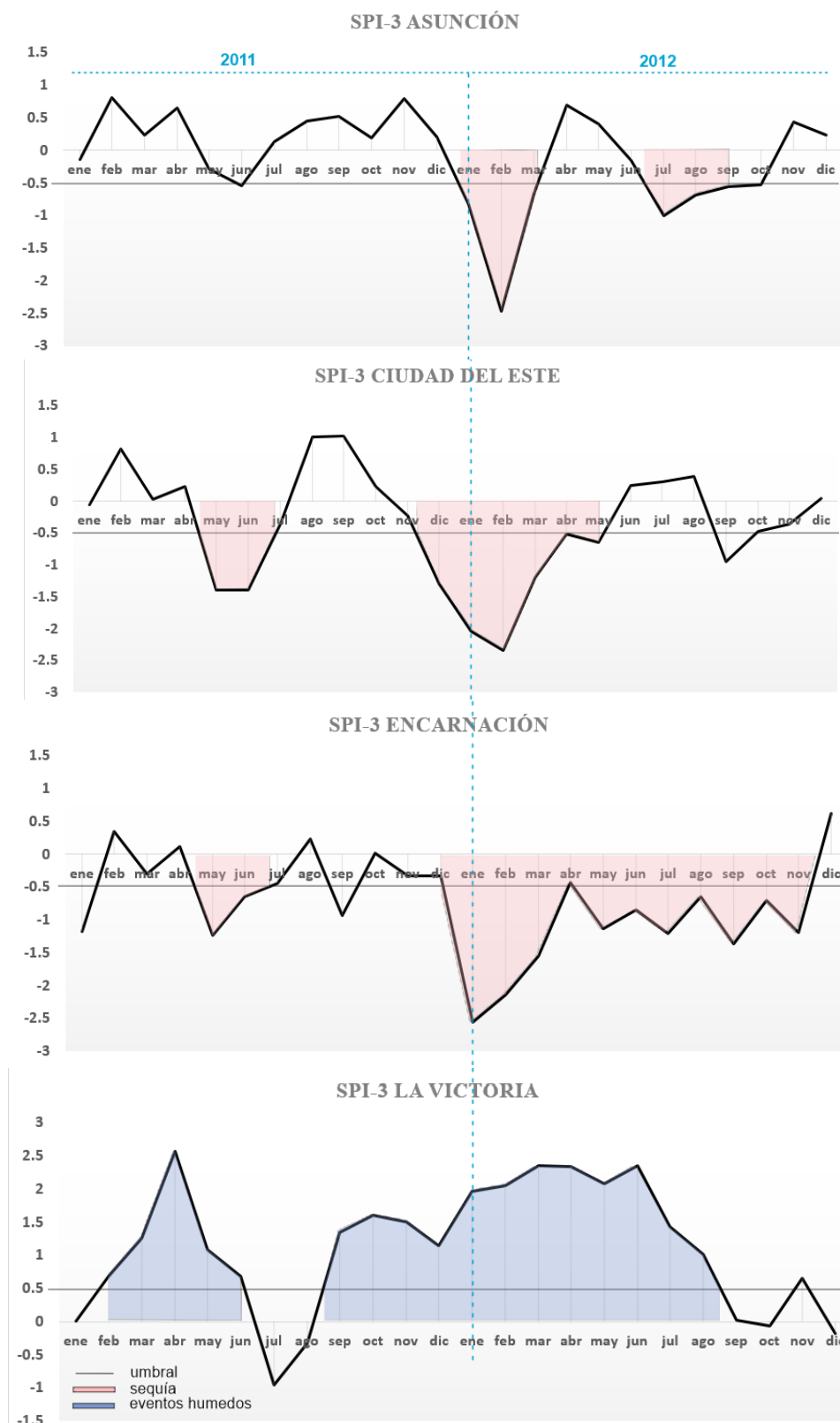


Figura 16: Serie temporal de SPI-3 para el evento ocurrido entre los años 2011 y 2012. Se considera sequía si se obtienen valores menores a -0,5 por lo menos tres meses seguidos.

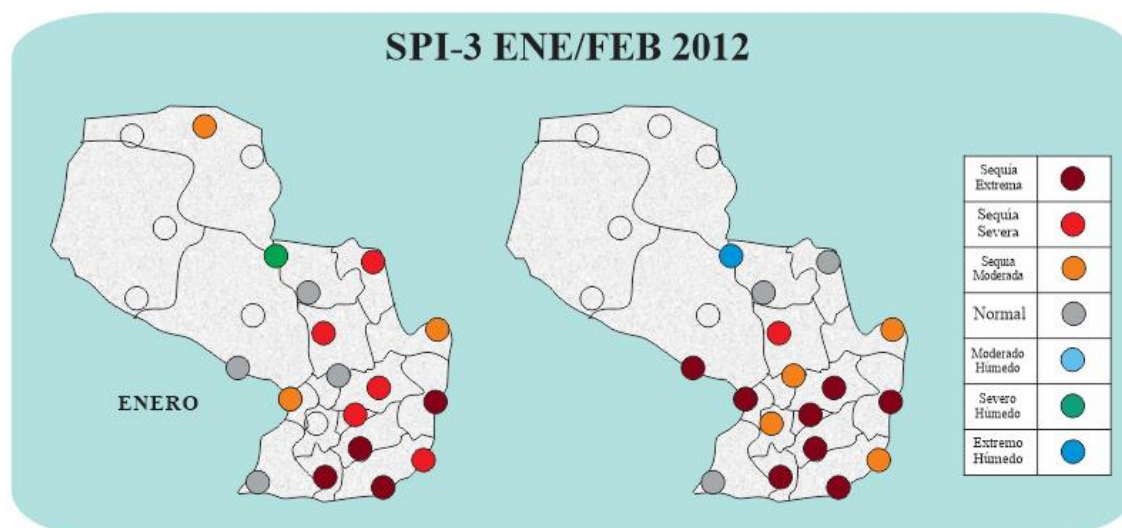


Figura 17: Distribución espacial del SPI-3 para enero y febrero de 2012. Los círculos representan a cada una de las estaciones meteorológicas y los colores según el valor del SPI.

3.4 SPI Areal

Cuando se generan mapas con valores de SPI-3 por cada estación (como las **Figura 12,14,16**) o mapas mensuales de SPI-3 para todas las estaciones (como el de la **Figura 13,15,17**), resulta difícil visualizar la longitud espacial y temporal del evento sin tener una cantidad importante de mapas para analizar. La solución al problema de la cantidad de gráficos y mapas a analizar es generar un gráfico donde se pueda visualizar las anomalías de precipitación en un área determinada en un periodo de tiempo limitado por la metodología de determinación de sequías. En la **Figura 18**, se observan las medias areales del SPI-3 para los eventos de sequía estudiados. Esta consiste en calcular el promedio de valores de SPI-3 de todas las estaciones meteorológicas de Paraguay por mes y pasarlos a un gráfico. De esta forma se puede tener una idea de las anomalías de precipitación en un área determinada y su evolución con el tiempo.

En el caso del evento de sequía del 2008/2009, la media areal del SPI-3 es parecida a lo observado en la **Figura 20**, donde determinamos que el evento estudiado comenzó alrededor de mayo a junio del 2008 y se extendió hasta fines de abril del 2009. También se observa que de los tres eventos analizados, el de mayor magnitud fue el ocurrido entre 1976 y 1978, como se ve en la **Figura 24a**, primeramente por su persistencia como también por su magnitud.

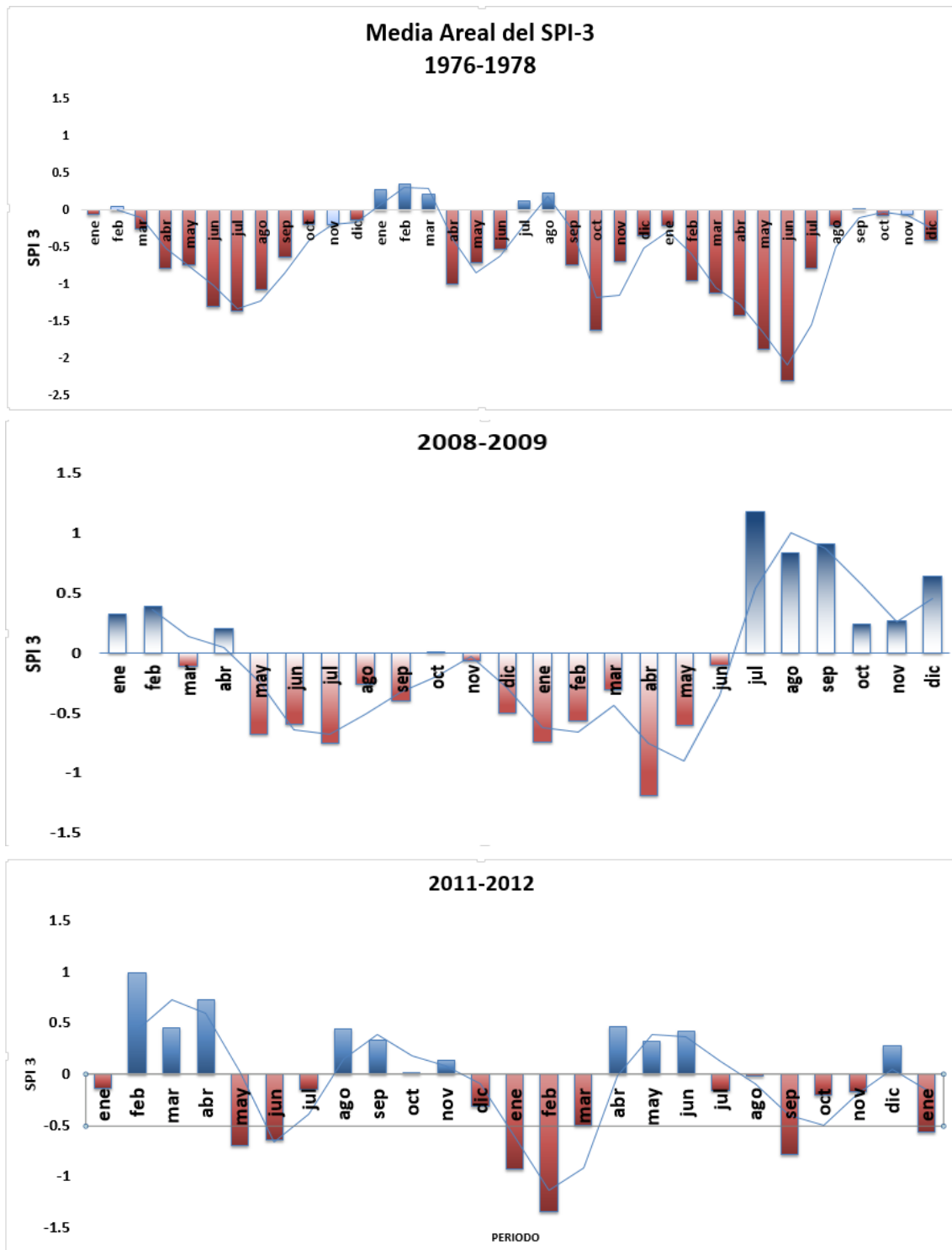


Figura 18: Media areal del SPI-3 de algunos eventos de sequía que afectaron al Paraguay. Es una forma de expresar el grado de afectación del evento en un área delimitada por las estaciones meteorológicas de Paraguay.

Las diferencias son lógicas ya que se ha calculado abarcando un área delimitada por las estaciones meteorológicas. Se entiende que en algunas zonas los valores de SPI-3 son más intensos que en otras. Para esta clase de observaciones más específicas sirven los gráficos como el de las **Figuras 13, 15, 17** donde se pueden discriminar las zonas con menor o mayor intensidad de un evento en periodos mensuales. Sin embargo, con lo observado en la **Figura 18**, se pretende visualizar en un gráfico cómo afectó el evento al área delimitada por las estaciones.

Estos gráficos son muy importantes ya que se utilizarán más adelante para validar el SPI con los análisis sinópticos. Uno de los principales objetivos es observar un patrón característico en la dinámica atmosférica que valide lo que ocurre en superficie, es decir, una forma de explicar a escala sinóptica el déficit de precipitaciones en nuestro país durante los eventos estudiados.

Esta misma metodología se puede utilizar para encontrar otros eventos, no solo en Paraguay sino en cualquier parte del mundo, ya que una de las características del SPI es que no hace referencia a la zona climática, sino que se puede aplicar a cualquier región donde se quiere hacer estudio de las condiciones secas y húmedas, debido a que sólo utiliza como variable la precipitación.

4. Resultados. Análisis Sinóptico de los Eventos

Una vez que se han determinado los eventos de sequía, utilizando el SPI para observar las condiciones de dichos eventos en superficie. Como la variable utilizada para este índice es la precipitación, se sabe que durante estos eventos, ocurre un déficit importante de este elemento meteorológico durante un tiempo prolongado. A partir de este factor se busca las causas que inhiben la ocurrencia de lluvias en el Paraguay, y qué patrones en la dinámica atmosférica son característicos para el desarrollo de un evento de sequía, y así reflejar las anomalías de precipitación a causa de la falta de condiciones para el desarrollo de la convección sobre el Paraguay y regiones cercanas.

En este trabajo se ha analizado los eventos de sequías ocurridos entre los años 1977/1978 y el de los años 2008/2009, como ejemplos de la metodología utilizada. Se describirá las condiciones medias en la que se encontró el sistema atmosférico en sus diferentes niveles, se comparará ambos eventos con la intención de encontrar similitudes entre ambos.

Para el análisis de la circulación atmosférica se trazaron mapas en los niveles de 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 250 hPa, abarcando así los niveles bajos, medios y altos de la atmósfera. Las variables utilizadas para la elaboración de mapas de altura varían según el nivel y según los aspectos que se quieran observar. Los mapas generados con las variables utilizadas según la altura se muestran a continuación:

- Nivel 850 y 700 hPa: mapas de líneas de corrientes y anomalías de humedad relativa; anomalías del flujo de humedad.
- Nivel 500 hPa y 250 hPa: líneas de corrientes; anomalías del flujo de humedad.

Es importante tener en cuenta que los gráficos han sido elaborados con valores medios mensuales de las variables mencionadas anteriormente. Esto significa que los patrones observados de la circulación atmosférica están en términos de persistencia de dicha circulación, y no como un sistema permanente, pudiendo haber sistemas dinámicos que por su corta duración son suavizados por la media estadística. La normal climatológica utilizada es la 1971/2000 que permitirá hallar las anomalías de las variables utilizadas en el análisis.

Para la normalización de estas variables se tomó 30 años de datos, que halla la media de cada uno de los meses del año, según la ecuación de la media estadística

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 1.1$$

Apartir de la ecuación **5.1** se halla las anomalías de humedad específica y viento. Las anomalías con respecto al ciclo anual, por ejemplo para datos medios mensuales, el ciclo se define como el promedio de todos los meses de enero, febrero, etc, del periodo de registro. Las anomalías estandarizadas z se calculan restando la media y dividiendo por la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad 1.2$$

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad 1.3$$

Como las anomalías ya tienen media nula, basta con dividir por la desviación estándar. Una de la ventajas de usar las anomalías es que ya están estandarizadas, son adimensionales con desviación estándar igual a 1. Esto sirve para comparar diferentes variables entre sí más fácilmente. Como el SPI es un índice estandarizado, esta metodología es de mucha utilidad para comparar dicho índice con las anomalías de las variables atmosféricas que predominan en la circulación de los diferentes niveles de la atmósfera.

4.1 Análisis del evento de sequía ocurridos entre 1976 y 1978

Como se mostró anteriormente, según la metodología aplicada utilizando el SPI para la determinación de eventos de sequía, a partir de 1976 se produce una sequía de intensidad moderada a fuerte sobre todo el territorio paraguayo, con dos picos de intensidad que se encuentran aproximadamente entre junio y julio de 1976 y 1978 respectivamente (**Figura 18.a**). Esto debió suceder a causa de la falta de precipitaciones durante esos meses, por debajo de la normal climatológica. En la atmósfera existen varias forzantes que pueden interactuar entre ellas para inhibir la convección y así mismo las precipitaciones.

4.1.1 Nivel de 850hPa

Para el análisis de los niveles bajos de la atmósfera se graficó líneas de corrientes. En él se puede observar la circulación media mensual en esos niveles, como también zonas de confluencia y difluencia. Acompañado a las líneas de corrientes también se graficó las anomalías de humedad específica.

En la **Figura 19** se puede observar que para los meses de octubre y noviembre las líneas de corrientes indican un JCB presente con dirección media Nor-Noreste en octubre y Noroeste para noviembre. Las líneas confluyen en el Norte del país con anomalías positivas de humedad en gran parte del Chaco paraguayo. En diciembre la condiciones se presentan cercanas a la normal; sin embargo, a partir del mes de enero la configuración tiende a anomalías negativas de humedad en todo el trayecto del JCB, que va desde le Sur de Perú, pasando por el Altiplano boliviano, norte argentino y gran parte de Paraguay.

En febrer, se intensificó las anomalías negativas en toda la Región Oriental, en especial al este del país, posiblemente por un debilitamiento del JCB, esto se puede observar por la difluencia de las líneas sobre territorio paraguayo. Situación sismilar se obsevo en el mes de marzo, donde las anomalías negativas más significativas se encontraron en la zona Centro y Norte del Chaco, afectando también a todo el centro del Brasil. Incluso en abril del 1978, la persistencia de circulaciones anticiclónicas en capas bajas acentuaron el déficit de humedad en esos niveles y ayudaron a inhibir la formación de nubes de desarrollo vertical. Esta situación se mantuvo hasta el mes de mayo, que también se encontró bajo la influecia de masas de aire más secas de lo normal que afectó todo el territorio pero con mayor intensidad en la región oriental.

Apartir del mes de junio, la circulación en niveles bajos de nuevo entró en una etapa de condiciones normales para la región occidental y parte del Chaco; sin embargo, en agosto de nuevo se encontró con un déficit de humedad en ese nivel, siendo un mes en donde el JCB no se encuentra muy activo en comparación con los meses del periodo cálido. Las anomalías negativas de humedad se refieren al déficit en el flujo del mismo sobre territorio paraguayo, como los sistemas de tormentas en esa época son en su mayoría producto de sistemas frontales; de igual manera; el desarrollo vertical de las nubes está sujeto a la cantidad de humedad que pueda encontrar en los niveles atmosféricos, como también de la configuración del sistema frontal.

Anomalía de Humedad y Líneas de Corriente en 850hPa

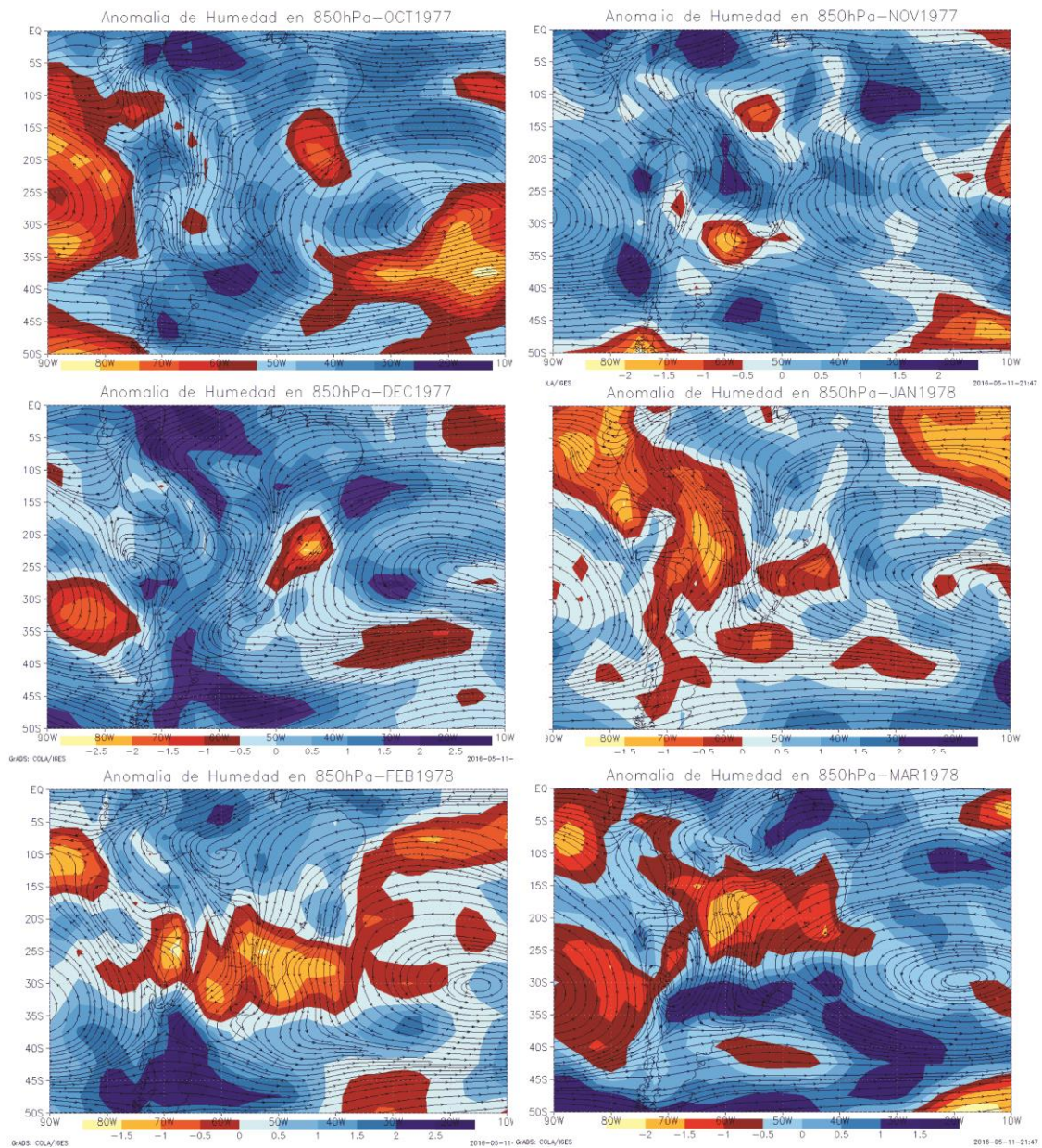


Figura 19: Anomalia de humedad y Líneas de corriente en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalía de Humedad y Líneas de Corriente en 850hPa

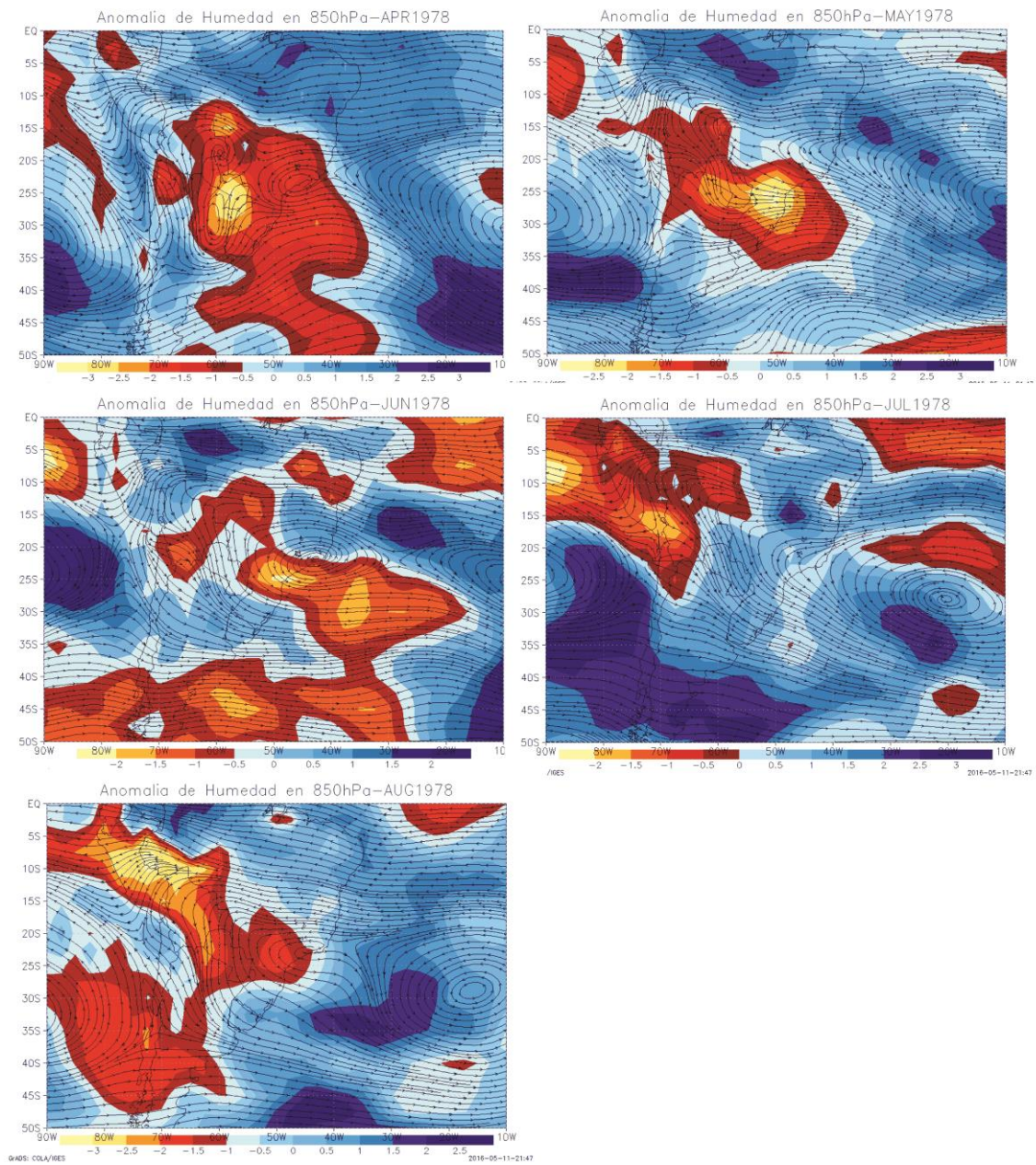


Figura 19: Anomalía de humedad y Líneas de corriente en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Otra forma de observar la cantidad de humedad disponible en la atmósfera, en especial en los niveles, bajos es mediante la ecuación (3.4) del flujo de humedad en la dirección del vector viento. Con él se puede definir las zonas con un transporte deficiente de humedad en el aire dada por el sentido del vector, la cantidad de humedad transportada que está representada por la magnitud escalar, y la anomalía de este transporte dada por la dirección y tamaño del vector.

En comparación al análisis de la **Figura 19**, al graficar las anomalías del flujo de humedad mensual para este evento de sequía (**Figura 20**) se observa de manera similar la misma configuración, un déficit de humedad y un transporte casi nulo a partir del mes de diciembre, afectando principalmente el Norte del Chaco pero con buen aporte de humedad en el Sur de la Región Oriental. Las anomalías negativas se extendieron luego a todo el territorio paraguayo a partir de febrero, intensificándose en abril con mayor intensidad en el Norte de la Región Oriental, persistiendo hasta junio. A partir de julio y agosto el flujo de humedad fue cercano a lo normal.

Existen ligeras diferencias en los gráficos de anomalías de humedad específica y las anomalías del flujo de humedad. Estas diferencias son entendibles, ya que en la **Figura 19** se observa la disponibilidad neta de humedad que puede contribuir la masa de aire de ese nivel para la convección, mientras que la **Figura 20** muestra el flujo, la cantidad de vapor de agua que ingresa en la masa de aire y que se concentra en ella. Si se analiza desde el punto de vista sinóptico y no climático, la disponibilidad de humedad es importante para el inicio de la convección y su primer desarrollo; pero, el flujo de humedad es importante para la intensificación y durabilidad de los sistemas convectivos.

Como aquí los valores muestran anomalías de estas variables en términos medios mensuales, se entiende que el déficit de humedad disponible en ese nivel está relacionado al déficit de advección de humedad en la masa de aire. Esto provoca que cualquier tipo de (activadores) tenga dificultades para generar convección profunda, ya que no posee apoyo en los niveles donde el aporte de humedad es pobre.

Anomalía del Flujo de Humedad en 850hPa

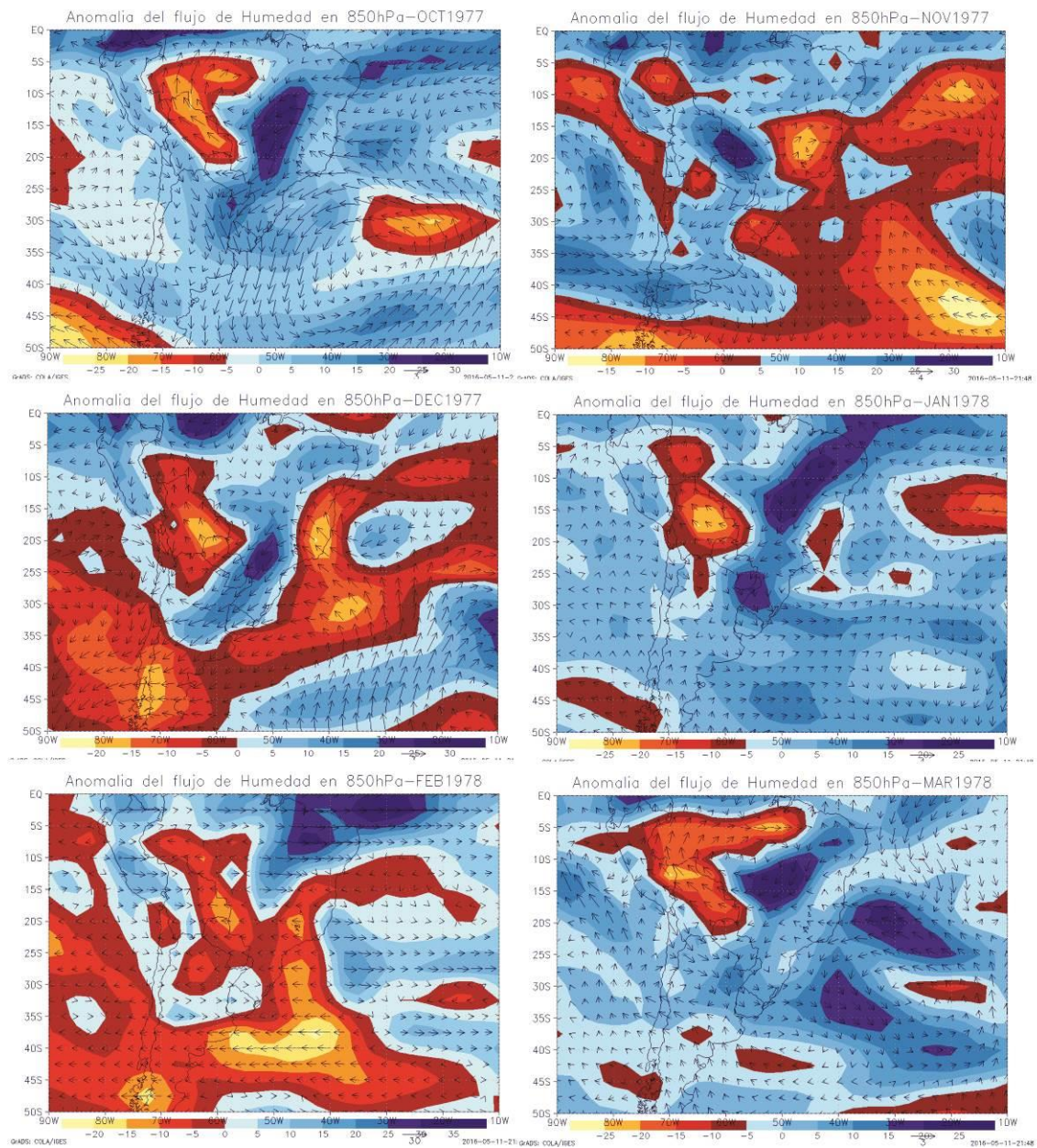


Figura 20: Anomalías del flujo humedad en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia del Flujo de Humedad en 850hPa

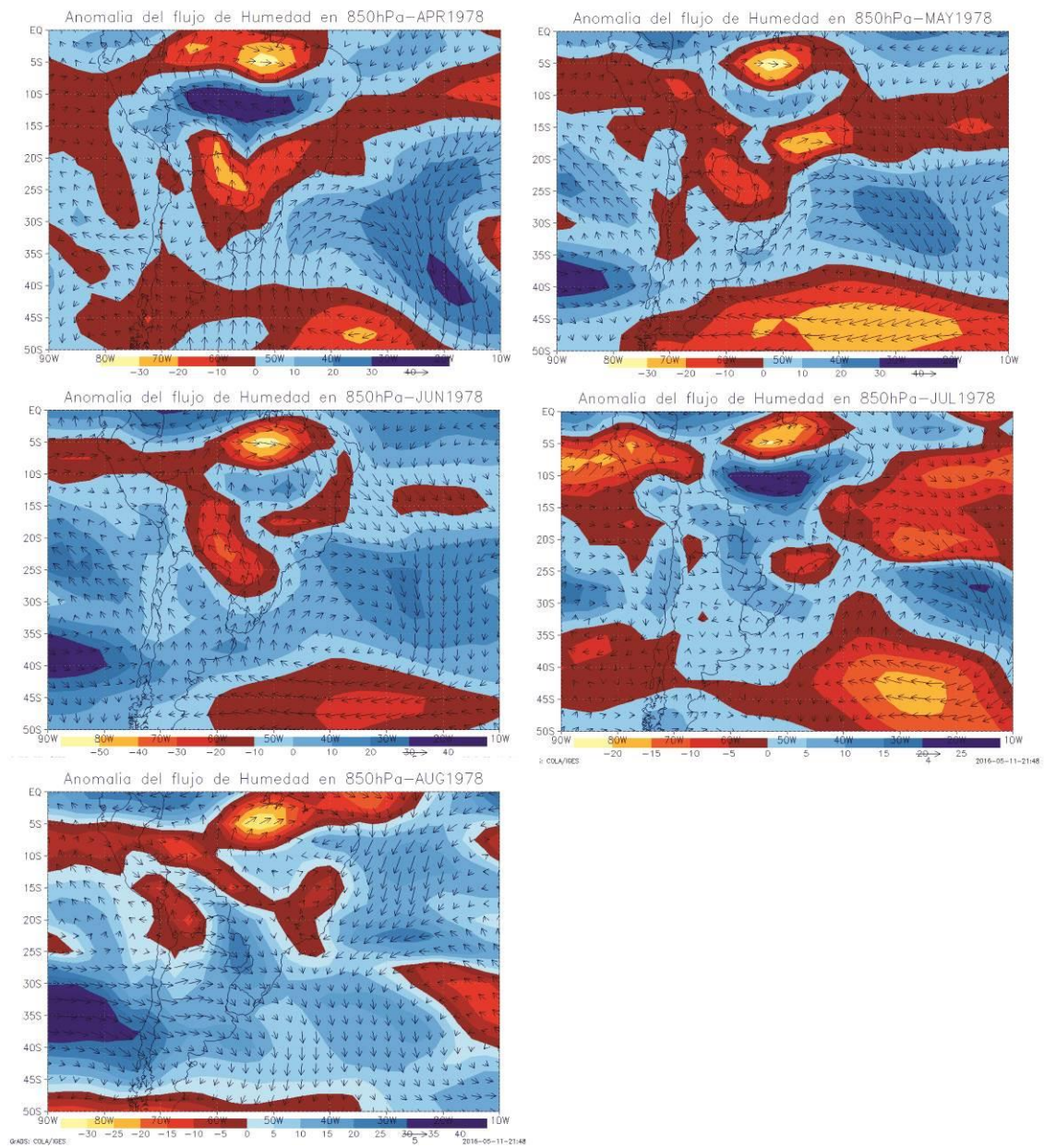


Figura 20: Anomalías del flujo humedad en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

4.1.2 Nivel de 700hPa

La configuración atmosférica en este nivel es similar al observado en el nivel de 850hPa, incluso las anomalías negativas relacionadas al déficit de humedad en esta capa, son mucho más persistentes. Como se ve en la **Figura 21**, a partir del mes de octubre se observa que existen anomalías negativas de humedad específica sobre todo el territorio paraguayo. La dirección del viento en términos medios mensuales se encontró cercano a lo normal, pero sin un gradiente importante en su intensidad, levemente difluente, a causa de un anticiclón cuyo centro se encontraba sobre el noreste brasileiro.

Esta situación persistió hasta diciembre, con un pequeño anticiclón sobre el noroeste argentino afectando también a gran parte del país, con direcciones del viento anómalas. En enero persistieron las anomalías negativas de humedad en el Chaco, mientras que para la Región Oriental estuvo cercano a lo normal.

Todo lo contrario se observa en febrero donde los valores anómalos se intensifican en todo el territorio paraguayo, pero en especial en el sur de Brasil. En marzo la persistencia de un sistema anticiclónico y el déficit de humedad en la región suponen que de ninguna forma podría este nivel apoyar algún tipo de convección local. La situación seguiría de forma similar durante abril con valores negativos máximos de las anomalías de humedad en el mes de mayo, afectando en especial al este y norte de la Región Oriental, pero con influencia en toda la región.

Junio, julio y agosto se encontraron bajo la misma situación de meses anteriores, lo que deja en claro el gran déficit de humedad que experimentó este nivel durante el evento de sequía estudiado. Hasta el momento, se ha observado que los niveles bajos de la atmosfera se encontraban bajo la persistencia de sistemas anticiclónicos que inhibirían la formación de nubes que puedan generar precipitaciones, y sumando a esto la falta de vapor de agua, dificultaría bastante el proceso de convección.

Analizando el flujo de humedad en este nivel (**Figura 22**), también se encuentra similitudes acerca de la disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera. Claramente deficitario la situación ya desde octubre hasta diciembre, con meses levemente neutros como enero o marzo. Sin embargo, a partir de abril, también coincidiendo con los gráficos de la **Figura 21**, las anomalías del flujo de humedad van tomando valores más negativos hasta el mes de agosto. Con esto se entiende que la circulación que persistió durante este evento fueron los sistemas anticiclónicos persistentes en todos estos meses, disminuyendo el flujo de humedad sobre territorio paraguayo y zonas vecinas.

Anomalía de Humedad y Líneas de Corriente en 700hPa

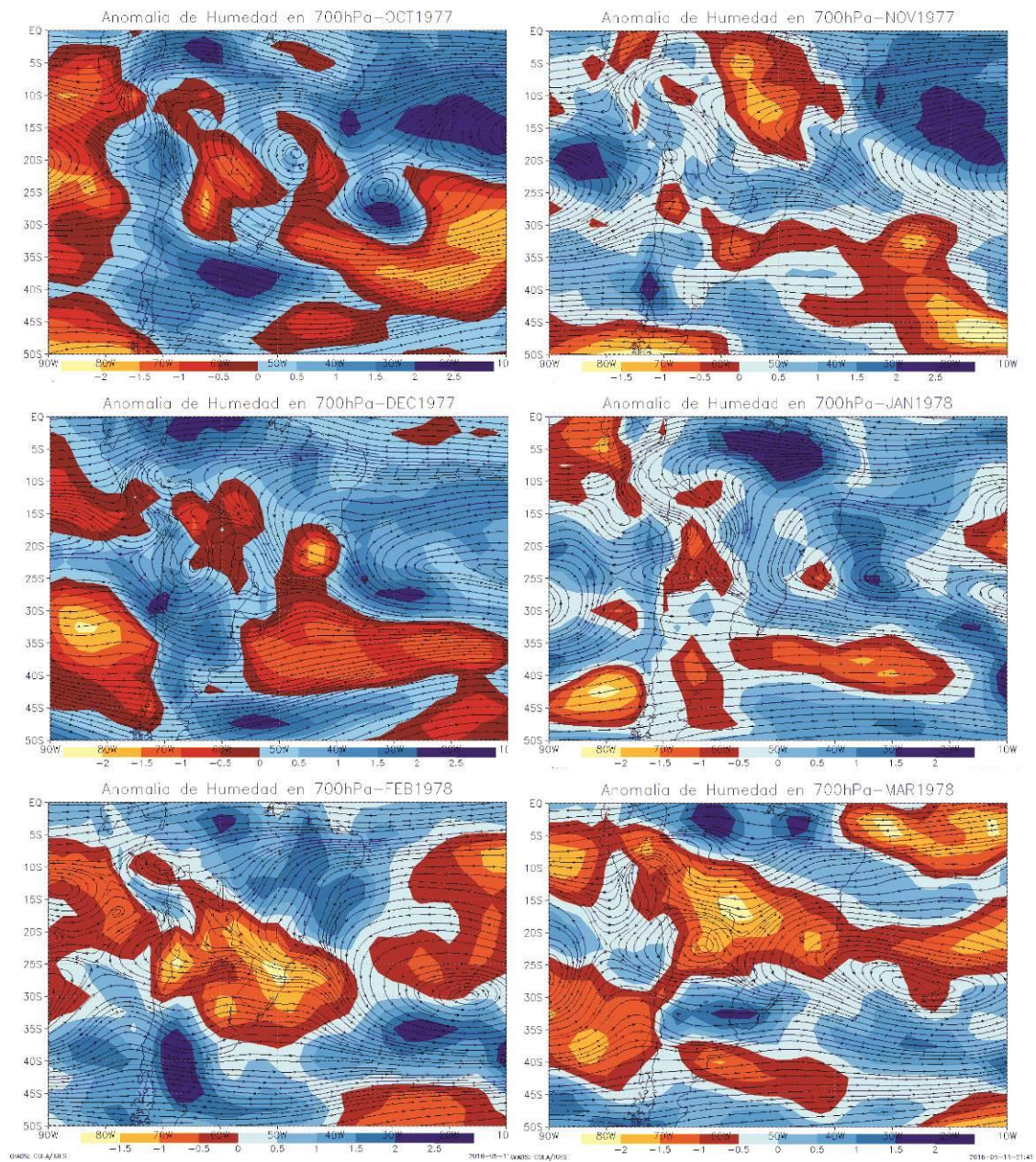


Figura 21: Anomalia de humedad y Líneas de corriente en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia de Humedad y Líneas de Corriente en 700hPa

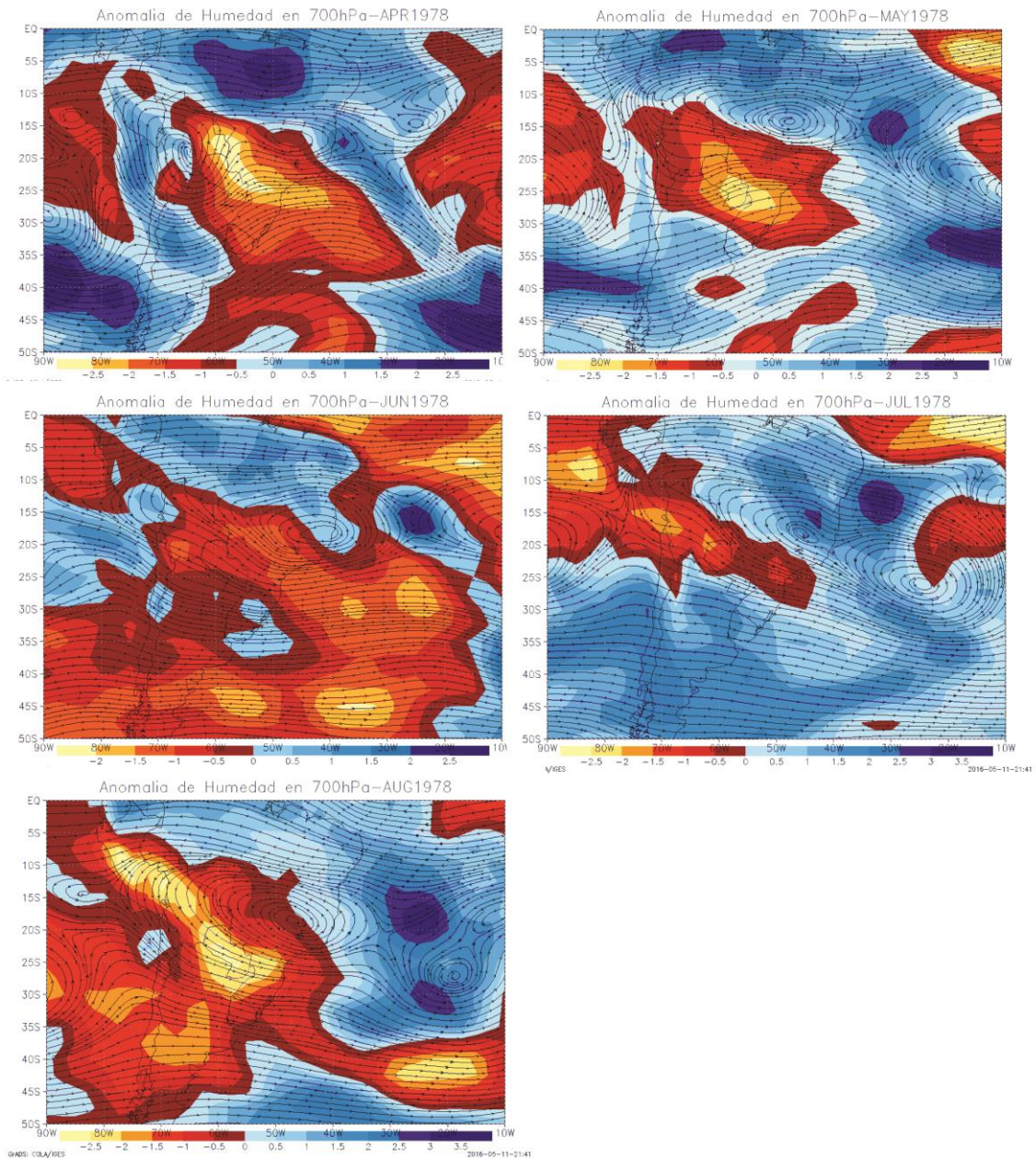


Figura 21: Anomalia de humedad y Líneas de corriente en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia del Flujo de Humedad en 700hPa

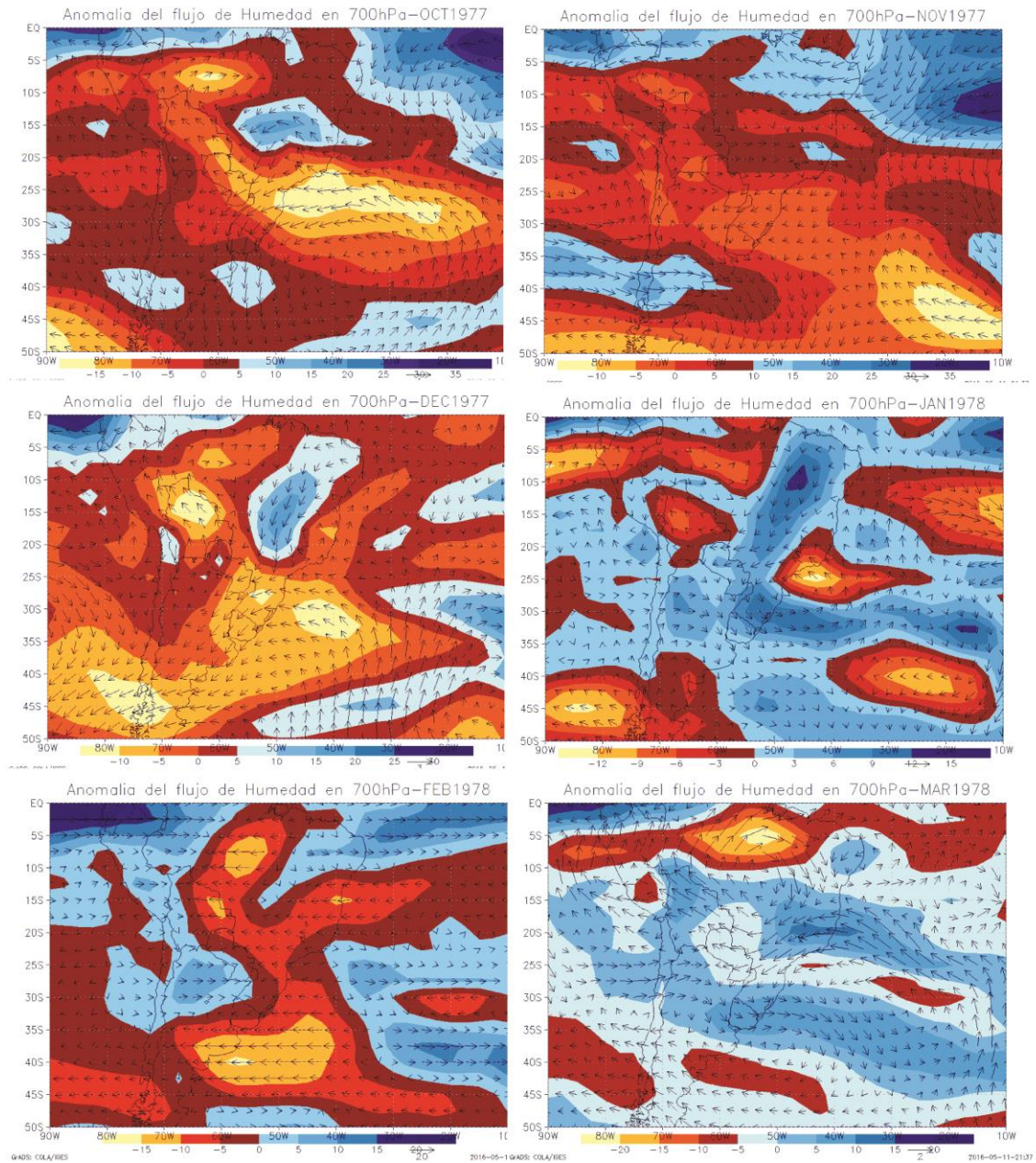


Figura 22: Anomalías del flujo humedad en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia del Flujo de Humedad en 700hPa

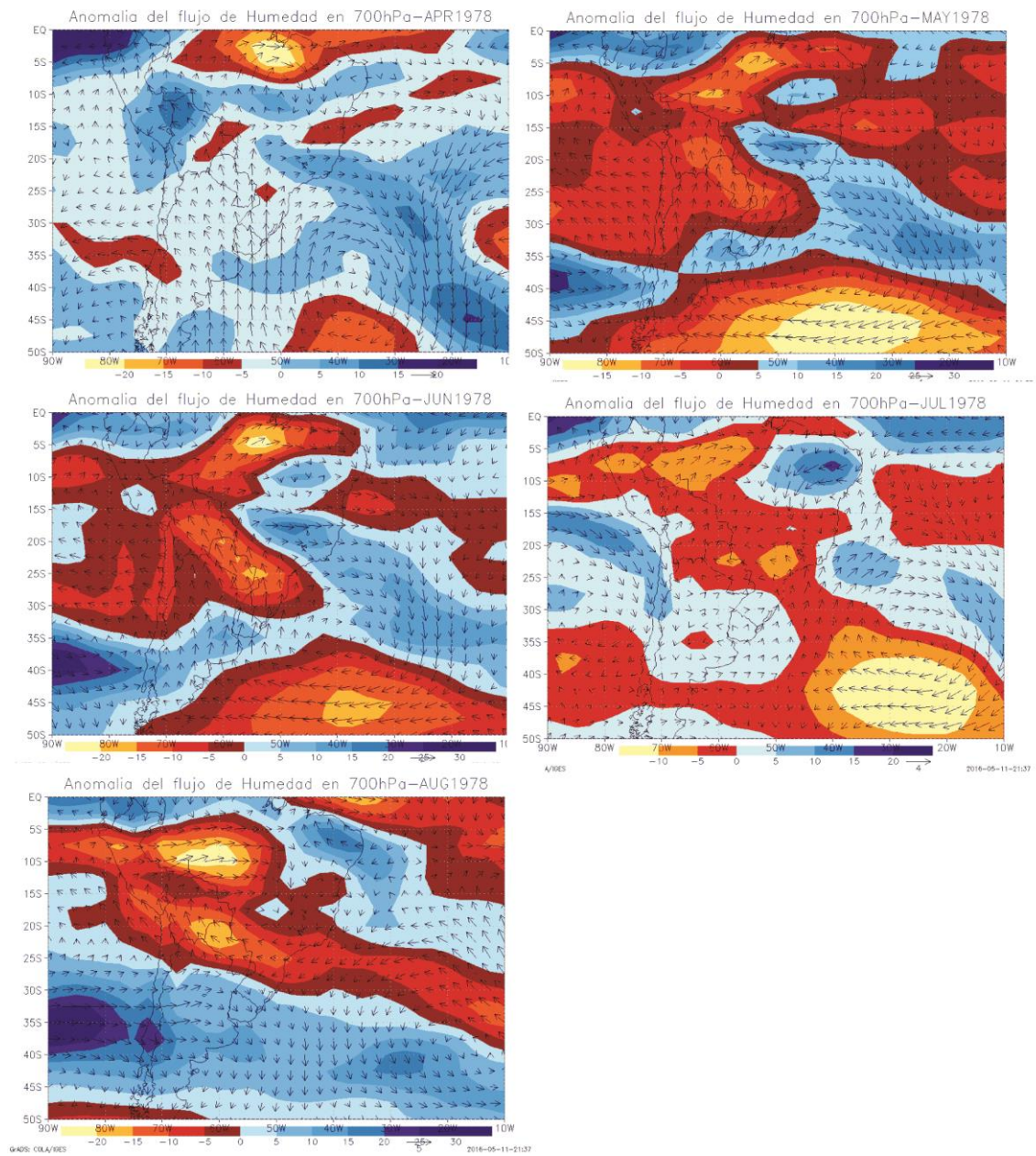


Figura 22: Anomalías del flujo humedad en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

4.1.3 Nivel de 500hPa

Los niveles medios de la atmósfera se caracterizan por determinar en cierto modo el desarrollo vertical de las nubes durante la convección. Las perturbaciones que pueden generarse en este nivel apoyan o limitan la convección profunda, producto de sistemas frontales o por la inestabilidad misma de toda la columna de aire. El vapor de agua concentrado en este nivel está relacionado a la disposición y a la advección de humedad que se obtenga en los niveles bajos, y según el tipo de circulación depende el contenido de humedad en los niveles medios.

En la **Figura 23** se observa que el déficit de humedad en el mes de octubre se debe a la circulación anticiclónica persistente al Norte del territorio paraguayo. Este anticiclón produce subsidencia ocasionando un déficit de humedad en estos niveles, que como anteriormente se mencionó, limita que el desarrollo nuboso se extienda a otros niveles.

En el trimestre comprendido entre los meses de noviembre y enero, la persistencia de sistemas anticiclónicos en el Norte del país se debilitan concentrándose al Noroeste con núcleo sobre el Norte chileno. A partir de febrero de nuevo se intensifica la persistencia de sistemas anticiclónicos, con anomalías negativas de humedad que afectan todo el país; pero, con mayor intensidad en el Norte y Este de territorio paraguayo. En abril las anomalías negativas toman sus valores máximos, afectando toda la Región Oriental, para luego debilitarse levemente, pero siempre con valores negativos de la anomalía de humedad en ese nivel. Esta situación se mantiene hasta el mes de agosto, donde las anomalías negativas comprenden no sólo a Paraguay, sino a gran parte de Sudamérica.

Al analizar el aporte de humedad en estos meses, se observa que la situación es muy similar a lo analizado anteriormente. En la **Figura 24** se observa que en octubre el flujo de humedad fue deficitario, mientras que entre noviembre de 1977 y enero de 1978 estuvieron cercanos a los valores normales; sin embargo, las anomalías negativas se fueron intensificando con un máximo en abril, donde el aporte de humedad es casi nulo. Esta situación es similar en los siguientes meses persistiendo hasta agosto, donde el evento de sequía pierde intensidad de nuevo.

Anomalía de Humedad y Líneas de Corriente en 500hPa

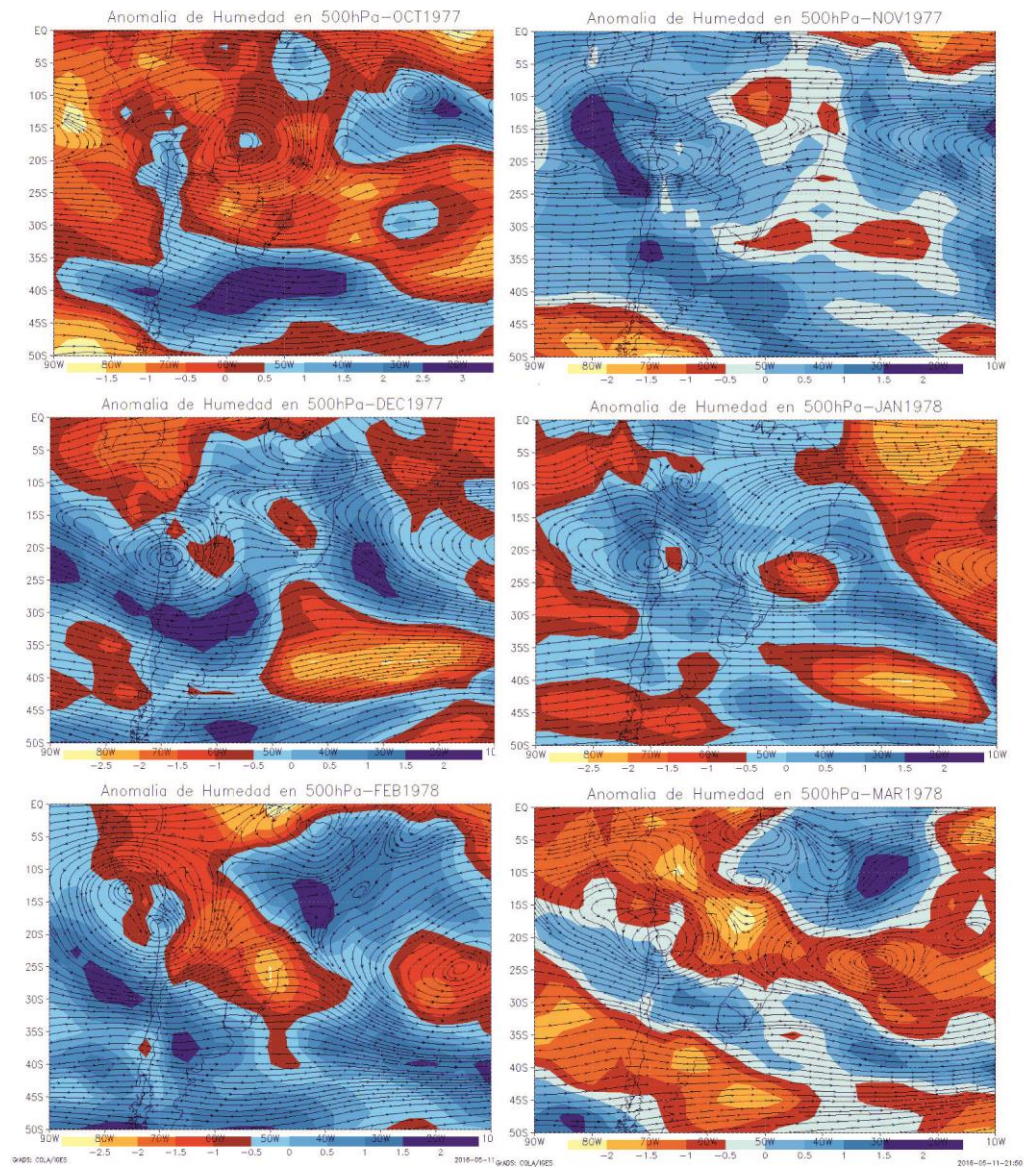


Figura 23: Anomalía de humedad y Líneas de corriente en 500hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalía de Humedad y Líneas de Corriente en 500hPa

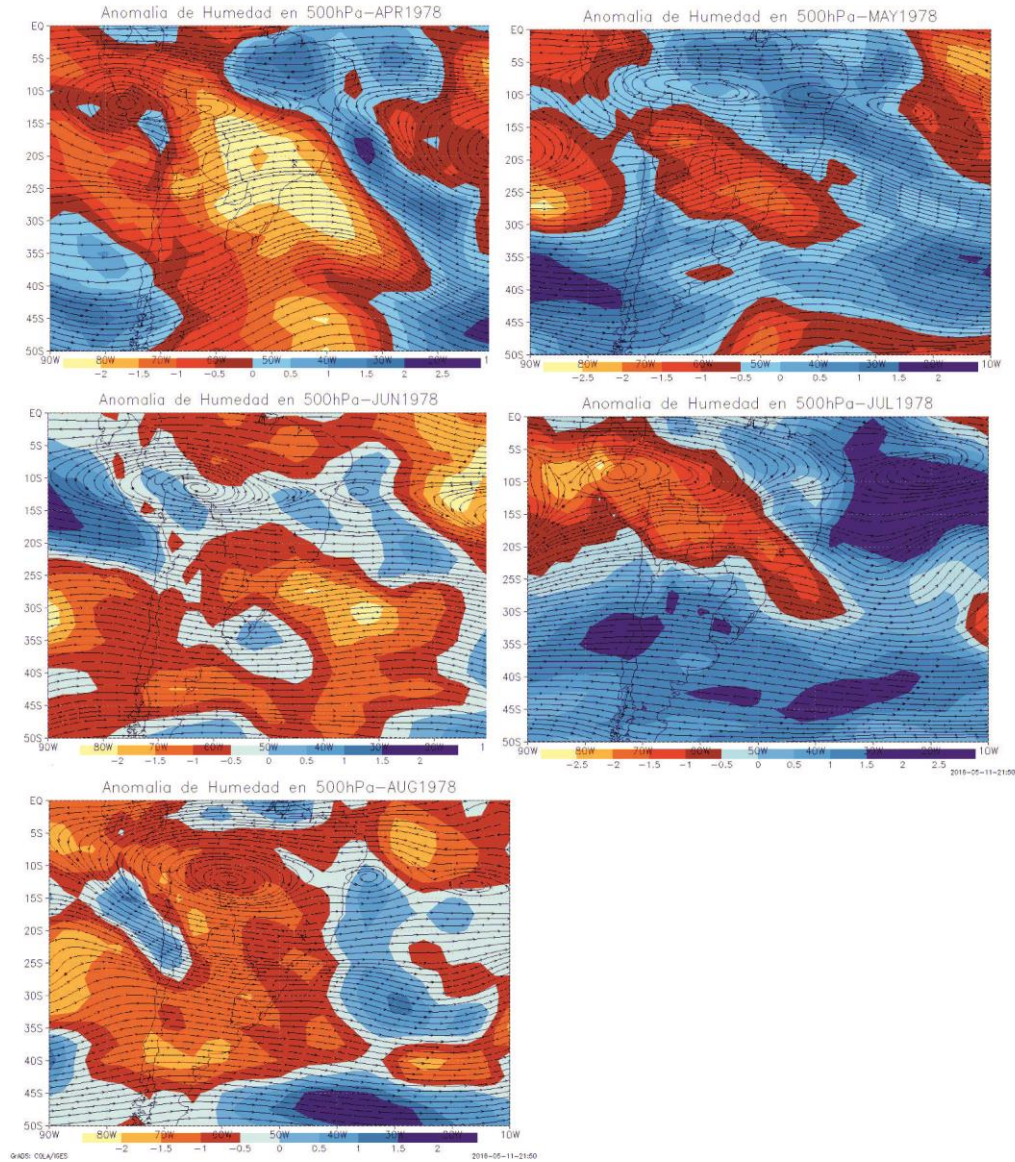


Figura 23: Anomalia de humedad y Líneas de corriente en 500hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia del Flujo de Humedad en 500hPa

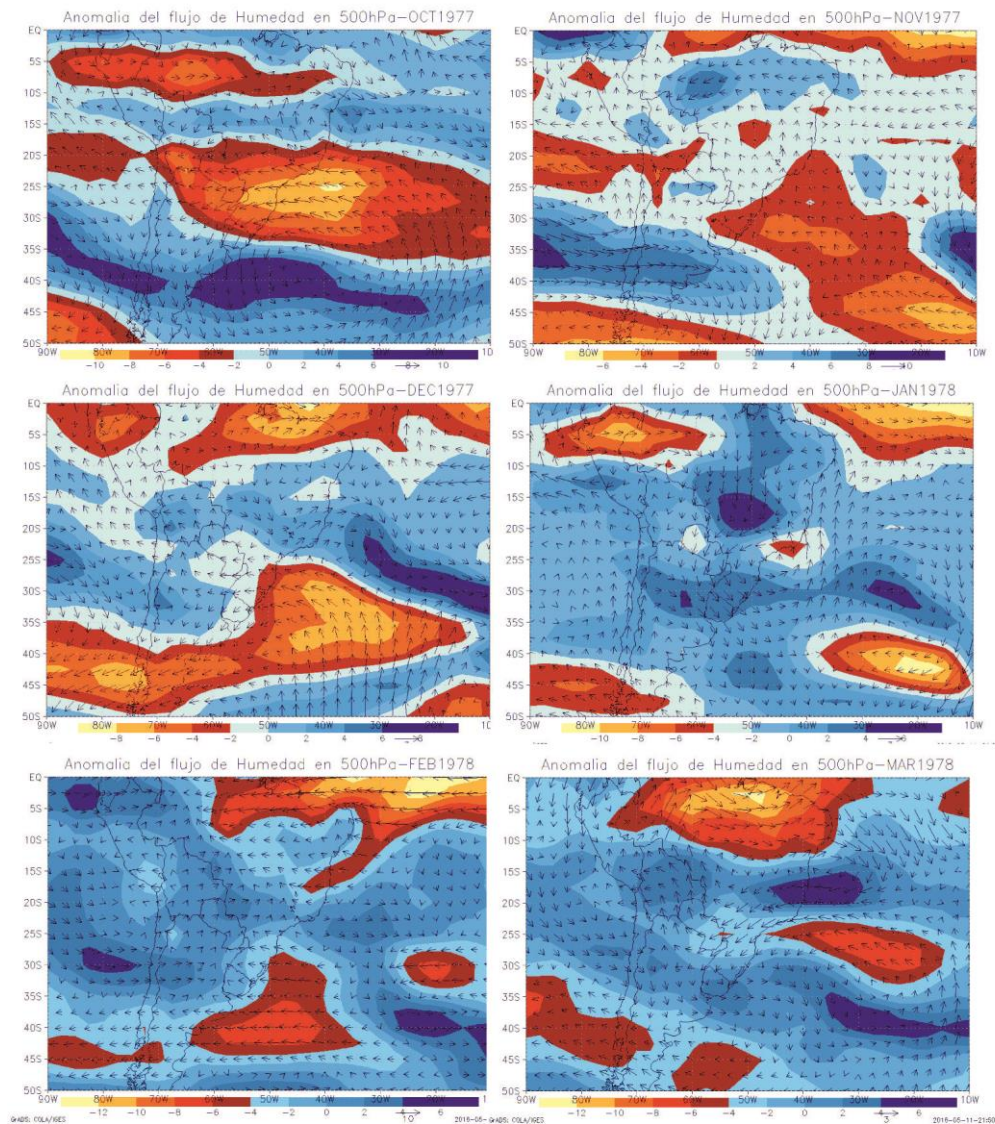


Figura 24: Anomalías del flujo humedad en 500hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

Anomalia del Flujo de Humedad en 500hPa

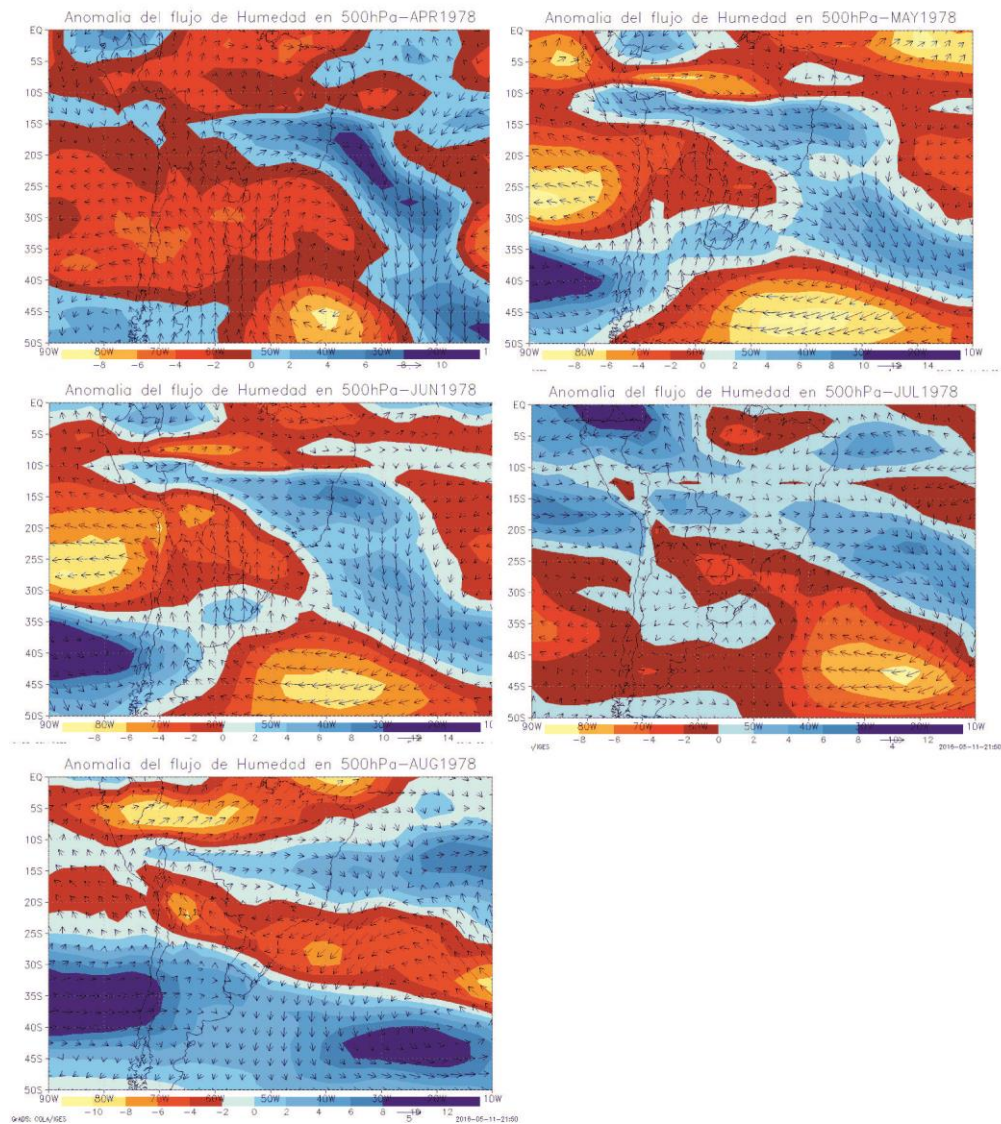


Figura 24: Anomalías del flujo humedad en 500hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978.

4.1.4 Nivel de 250hPa

En los niveles altos de la atmósfera una de las forzantes características del periodo cálido en Sudamérica es la Alta de Bolivia. En la **Figura 25** se encuentra el patrón normal de esta circulación para los meses entre noviembre y abril, con la respectiva circulación que persistió durante el evento de sequía.

Se observa, que el patrón persistente durante los meses de noviembre y diciembre, fueron similares a la normal climatológica, esto sugiere que la convección en la zona de Amazonía, durante ese tiempo ha sido lo suficientemente frecuente para que la Alta de Bolivia, se manifieste según los valores normales para esa época del año. Sin embargo, a partir de febrero este anticiclón en niveles altos se ve debilitado con su centro orientado al Norte con respecto a la normal. Esto se podría relacionar a la falta de convección profunda en la Amazonía que debilita la divergencia en niveles altos.

La falta de convección sobre la Amazonía podría estar vinculada a la circulación anómala del anticiclón de Atlántico Sur, dicha circulación orienta la dirección del viento hacia las costas del Norte del Brasil, transportando vapor de agua del océano hacia el interior del continente. La abundante vegetación en el Amazonas que producen grandes valores de evapotranspiración, sumado a la radiación incidente sobre la superficie durante los meses cálidos del Hemisferio Sur, provocaría normalmente la convección en esa región.

Durante los meses de diciembre, febrero y marzo la Alta de Bolivia se encontró debilitado, a causa de la falta de convección. Esto explicaría el déficit de vapor de agua para el transporte de humedad hacia latitudes más altas. Sin embargo, en los otros meses en el cual afectó la sequía, la Alta de Bolivia se encontraba dentro de los patrones normales, pero se observa que el JCB se encuentra igualmente debilitado o en ocasiones en una dirección por encima de territorio paraguayo.

Líneas de Corrientes en 250hPa

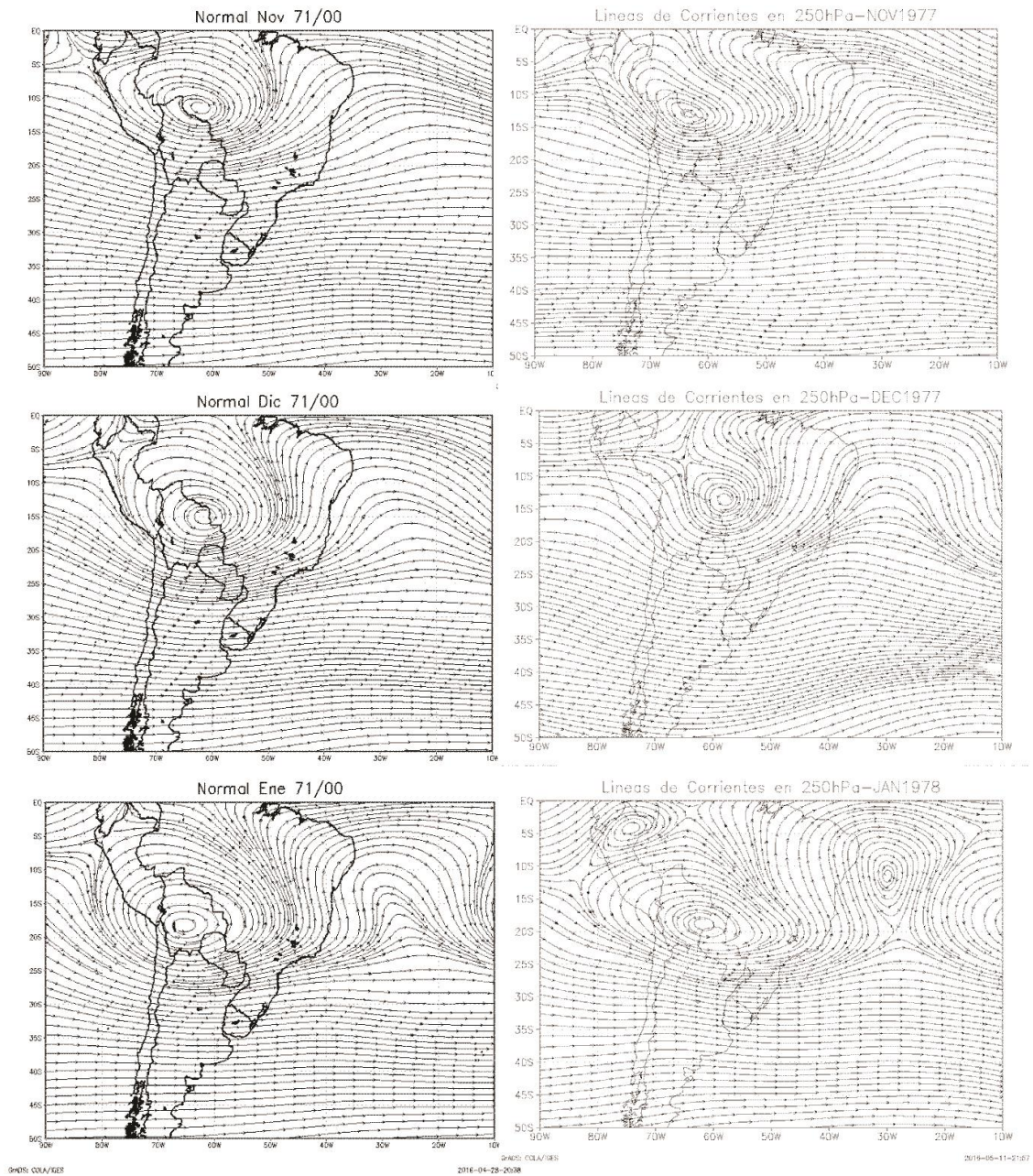


Figura 25: Líneas de corrientes en 250hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978. A un lado se observa la configuración normal climatológica (1971/2000) y al otro la circulación media mensual de dicho evento.

Líneas de Corrientes en 250hPa

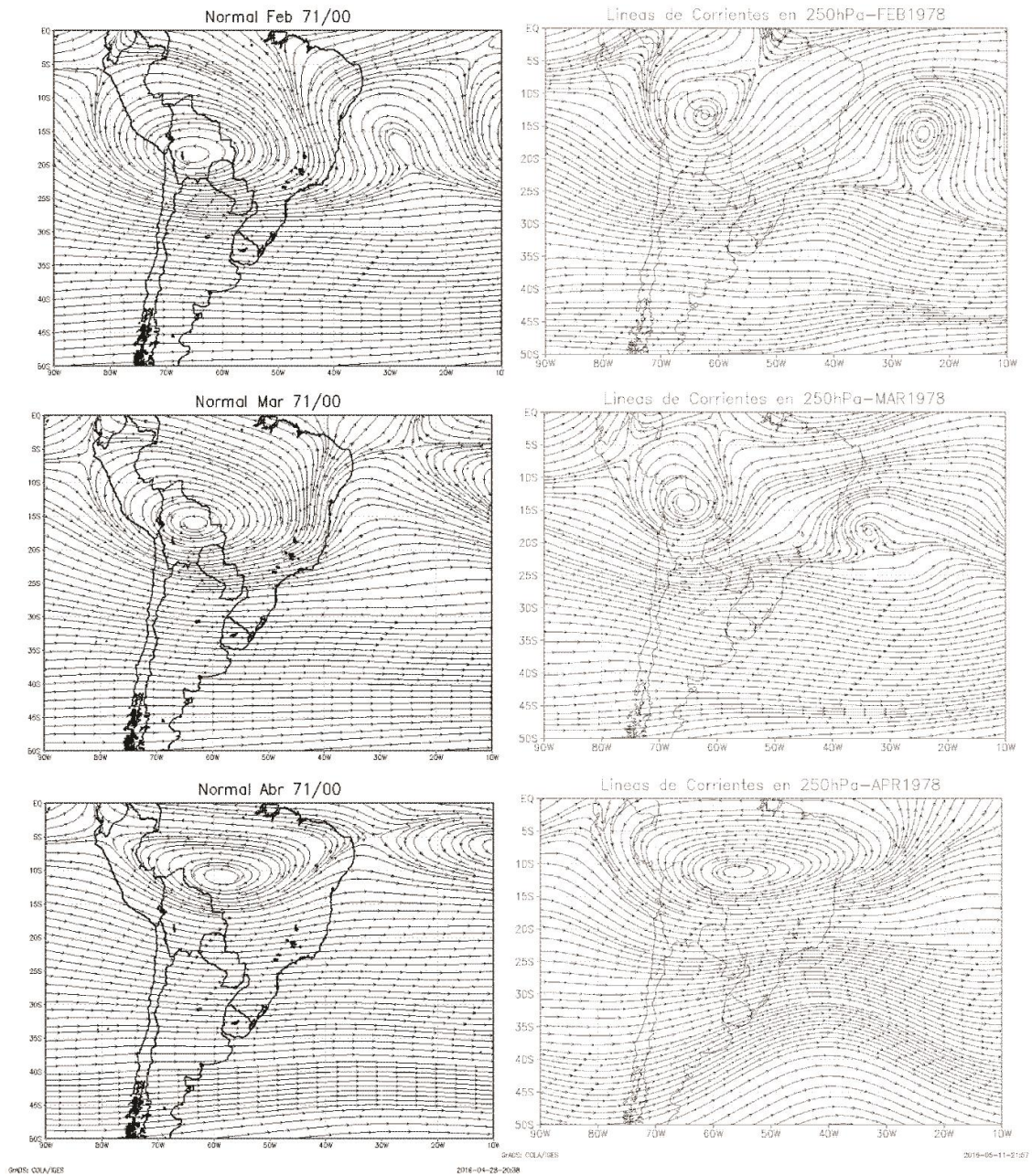


Figura 25: Líneas de corrientes en 250hPa del evento de sequía ocurrido entre 1977 y 1978. A un lado se observa la configuración normal climatológica (1971/2000) y al otro la circulación media mensual de dicho evento.

4.2 Análisis del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009

En el periodo cálido que abarcó desde octubre del 2008 hasta abril del 2009, se presentó un evento de sequía de intensidad moderada que afectó a todo el territorio paraguayo, norte argentino, el sur de Brasil y con mayor intensidad gran parte del Uruguay. Los departamentos más afectados por este evento, según los daños y su impacto económico, fueron los departamentos del Centro, Norte y Este de la Región Oriental y Bajo Chaco.

La resolución de los mapas hechos para este evento son de resolución $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, mejorando la resolución de los mapas utilizados para el evento anterior. El análisis es similar, utilizando las mismas variables físicas en cada uno de los niveles atmosféricos.

4.2.1 Nivel de 850hPa

El SPI medio de área empieza a tomar valores negativos sucesivos a partir de junio del 2008. Sin embargo, las condiciones de sequía se establecieron recién a partir del mes de octubre, donde los valores de SPI muestran mayor robustez en la casi todas las estaciones meteorológicas.

Según se observa en la **Figura 26**, en el mes de octubre la cantidad de vapor de agua disponible sobre el nivel de 850hPa se encuentra dentro de los valores normales, tomando anomalías de humedad específica cercanas a cero. Las líneas de corrientes indican que la dirección media del viento es del Noroeste, circulación normal del viento en ese mes debido a la presencia del JCB. En noviembre la situación cambiaría, ya que se observa que las anomalías de humedad comienzan a ser negativas, que puede estar relacionado a la difluencia del viento sobre gran parte del chaco, el cual indica una posición media anómala del JCB en ese mes. Esto podría ser a causa de la circulación sobre el Norte de Bolivia que bloquea el flujo del viento, desviándolo en latitudes mas bajas y orientadas más al Este, con el flujo hacia latitudes mayores.

Esa circulación se intensifica en diciembre y enero, en donde comienza a formarse una dorsal sobre territorio paraguayo, que impide el flujo del viento, es decir, impide que el JCB se posicione de forma normal sobre noroeste argentino y gran parte del Paraguay. A partir de febrero vuelve a debilitarse la persistencia del sistema anticiclónico sobre Paraguay; sin embargo, el sistema de baja presión que se encuentra al noroeste de Bolivia, sigue persistente, bloqueando el flujo normal del viento proveniente de la Amazonía, pero los valores de humedad se encuentran con anomalías cercanas a la normal. En marzo las

anomalías se acercan a valores negativos, obteniéndose así un máximo de anomalías negativas en abril, donde se establece plenamente la persistencia de un sistema anticiclónico sobre Paraguay, con núcleo al oeste, que genera subsidencia en este nivel, con nula presencia del JCB. A partir de mayo rápidamente las condiciones se normalizan con un flujo persistente del norte, el cual provoca que las anomalías de humedad tomen valores positivos.

Teniendo en cuenta lo que se ha visto en la **Figura 26**, se analiza también las anomalías mensuales del flujo del viento, de tal forma a relacionar el déficit de vapor de agua debido a la deficiencia en el aporte debido al flujo del viento.

En la **Figura 27** se observa que, evidentemente, el aporte de humedad sobre territorio paraguayo es deficiente en el recorrido que debe realizar normalmente el JCB. Esa falta de aporte del flujo de humedad debido al viento se mantiene persistente hasta enero, incluso teniendo anomalías más negativas en diciembre, donde la dirección del viento es contraria a la que debe persistir durante ese mes. En febrero, validando lo observado anteriormente, los valores en el flujo de humedad se normalizan levemente. A partir de marzo de nuevo se vuelve deficiente el flujo sobre Paraguay, obteniéndose de nuevo un pico de anomalías negativas en abril, luego la situación vuelve a normalizarse a partir de mayo.

Es interesante observar que las condiciones de neutralidad en la circulación atmosférica en este nivel se observan en el mes de febrero; sin embargo, esas condiciones se reflejan recién en el mes de marzo según los valores de SPI-3. Esto refleja la idea de que las condiciones tanto de sequía como de neutralidad se gestan primero en la atmósfera, y luego se ve reflejada en superficie, ya sea a causa de la ausencia de lluvias, como también el desarrollo de ellas.

Anomalías de Humedad Específica y Líneas de Corrientes en 850hPa

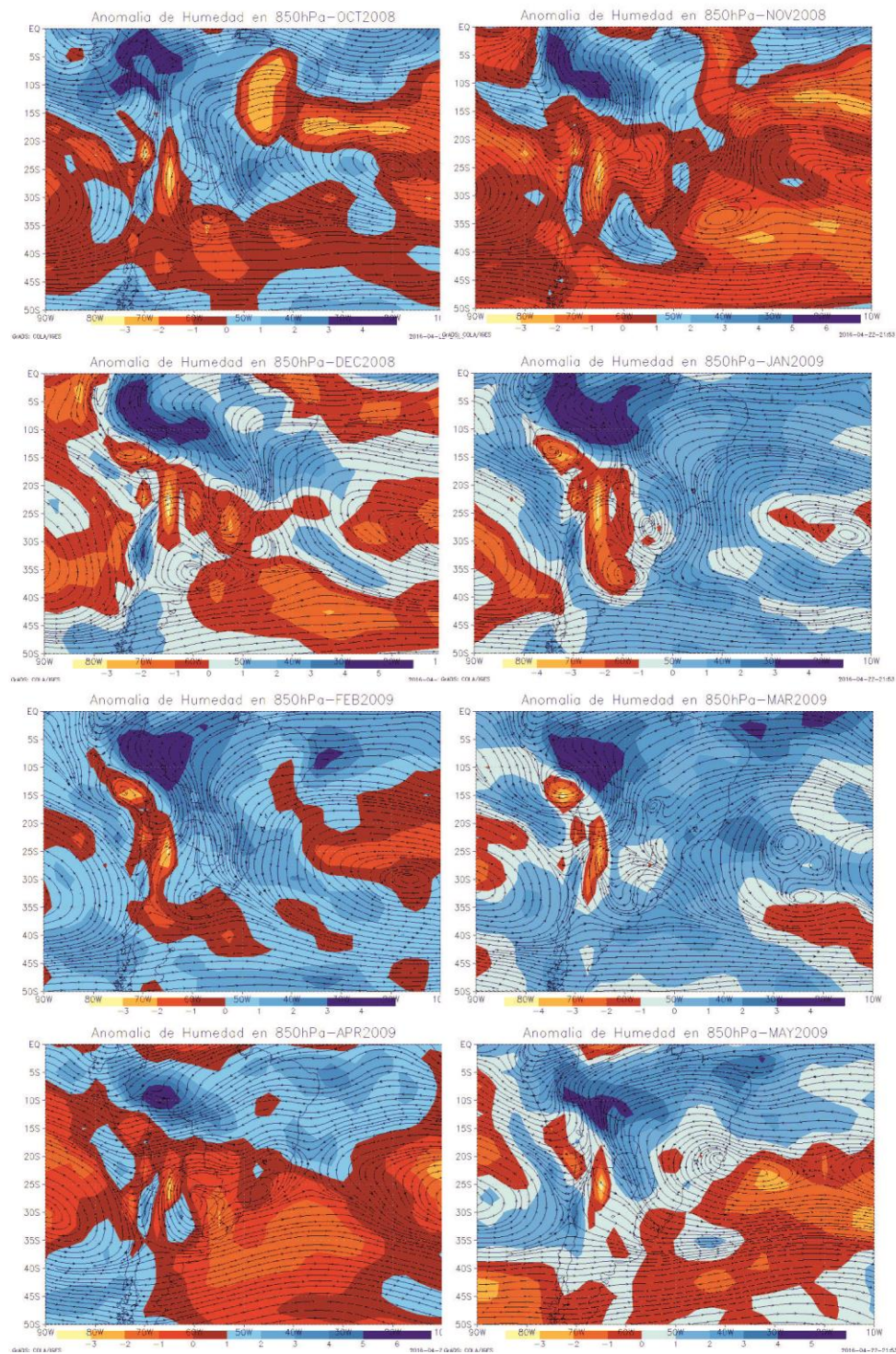


Figura 26: Anomalías de humedad específica y líneas de corrientes en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009.

Anomalías del Flujo de Humedad en 850hPa

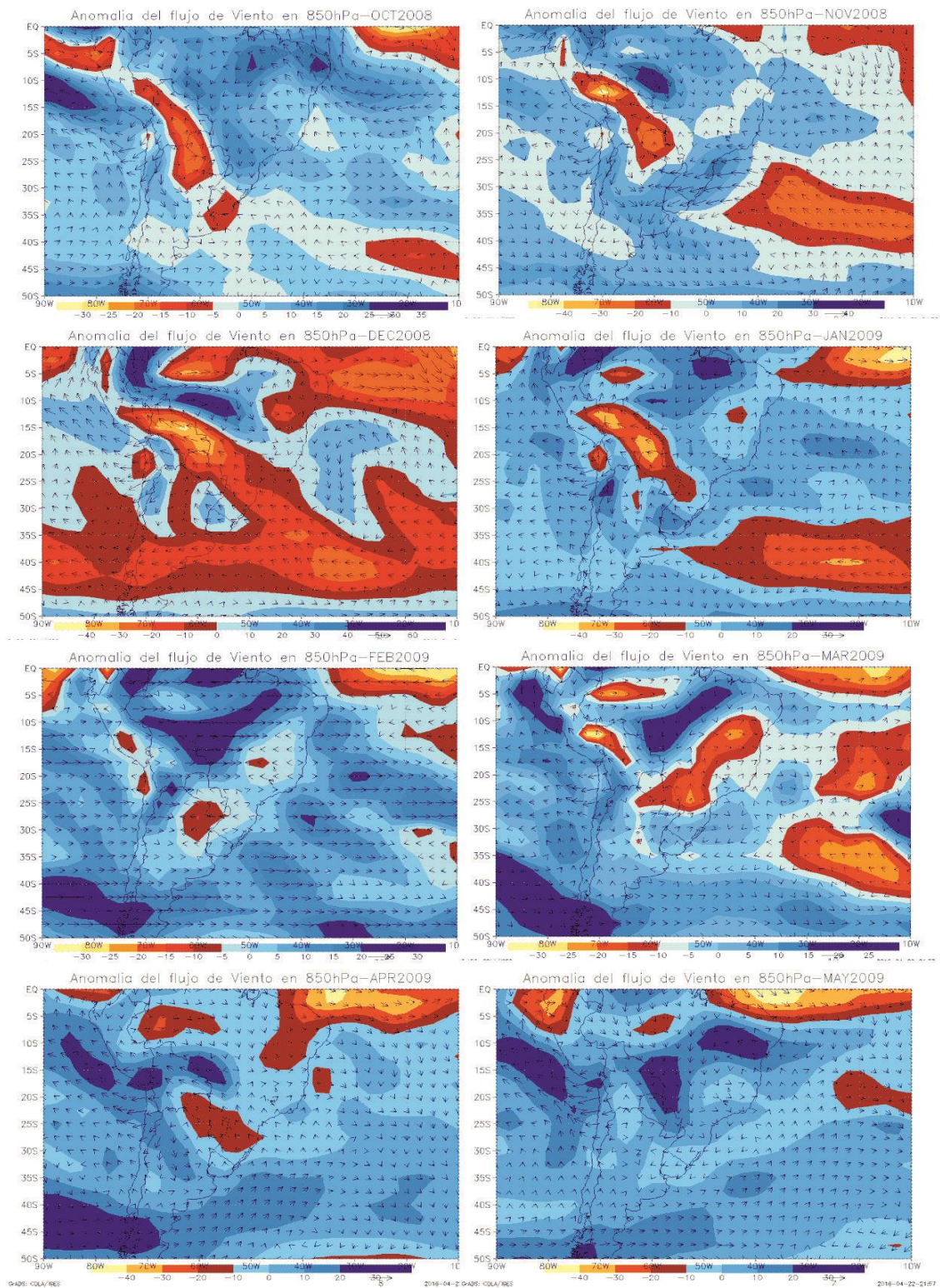


Figura 27: Anomalías del flujo de humedad en 850hPa del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009.

4.2.2 Nivel de 700hPa

Las condiciones en el nivel de 700hPa (**Figura 26**) son muy similares a lo observado en 850hPa. En octubre del 2008, un gran anticiclón con núcleo en la costa este de Brasil genera una circulación con anomalías positivas de humedad específica sobre el Centro y Oeste del Brasil, limitando con el Norte de Paraguay; sin embargo, más al Sur, gran parte del Centro y Noroeste de Argentina las anomalías toman valores negativos, ya que el JCB no ejerce la fuerza necesaria para llegar hasta esas latitudes. Esta situación deja las masas de aire más húmedas entre los límites del norte paraguayo y la zona Centro y Sur del Brasil, mientras que todo el Noreste y Centro de Argentina las masas de aire se encuentran más secas.

A partir de noviembre el JCB se debilita y toma una dirección suroeste, debido a un centro de baja Presión en el Norte de Bolivia, que actúa de barrera para el flujo normal del JCB. Sumado a esto, en los meses de diciembre y enero se forma un sistema anticiclónico sobre el norte argentino, afectando a gran parte del Paraguay con anomalías negativas de humedad en toda la Región Oriental y el Bajo Chaco, pero con mayor intensidad en el sur y oeste del país.

En febrero, así como se ha visto en 850hPa, las condiciones permanecieron neutrales en todo el Noroeste y Centro argentino. Incluso sobre Paraguay las anomalías toman valores positivos, lo que indica un buen flujo de humedad gracias al JCB.

Hasta marzo las condiciones de neutralidad persisten sobre Paraguay. Sin embargo en abril de nuevo se genera un sistema anticiclónico persistente sobre el norte paraguayo, el cual inhibe totalmente el aporte de humedad, con la ausencia del JCB.

En la **Figura 29** se observa que para octubre del 2008 parte del norte del país se encuentra con anomalías positivas en el flujo de humedad, mientras que parte del Centro y Sur del país se encuentran con anomalías cercanas a cero, es decir neutrales. Como se ha observado hasta aquí, las anomalías negativas empiezan a encontrarse a partir de noviembre, con un déficit en el aporte de vapor de agua en este nivel. Febrero sigue siendo un mes neutral dentro del evento y se verifica tal situación con lo observado en 850hPa, en la **Figura 28**. A partir de marzo las condiciones son levemente anómalas, con anomalías negativas más significativas en abril. A partir de mayo se observa que rápidamente la configuración del JCB se normaliza, incluso con un aporte de humedad un tanto mayor que en condiciones normales. El flujo vuelve a direccionarse desde el Norte, con anomalías positivas en esta variable.

Anomalías de Humedad Específica y Líneas de Corrientes en 700hPa

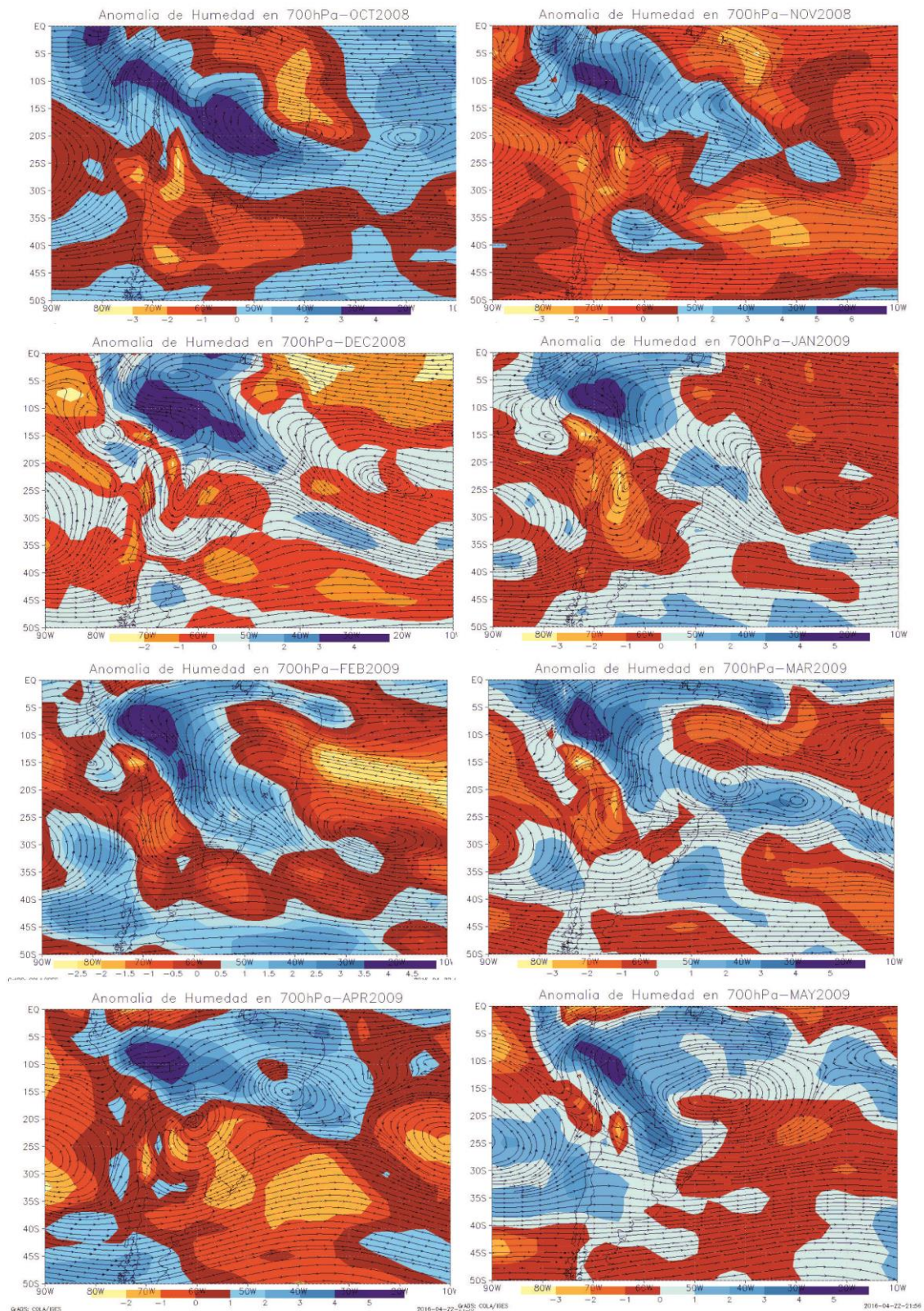


Figura 28: Anomalías de humedad específica y líneas de corrientes en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009.

Anomalías del Flujo de Humedad en 700hPa

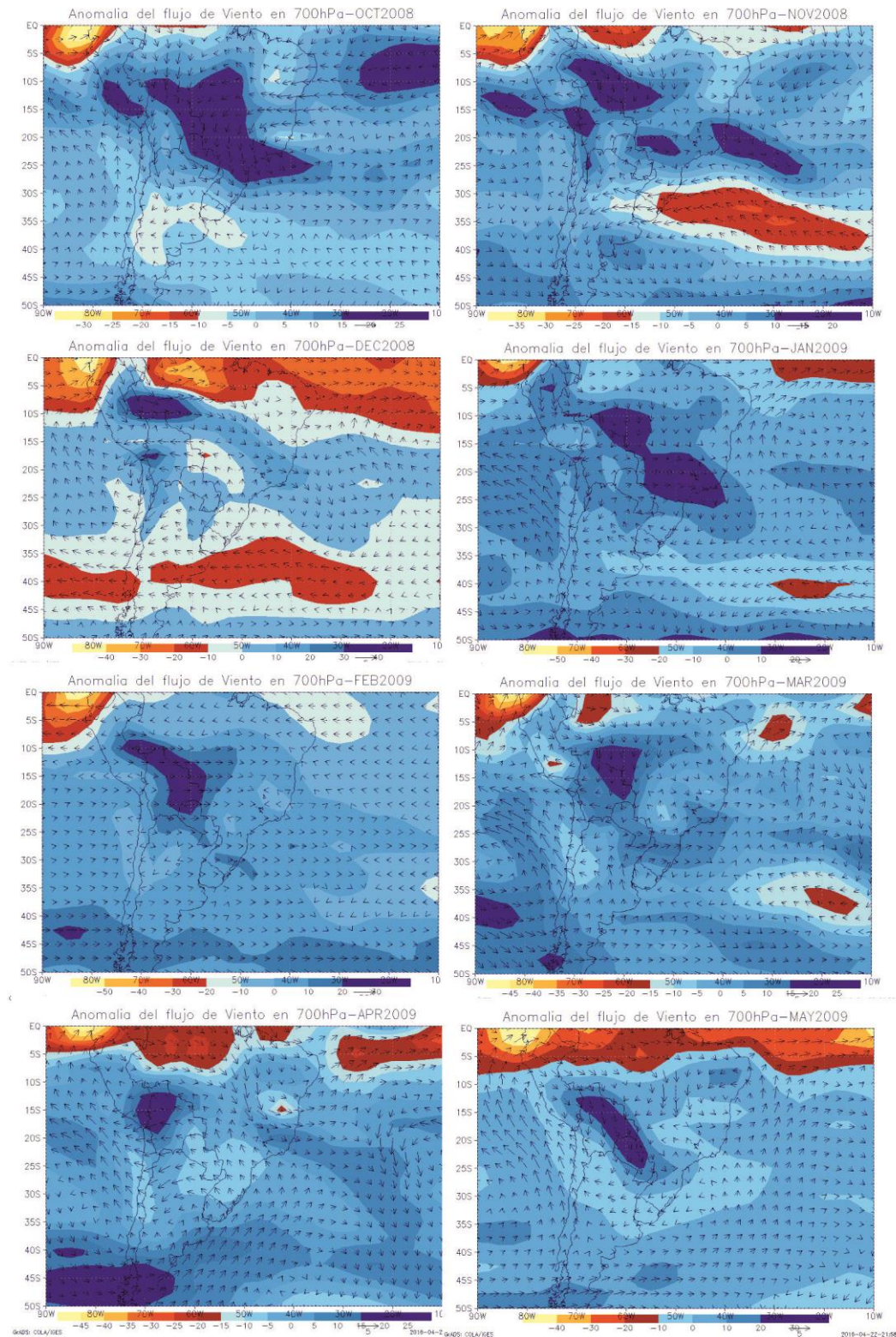


Figura 29: Anomalías del flujo de humedad en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009.

4.2.3 Nivel de 500hPa

Las condiciones de circulación media en el nivel de 500hPa son ciertamente similares a lo observado en los niveles anteriores. En el mes de octubre un sistema anticiclónico persistente situado sobre el Este del Brasil genera anomalías negativas de humedad sobre esa región del Brasil. Sobre el Paraguay las anomalías se mantienen dentro de los valores normales encerrándose dentro de un callejón húmedo entre anomalías negativas de humedad sobre el Brasil y en el norte argentino.

A partir de noviembre, este anticiclón tiende a estar más debilitado y retrocede más al este, dando paso a una onda en forma de dorsal sobre la zona baja de la Región Oriental, zona donde comienzan a manifestarse las anomalías negativas de humedad.

Entre el mes de diciembre, la situación sería similar con anomalías negativas en toda la Región Oriental y Bajo Chaco. Sin embargo el mes de febrero presenta condiciones neutras dentro del evento seco. Como se ha visto en otras capas, este mes presenta anomalías positivas de humedad debido al flujo de humedad desde el norte del país.

De nuevo las anomalías de humedad disminuyen paulatinamente durante el mes de marzo, debido a la falta de apoyo en el flujo de humedad. La persistencia de la dorsal sobre territorio paraguay causa un déficit de precipitaciones importantes sobre territorio paraguay, donde las anomalías negativas más importantes se generan durante el mes de abril, mes en el cual el déficit de humedad se ha acentuado en todos los niveles atmosféricos.

Todo esto hizo que los valores de SPI tomen valores más negativos en casi todas las estaciones meteorológicas del Paraguay.

A partir de mayo, las condiciones de aporte de humedad se normalizan, con un debilitamiento de la dorsal en este nivel y un flujo normal de humedad.

Anomalías de Humedad Específica y Líneas de Corrientes en 700hPa

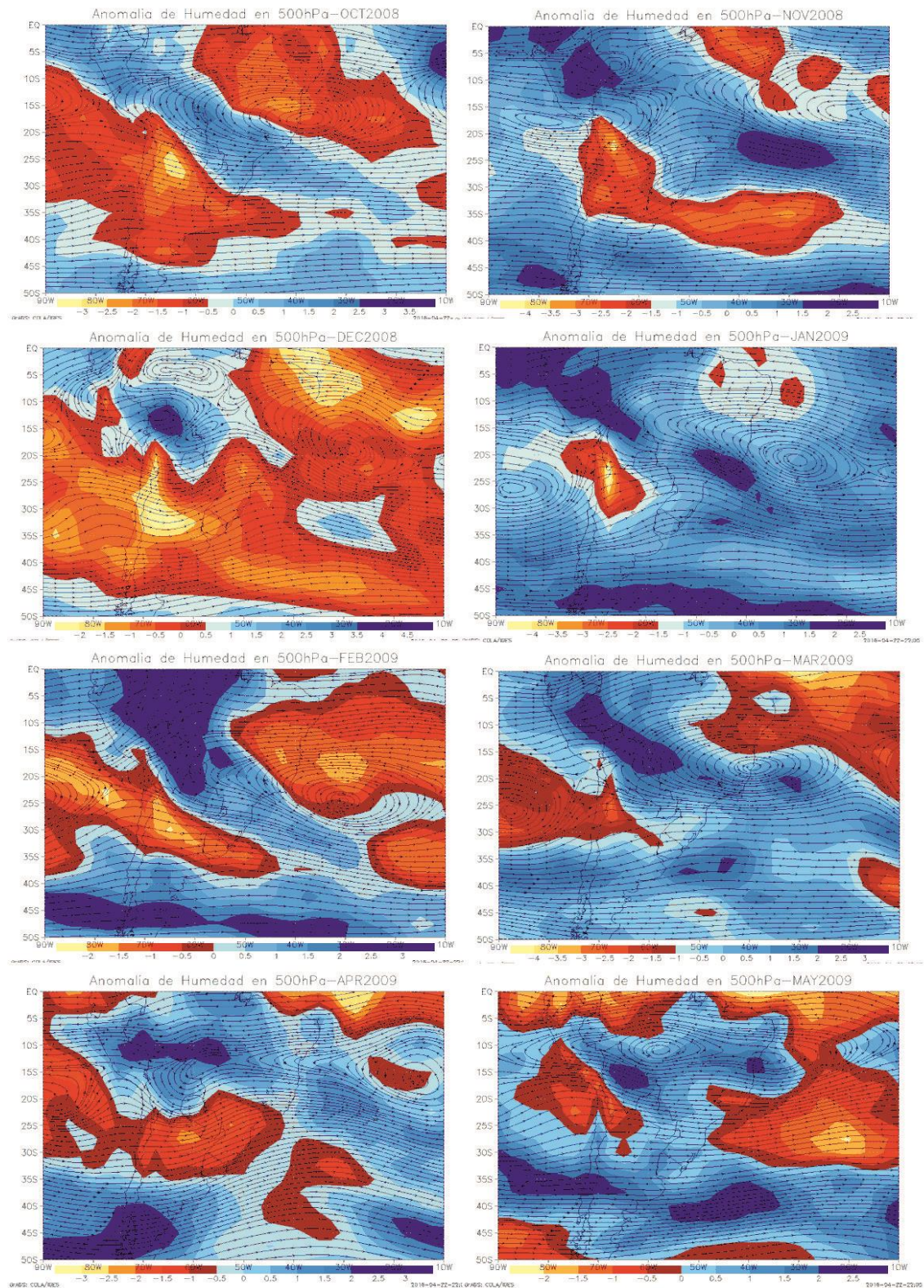


Figura 30: Anomalías de humedad específica y líneas de corrientes en 700hPa del evento de sequía ocurrido entre 2008 y 2009.

5. Conclusiones

Las características de la atmósfera en capas bajas prevé información valiosa sobre la configuración sinóptica que predomina durante eventos de sequía. El sistema anticiclónico obtenido con valores promediados mensualmente muestra un sistema persistente sobre el centro de Sudamérica, la ausencia del Jet de Capas Bajas sobre nuestro territorio causa un déficit de humedad en esos niveles, factor fundamental para la convección; además, la posición irregular y en algunos casos incluso la ausencia de la Alta de Bolivia, dan indicios de ciertos patrones en la dinámica atmosférica que podrían ser causantes de estos eventos en el Paraguay. Al relacionar los valores de las series temporales del SPI con la situación de la atmósfera durante ese evento, existe una concordancia y refleja satisfactoriamente con lo acontecido, pudiendo encontrar en un futuro, relaciones entre el SPI y otros índices con la dinámica característica asociada a eventos de sequía.

Según estos resultados, la característica reinante para que se produzca un evento seco sobre Paraguay, tiene que ver en su mayoría con lo que suceda en capas bajas de la atmósfera, ya que es en estas capas donde se concentra la mayor cantidad de vapor de agua, el combustible principal para el desarrollo de la convección.

Sin embargo, no solo la necesidad de vapor de agua en la atmósfera propicia el desarrollo de la convección, ya que se ha visto que los movimientos de circulación media en varias capas forman un plan acoplado que inhibe la formación de nubes de desarrollo vertical, por más que el vapor de agua esté presente en cantidades necesarias en la atmósfera. Circulaciones anticiclónicas en los niveles bajos favorecen la subsidencia (Buen tiempo), mientras que en los niveles más altos las vaguadas y los movimientos ciclónicos ayudan a que las masas de aire antes que elevarse deban comprimirse hacia los niveles bajos.

Con esta información se ha construido un mapa conceptual de cómo debe encontrarse sobre la región para un probable evento seco sobre territorio paraguayo (**Figura 31**).

Si bien se expone el análisis para dos eventos de sequía en particular, esta metodología se podría aplicar, de tal forma a encontrar patrones característicos en otros. Los resultados de este estudio pueden ayudar a la predicción de eventos de sequías no sólo en el Paraguay, sino también en la región.

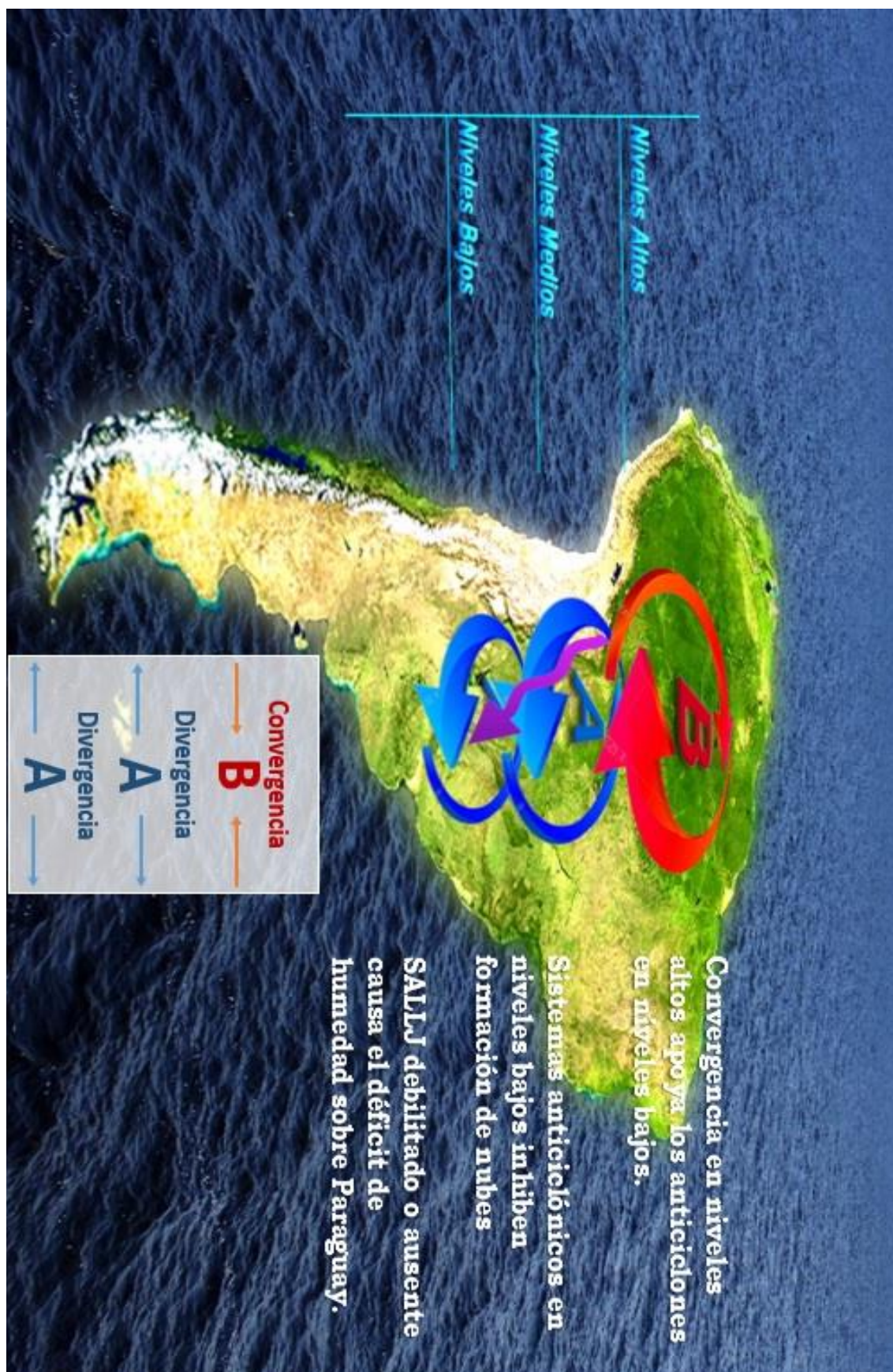


Figura 31: Mapa conceptual sobre la estructura de la circulación atmosférica característica en eventos de sequía sobre Paraguay.

6. Bibliografía

- MARIANA PALLOTA; RENATA YUMI NAKAZATO. Caracterización de episodios de zona de convergencia del atlántico sur (ZCAS) y zona de convergencia de humedad (ZCU) en enero y febrero del 2010. Disponible en <http://www.cptec.inpe.br/>
- CENTRO DE PREVISION DEL TIEMPO Y ESTUDIOS CLIMÁTICOS (CPTEC-IMPE). Presenta cartas sinópticas, boletines técnicos y análisis de casos significativos cada mes disponible en <http://www.tempo.cptec.inpe.br/>
- MIGUEL SAAVEDRA; MATIN CALVO; CÉSAR GIMÉNEZ. Caracterización climática de la Circulación Atmosférica en América del Sur. Revista de investigación de Física 14, 111401761 (2011).
- J. D. LENTERS; K. H. COOK. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. Journal of the Atmospheric Science, 1996.
- J. M. PARMEZANI; E. RIBEIRO; J. R. SOUZA. Asociación entre ZCAS y ocurrencias del Niño y la Niña. UNIVAP. E-mail: labmet@univap.br
- SILVIO FIGUEROA ET AL. Simulations of the summer circulation over the South America region with an Eta Coordinate Model. Journal of the Atmospheric Science, 1994.
- VERA ET AL. Toward and unified view of the American Monsoon Systems. Journal of the Atmospheric Science, 2006.
- JIAYU ZHOU AND K.-M. LAU. Does a Monsoon Climate Exist over South America?. Journal of climate, volume 11, 1997.
- GUILHERME MARTINS. Apostila de GrADS. Diciembre 2009.
- BERÁN, M. A. RODIER, J. A. (1985). Hydrological aspects of drought. UNESCO. WMO. Ginebra.
- FUSCHINI MEJÍA, MARIO. (1987). Dry temperate flatlands. En UNESCO. Comparative hydrology. An ecological approach to land and water resources. Edited by Malin Falkenmar and Tom Chapman.
- CLYDE FRAISSE ET AL. 2008. El Niño- Southern oscillation influences on soybean yields in eastern Paraguay.
- BARROS ET AL. 2004. The Mayor discharge events in the Paraguay river: magnitudes, source region and climate forcings.
- C. VERA ET AL. 2004. Differences in the Niño response over the southern hemisphere.
- 15- ALICE GRIMM, 2003. The El Niño impact on the summer Monsoon in Brazil: Regional processes versus remote influences.

- GRIMM AND BARROS, 2000. Clymate variablility in southern south America associated with El Niño and La Niña events.
- The south America monsoon system (Grimm, Vera, Mechoso).
- Shifts in the estatistics of daily raimfall in south America conditional on ENSO phase (Ropelewski and Bell, 2008).
- FIGUEROA AND SILVA DÍAZ, 1995. Simulation of the summer circulation over the south America region with an ETA coordinate model.
- CLYDE FRAISSE ET AL. 2008. El Niño- Southern oscillation influences on soybean yields in eastern Paraguay.
- BARROS ET AL. 2004. The Mayor discharge events in the Paraguay river: magnitudes, source region and climate forcings.
- BENJAMIN LLOYD-HUGHES AND MARK A. SAUNDERS. A Drought Climatology For Europe. Int. J. Climatol. 22: 1571–1592 (2002)
- GREGORY J. HUSAK, JOEL MICHAELSEN AND CHRIS FUNK. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. Int. J. Climatol. 27: 935–944 (2007)
- MCKEE, T.B., N.J. DOESKEN AND J. KLEIST, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184
- M. D. SVOBODA ET. AL., 2012. Standardized Precipitation Index User Guide.
- VERA ET AL. 2006. Toward a unifiield view of the America monsoon systems.
- PASTÉN M., GONZÁLEZ V., ESPÍNOLA C.; 2011. Clasificación climática del Paraguay utilizando los métodos de Koppen y Thornthwaite.
- JAMES R. HOLTON; 1990. Introducción a la meteorología dinámica. Segunda edición.

7. Anexos

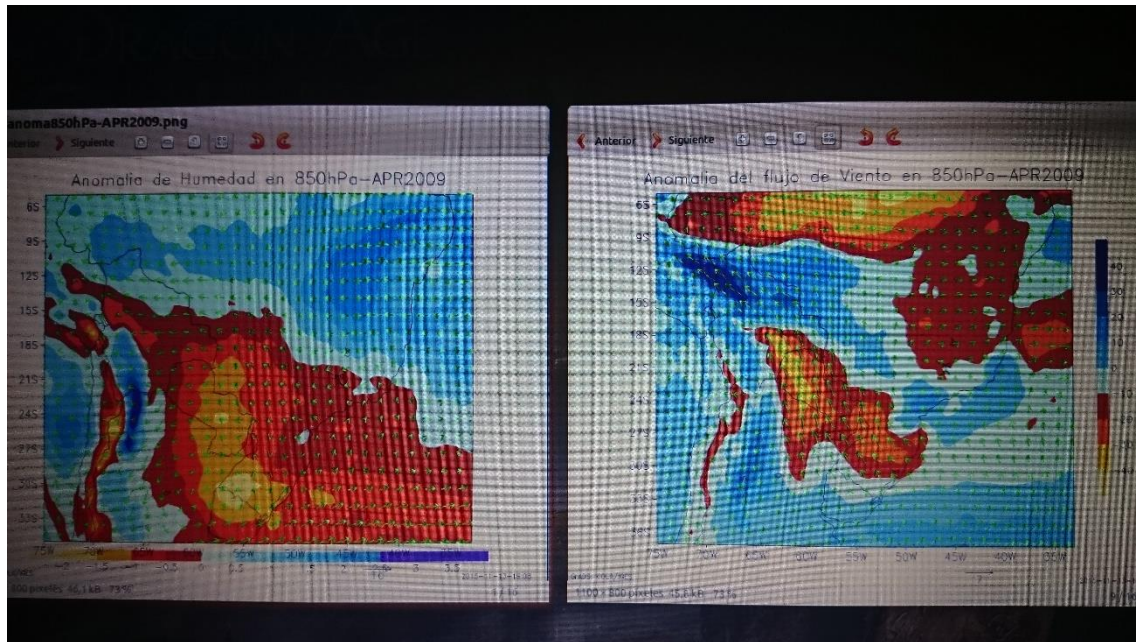


Figura 32: Algunos gráficos elaborados con los scripts hechos en el CPTEC.

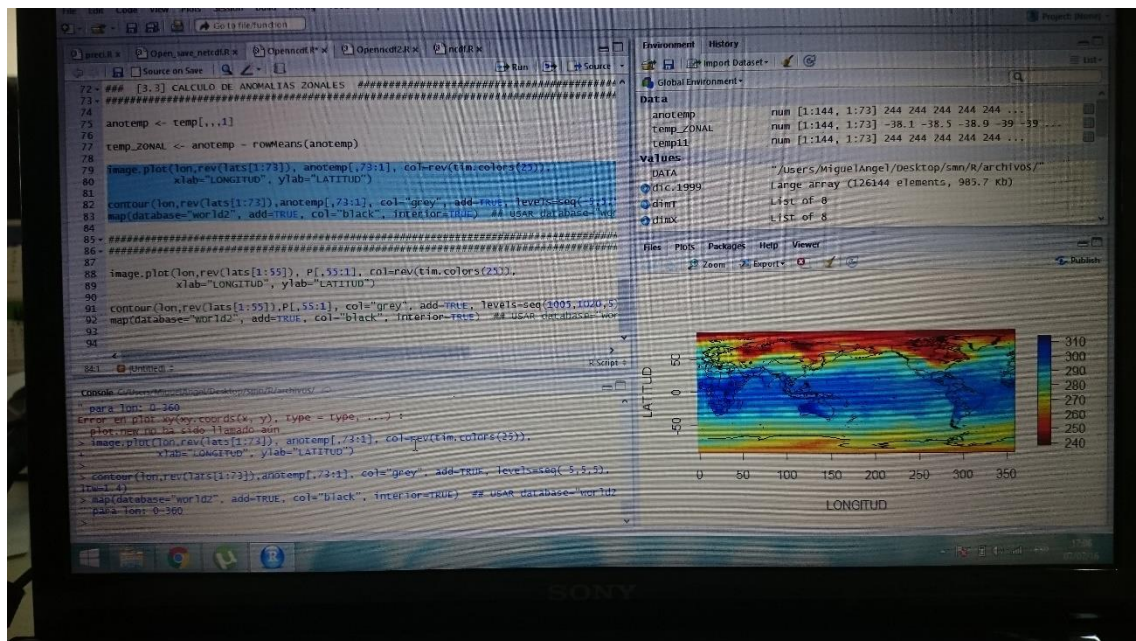


Figura 33: Elaboración de scripts dentro del lenguaje de programación R.



“Este Proyecto es financiado por el CONACYT a través del Programa PROCIENCIA con recursos del Fondo para la Excelencia de la Educación e Investigación – FEEL del FONACIDE”.