

SEQUIÁS: ANTECEDENTES, TRATAMIENTO E IMPACTO EN EL SECTOR AGROPECUARIO ARGENTINO

Dr Gustavo Víctor Necco Carlomagno

Dr José Luis Aiello

Introducción a cargo de la DIYEE-BCR:

Tenemos el agrado de presentar a dos especialistas de primer nivel para analizar la problemática citada en un conjunto de informes de nuestro asesor científico de Guía Estratégica para el Agro, el Dr. José Luis Aiello y el Dr Gustavo Víctor Necco Carlomagno. Adjuntamos sus antecedentes:

El Dr. Gustavo Víctor Necco Carlomagno es Licenciado en Ciencias Meteorológicas en la Universidad de Buenos Aires y Docteur ès Sciences (Meteorología) en la Universidad de París VI, Francia. Dirigió el Instituto de Investigaciones Sinópticas del Servicio Meteorológico Nacional. Fue investigador del proyecto francés EOLE, Laboratoire de Meteorologie Dynamique, ENS/CNRS, París, y científico visitante en la División de Desarrollos del NMC (National Meteorological Center), Washington DC, EEUU.

Fue Miembro de la Carrera del Investigador Científico (CONICET), asesor de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y Miembro del Grupo de Expertos sobre Satélites Meteorológicos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), Ginebra, Suiza. Fue profesor titular en el Departamento de Meteorología de la UBA y en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Desde 2007 es Profesor Libre en el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería, UdelaR, Montevideo.

Fue miembro "in tuiti Personae", del Conseil de Perfectionnement, de la École Nationale de la Météorologie (ENM) francesa, situada en Toulouse, y miembro "Ex-oficio", del Comité Coordinador (COCOM) de la Conferencia Permanente de Directores de Instituciones de Formación de los Servicios Meteorológicos Nacionales (Standing Conference of Heads of Training Institutions of National Meteorological Services, SCHOTI)

Ex director del Departamento de Enseñanza y Formación Profesional de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (1985-2002) y del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) (2002-2004) entre otros cargos de gran relevancia.

El Dr. José Luis Aiello es Doctor en Ciencias de la Atmósfera en la Universidad de Buenos Aires. Post Grado en el International Center for Theoretical Physics, Miramare, Italia y Profesor Titular de Meteorología, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. Ex Presidente del Centro Argentino de Meteorólogos. Ex integrante del Servicio Meteorológico Nacional y de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Ex Integrante del Grupo de Investigación de la Organización Latinoamericana de Energía y fue Director Científico del Programa Exametnet en convenio con la NASA de Estados Unidos y Responsable de la Cooperación Espacial Argentina-Alemania. Fundador de los Proyectos SIBER de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos y de GEA de la Bolsa de Comercio de Rosario, actualmente con el cargo de Asesor Científico y Presidente de JOLAP S.A. y de CCA, consultoras en temas climáticos aplicados a la Producción Agrícola que asisten a GEA-BCR.

Prólogo

Las sequías han sido desde siempre uno de los grandes problemas de la humanidad. Considerado un desastre natural, es el fenómeno climático que provoca la mayor cantidad de afectados en el mundo y que también ha tenido responsabilidad en la desaparición de civilizaciones enteras a lo largo de la historia.

La demanda creciente de agua causada por el aumento de la población y de los niveles de consumo, sumados a los efectos negativos del cambio climático, convierten a la escasez hídrica en una de las prioridades de las agendas mundiales del siglo XXI. La industria, la generación de energía, el transporte fluvial, el turismo, el consumo humano, la ganadería y la agricultura son sólo algunos ejemplos de actividades fuertemente dependientes de la disponibilidad de agua. En algunos casos es posible resolver parcialmente el problema utilizando alternativas más costosas, como la energía termoeléctrica o el transporte terrestre, pero en otras, como la ganadería o la agricultura, no es posible obtener el producto final, por lo menos con la calidad deseada y en cantidad suficiente, sino se dispone del agua necesaria.

Este informe constituye, tal vez, el documento más completo escrito hasta el momento sobre el problema de la sequía y sus impactos, con especial foco en la Argentina. El trabajo está destinado a las personas preocupadas con los grandes temas mundiales, y muy especialmente a aquellos que trabajan en actividades relacionadas con el uso del agua o que sufren los efectos de la sequía. Su lectura será no sólo de gran interés, sino también esencial, para los “tomadores de decisiones” y los especialistas dedicados a las actividades agropecuarias.

El documento fue escrito por dos destacados profesionales de la meteorología y la climatología, con reconocido prestigio y experiencia, y que han dedicado su vida a la investigación científica, la gestión y aplicación de la ciencia, la docencia y la divulgación. Sin embargo, a pesar de los antecedentes académicos de los autores, el texto está redactado de forma accesible para el público en general, logrando un equilibrio perfecto entre el estricto rigor científico y el lenguaje coloquial.

Buena lectura!

Dr. Marcelo Enrique Seluchi
Coordinador General de Operaciones y Modelado
CEMADEN - Centro Nacional de Monitoreo y Alertas de Desastres Naturales
São José dos Campos/SP
Brasil

Introducción

Jose L. Aiello:

Gustavo, me parece muy interesante y necesario que podamos transmitir a los lectores en general, y en particular a los dedicados a la producción y comercialización agrícola-ganadera, conceptos acerca de SEQUÍAS, su previsibilidad, el efecto esperado del cambio climático (CC) y los impactos en regiones argentinas .

Gustavo V. Necco C.:

Vos, desde una posición pragmática, has estado trabajando mucho en el sector agropecuario y sé de los impactos y las consecuencias que hoy se han instalado tanto en los efectos sobre la producción como en el efecto en la volatilidad de mercado. Mi primera sugerencia es que deberíamos diseñar el tratamiento en cuatro partes: GENERALIDADES Y CONCEPTOS BÁSICOS, PREVISIBILIDAD, EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO e IMPACTOS EN ARGENTINA, revisitando estos conceptos y basándonos en la bibliografía disponible de años recientes. Desde el punto de vista agronómico y económico es de gran interés para la actividad humana en las llanuras centrales de Argentina el análisis del impacto que las sequías han tenido en los cultivos regionales.

JL:

Es un poco ambicioso pero comparto tu enfoque, y también el hecho de que lo tratemos en una forma que sea bien accesible y que refleje los esfuerzos que sobre esta problemática han realizado investigadores de nuestro país y del mundo.

El impacto del CC se traduce, entre otros efectos, en un aumento de los “tiempos extremos”, que cuando se dan en forma de pulsos de calor o secos generan déficits hídricos que impactan en los rendimientos de los cultivos o en la producción ganadera. De ahí que el tratamiento de la PREVISIBILIDAD es una parte central de lo que intentaremos.

En GEA (Guía Estratégica para el AGRO, de la BCR) monitoreamos el núcleo de producción granaria con una red de estaciones meteorológicas automáticas y señalamos cuando sea el caso los fenómenos de pulsos de calor, heladas, lluvias intensas y pulsos secos, y hemos tenido muy buenos resultados para entender el comportamiento del sistema de producción instalado.

El fenómeno de SEQUÍA es un tema que está siempre presente y uno de los más perjudiciales.

GVNC:

Entonces manos a la obra. Como siempre me proponés “tareas fáciles” y mi impresión es que vale el intento que haremos para sacar algunas cosas a la superficie.

Resumamos lo que pretendemos de cada parte

Parte 1: CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES

Introduciremos las diferentes categorías de sequías según el lugar del ciclo del agua en el que se produce el déficit de humedad. Discutiremos también la distinción entre sequía, aridez y/o escasez. Finalmente introduciremos los indicadores e índices más comunes utilizados en el tratamiento de sequías.

Parte 2: PREVISIBILIDAD

La predicción de sequías ha presentado un gran desafío para los climatólogos e hidrólogos, así como para los encargados de tomar decisiones y formular políticas. En esta parte intentaremos responder a las preguntas ¿cuál es la previsibilidad potencial de la sequía? o ¿que podríamos hacer para mejorar la previsión de sequías? . En particular discutiremos resultados recientes sobre los límites de previsibilidad en los fenómenos de tiempo y clima, y los métodos utilizados en la previsión de sequías.

Parte 3: EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El efecto del cambio climático sobre la sequía varía de una región a otra. Con un calentamiento global acelerándose, las temperaturas más altas conducen a una mayor evaporación, lo que resulta en el secado del suelo, mayor estrés de las plantas e impactos en la agricultura, incluso en regiones donde no se esperan grandes cambios en precipitaciones. De acuerdo con el reciente informe del IPCC si las emisiones de gases de efecto invernadero no se reducen, se proyecta que alrededor de un tercio de las áreas terrestres mundiales sufrirán al menos una sequía moderada para el 2100. En esta parte discutiremos, en general, sobre cual sería el efecto esperado del cambio climático actual sobre las sequías.

Parte 4: IMPACTOS EN ARGENTINA

Esta es la parte más extensa, donde nos enfocamos en los impactos sobre nuestras regiones. Comenzamos con una revisión histórica, donde se describen las ocurrencias de sequías desde las épocas coloniales hasta el comienzo de la era instrumental, y continuamos sobre lo que se sabe sobre sequías en regiones argentinas, mediante una breve descripción y discusión de los trabajos más recientes sobre el tema, disponibles en la literatura especializada. Se incluye una completa lista de referencias de los artículos citados y discutidos. También agregamos apéndices con una lista de centros operativos globales, regionales y locales con información y guía en línea sobre sequías, y con breves introducciones sobre los fenómenos globales que influyen sobre los eventos hidro-meteorológicos extremos y sobre la influencia de la deforestación del Amazonas en el ciclo hidrológico de la Cuenca del Plata.

Comencemos:

Parte 1

LAS SEQUÍAS: CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES

JL:

Contame algunas generalidades de lo que se entiende por SEQUÍA

GVNC:

Las sequías han sido objeto de gran preocupación en las principales praderas del mundo, por su influencia en la producción de alimentos y también en la degradación de los suelos por erosión eólica. Fueron la causa más importante de personas afectadas por desastres naturales en todo el mundo a lo largo del siglo XX y de acuerdo con la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR 2015), 50 millones y medio de personas en el mundo se vieron afectadas por la sequía sólo en 2015. En épocas recientes han afectado seriamente extensas áreas de EEUU y Brasil, por ejemplo.

Las sequías se han vinculado directamente a la pobreza; según FAO fueron la causa de un tercio de las pérdidas globales de producción agrícola entre 2005-2015 por un monto de 96.000 millones de dólares; han sido asociadas con importantes efectos negativos a la salud humana; al incremento de la in-eguidad de género; al detrimento de la seguridad hídrica; a reducciones del potencial energético hidroeléctrico global producto de un clima cambiante; y han sido también relacionadas con el surgimiento de conflictos bélicos y rupturas de los estados de paz o un factor concurrente, al menos, a la existencia de determinados conflictos o inestabilidad política (Ref. 1).

JL:

Empecemos por dar las distintas definiciones de SEQUÍA

GVNC:

En un sentido general la **sequía** se define, según la RAE, como “*Tiempo seco de larga duración. Durante el período de sequía, el agua disponible de una región geográfica se ubica por debajo de los parámetros habituales por lo que no resulta suficiente para satisfacer las necesidades de los seres humanos, plantas y animales*”. En el ámbito meteorológico es usual definirla como *déficit de lluvias durante un período de tiempo prolongado –una temporada, un año o varios años– en relación con la media estadística multi-anual de la región en cuestión, que causa un serio desequilibrio hidrológico*. La falta de lluvia da lugar a un suministro insuficiente de agua para las plantas, los animales y los seres humanos. Notemos que hay más de 150 definiciones de sequía en la literatura científica (Ref. 2).

Es común distinguir entre diferentes tipos de sequía: *meteorológica, hidrológica, agrícola/agronómica o hidroedáfica, socio-económica* que definen el inicio, la severidad y el fin de una sequía, y se refieren al sector, sistema o grupo social impactado por el fenómeno.

Sequía meteorológica: Cuando se produce una escasez continuada de las precipitaciones. Es la sequía que da origen a los restantes tipos de sequía y normalmente suele afectar a zonas de gran extensión. El origen de la escasez de precipitaciones está relacionado con el comportamiento global

del sistema atmósfera-océano, donde influyen tanto factores naturales como factores antrópicos. Las condiciones atmosféricas que producen déficit de precipitación son muy variables de una región a otra por lo que esta sequía está vinculada a una región específica. Si bien el indicador primario de disponibilidad de agua es la precipitación, en muchos casos este tipo de sequía también puede implicar temperaturas más altas, vientos de fuerte intensidad, humedad relativa baja, incremento de la evapotranspiración, menor cobertura de nubes y mayor insolación.

Sequía hidrológica: Se asocia con los efectos que provocan los períodos de poca precipitación sobre los niveles de los ríos, los embalses y los acuíferos (embalses de agua subterráneos). Esta sequía no sólo se puede deber a falta de lluvias sino también de cómo se use el agua, es decir a una inadecuada actividad humana.

Sequía agrícola/agronómica o hidroedáfica: Suele definirse como déficit de humedad en la zona radicular para satisfacer las necesidades de un cultivo dado, en un lugar y en una época determinada. La sequía agronómica puede ser distinta según el cultivo que se considere (trigo, girasol, maíz, soja, otros). También puede distinguirse entre agricultura de secano y de regadío. Para la agricultura de secano es el déficit de humedad de la tierra subsiguiente a una sequía meteorológica y que produce efectos negativos en la producción de la cosecha y/o en el crecimiento de vegetación natural. Para la agricultura de regadío es la escasez de agua para abastecer a los sistemas de irrigación debido a la sequía en las aguas superficiales o subterráneas que abastecen al uso agrícola.

Sequía socioeconómica: Escasez de agua que afecta a las personas y a la actividad económica como consecuencia de la sequía. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica con consecuencias económicas desfavorables. La creciente presión de la actividad humana sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes. Puede mitigarse con una buena gestión.

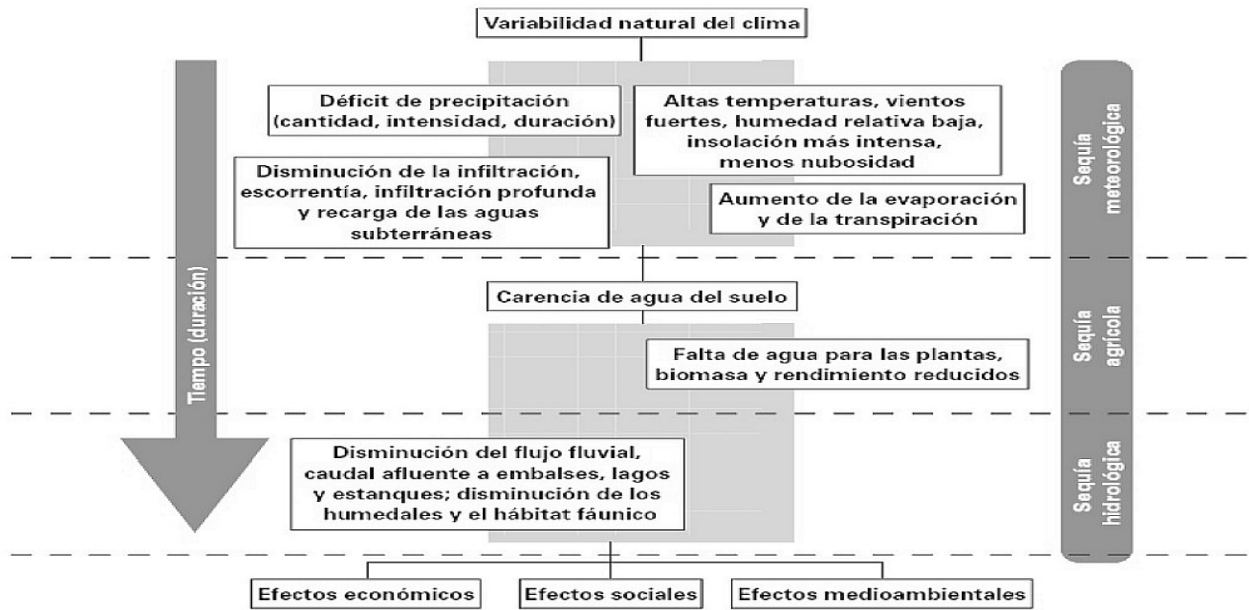
En tiempos recientes también se han propuesto las llamadas “*sequías repentinas*” (“flash droughts”) que corresponden a una sequía con inicio o intensificación muy rápida, y que se originan por tasas de precipitación más bajas de lo normal, acompañadas de temperaturas, vientos y radiación anormalmente altas. Esta definición se puede aplicar a todos los tipos anteriores.

También se ha definido una “*sequía ecológica*” como un episodio de déficit de disponibilidad de agua que lleva a los ecosistemas a superar sus umbrales de vulnerabilidad, impactando en los servicios del ecosistema y desencadenando retroalimentaciones con los sistemas naturales y humanos.

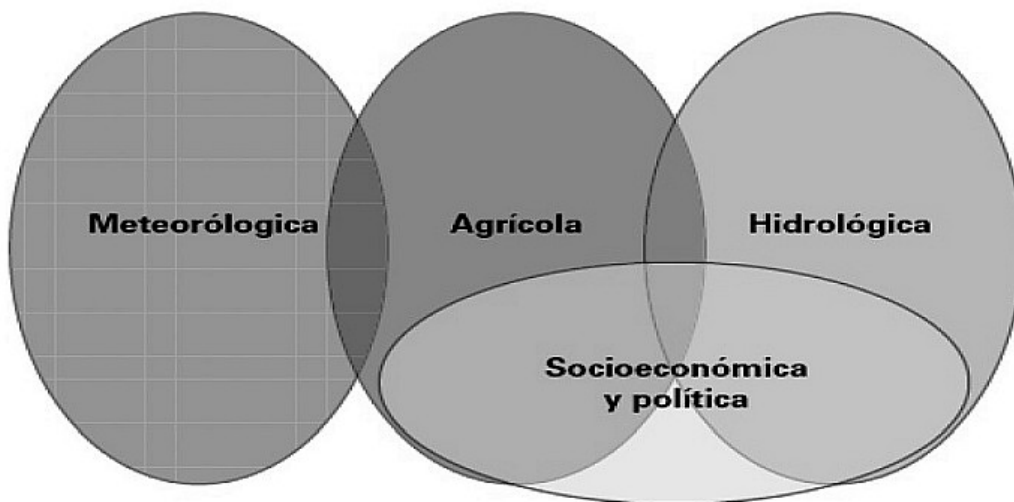
Todas las sequías son consecuencia esencialmente de un déficit de precipitación (sequía meteorológica) que a su vez puede provocar otros tipos de sequía, como los definidos anteriormente.

Los siguientes gráficos (Fuente: Centro de Mitigación de Sequías, Universidad de Nebraska-Lincoln, EEUU) ilustran la secuencia de sucesos de sequía y sus efectos para los tipos de sequía

usualmente aceptados y las interrelaciones entre las sequías meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica.



Énfasis cada vez menor en el fenómeno natural en sí (deficiencias de precipitación)
 Énfasis cada vez mayor en la gestión del agua como recurso natural
 Complejidad cada vez mayor de los efectos y conflictos



Tiempo/Duración del fenómeno

También suele distinguirse entre *sequía*, *aridez* y/o *escasez* (Ref. 2):

La *sequía*, entendida como anomalía temporal de precipitación o caudal natural, puede producir, o no, una situación de insuficiencia en los suministros de agua, en función del nivel de demanda de agua existente en el área y de las características, en general, de los sistemas de explotación del recurso.

La *escasez* representa una situación permanente de déficit en relación con la demandas de agua en un sistema de recursos de ámbito regional, caracterizado, bien por un clima árido o bien por un rápido crecimiento de las demandas de consumo.

La *aridez* es una situación estructural natural de una región y por tanto también permanente, que debe diferenciarse de la sequía, que es una anomalía natural transitoria, aún prolongada.

JL:

Después de lo anterior viene como de la mano que contemos cuales son los INDICADORES o INDICES DE SEQUÍAS.

GVNC:

Si, coincido, pues hay varias formas de “caracterizar” a una Sequía y las mismas dependen de la disponibilidad de datos para trabajar con alguno. Es importante distinguir los *indicadores* (indicators) de los *índices*(indices) de sequía, ya que suelen confundirse.

Según la OMM (Ref. 3) los **indicadores** son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías. Cabe citar, por ejemplo, la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, la humedad del suelo y el manto de nieve. En tanto que los **índices** suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores enumerados. Tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las sequías en el entorno en un periodo de tiempo determinado.

Desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores. Vigilar el clima en diversas escalas temporales permite reconocer los periodos húmedos de corta duración dentro de las sequías de larga duración o los periodos secos de corta duración.

La Ref. 3 presenta y detalla una variedad de indicadores e índices destacando la importancia que los indicadores o índices de sequía reflejen y representen de manera precisa los efectos que se producen durante las sequías. Estos efectos de las sequías pueden variar a medida que se desarrollan en función de la región y la estación.

En esta nota solo discutiremos los más usados. El lector interesado puede consultar la referencia citada para ampliar la información.

Como indicadores típicos podemos citar:

DECILES: Mediante el periodo integro de registro de los datos de precipitación de un lugar, se clasifica la frecuencia y la distribución de la precipitación. El primer decil esta compuesto por la cantidad de lluvia en que no se supera el 10% mas bajo de los valores, y el quinto decil constituye la

mediana. En esta metodología se pueden tener en cuenta valores diarios, semanales, mensuales, estacionales y anuales, dada su flexibilidad al comparar los datos actuales con el registro histórico de cualquier periodo determinado.

Puesto que analiza una sola variable, es una metodología sencilla y flexible para muchas situaciones. Mediante umbrales claramente definidos, los datos actuales se sitúan en un contexto histórico y se puede reconocer la situación de la sequía. Útil en situaciones de humedad y sequía. Dado que brinda la posibilidad de examinar distintas escalas temporales e intervalos de tiempo, los deciles se pueden utilizar en situaciones de sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. Como punto débil, común con otros indicadores que solo utilizan la precipitación, no se tienen en cuenta los efectos de la temperatura ni de otras variables durante el desarrollo de la sequía.

PPN: El porcentaje de precipitación normal (PPN) se refiere a la relación que existe entre la precipitación acumulada en un año y la precipitación media anual, para una región y en un periodo dado, expresado de manera porcentual. La precipitación media anual se le conoce como *precipitación normal* y se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones anuales ocurridas en un periodo no menor de 30 años.

Entre los índices más usados se encuentran:

PDSI: Un índice pionero es el *Índice de la severidad de la sequía de Palmer* (PDSI) que fuera desarrollado en 1965 por Palmer y se basa en el concepto de suministro de agua. Es un algoritmo que permite medir la pérdida de humedad del suelo. Es adecuado para su aplicación a zonas con topografía uniforme.

El objetivo del Índice de Severidad de Sequía de Palmer es proporcionar medidas estandarizadas de condiciones de humedad, de tal forma que permita hacer comparaciones entre condiciones locales y entre duraciones. Palmer desarrolló criterios para determinar cuando una sequía o un período húmedo se inicia y termina.

SPI: El *índice de precipitación estandarizada* (SPI - Standardized Precipitation Index) o *índice normalizado de precipitación* (INP) fue desarrollado por McKee y otros investigadores en 1993. Este índice normalizado permite estudiar diferentes escalas de tiempo y se recomienda para registros de largo plazo. El SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Bajo este contexto, puede deducirse que registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente, darán valores del SPI positivos, esto representa condiciones de humedad; mientras que registros de precipitación inferiores al promedio histórico del mes correspondiente arrojarán valores del SPI negativos, lo cual indica una intensidad en el déficit de humedad. El SPI se destaca, entre otros aspectos, por su amplia difusión internacional.

A pesar de sus múltiples ventajas existen una serie de desventajas en su utilización, las más notables : a) la dificultad en su interpretación por el usuario final y b) una caracterización incorrecta de la condición de sequías en ambientes áridos y semi-áridos (Ref. 1).

IRS: *Índice de Riesgo de Sequía* (IRS) que está formado por cuatro componentes: precipitación media anual corregida en función de la temperatura media anual, estacionalidad pluviométrica, variabilidad y persistencia de la sequía. Este índice se definió para poder determinar la severidad, y duración de la sequía y para predecir el inicio y el final de este período.

NDVI: *Índice diferencial normalizado de vegetación* (NDVI) que se obtiene de las observaciones a distancia de radiómetros instalados en satélites meteorológicos operativos. En un punto determinado de la imagen el NDVI es igual a la diferencia en las intensidades de la luz reflejada en el rango rojo e infrarrojo dividido por la suma de estas intensidades y está directamente relacionado con la densidad de la vegetación.

Este índice define valores de -1.0 a 1.0, donde los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto. Los valores muy pequeños (0,1 o menos) corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales.

En forma sencilla, el NDVI es una medida del estado fito-sanitario basada en la manera en que una planta refleja la luz en ciertas frecuencias (algunas ondas se absorben y otras se reflejan). Este índice está disponible para usarse en tiempo real y se utiliza a menudo en todo el mundo para vigilar sequías, predecir la producción agrícola, ayudar a predecir zonas de incendios y áreas en proceso de desertificación. Es el índice preferido para el seguimiento global de la vegetación.

Referencias

1. *Atlas de sequías de América Latina y el Caribe*, Unesco y CAZALAC, 2018.
2. *¿Qué es la sequía?*, Observatorio Nacional de la Sequía, España
<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/>
3. *Manual de indicadores e índices de sequía*, OMM N° 1173, 2016.

Parte 2

PREVISIBILIDAD DE LAS SEQUÍAS

Hemos visto (Parte 1) que la sequía es un evento extremo que ocurre naturalmente y se caracteriza por precipitaciones por debajo de lo normal durante un período de meses a años.

También vimos que la sequía es un fenómeno complicado y se encuentra entre los peligros naturales menos comprendidos debido a sus múltiples mecanismos causantes o factores contribuyentes que operan en diferentes escalas temporales y espaciales. Si bien esencialmente se origina en un déficit de precipitación, en general el desarrollo y la evolución de la sequía son el resultado de interacciones complicadas entre anomalías meteorológicas, procesos en la superficie terrestre y actividades humanas.

La demanda de agua ha aumentado debido, además del cambio climático, al crecimiento de la población y la expansión de los sectores agrícola e industrial, lo que agrava los devastadores impactos de la sequía en muchas partes del mundo. Por lo tanto, una previsión fiable de sequías es de primordial importancia para una buena gestión agrícola y de los recursos hídricos al aumentar y mejorar la preparación previa.

Debido a su complejidad, con diversos orígenes y ocurrencia en diferentes escalas temporales y espaciales, la predicción de sequías ha presentado un gran desafío para los climatólogos e hidrólogos, así como para los encargados de tomar decisiones y formular políticas.

Concepto de previsibilidad

La habilidad (*skill*) para pronosticar sequías tiende a ser limitada a mediano plazo, especialmente en las regiones con menor impacto de los fenómenos globales meteorológico-oceánicos como El Niño –La Niña/Oscilación Austral (ENOS). Por eso, hay un fuerte interés en la cuestión ¿que podríamos hacer para mejorar la previsión de sequías? O ¿cuál es la previsibilidad potencial de la sequía?.

Básicamente, la previsibilidad (*predictability*) caracteriza la "capacidad de ser predicho" mientras la habilidad (*skill*) de pronóstico caracteriza "la capacidad de predecirlo"(Ref. 1).

Ha habido en años recientes un gran esfuerzo en el área de la previsibilidad de los fenómenos de tiempo y del clima (Ref. 2). Aclaremos que con *tiempo o temperie* nos referimos a elementos diarios como temperatura, precipitación, viento o nubosidad que cambian en forma horaria o diurna, en tanto que el *clima* se refiere al comportamiento del tiempo en periodos largos, normalmente 30 años (una síntesis estadística del tiempo).

La previsibilidad se estudia normalmente mediante el uso de modelos físico-matemáticos de la atmósfera. ¿Porqué necesitamos modelos físico-matemáticos? Un conjunto, aún completo, de las observaciones meteorológicas de todas las estaciones de superficie, de altura y de los satélites operativos nos daría una vista instantánea, actual, del estado de la atmósfera. Para saber el tiempo que hará mañana nos hace falta un modelo (físico matemático) que simule, en base a principios de la física Newtoniana, cómo evoluciona la atmósfera. Mas aún, el conjunto de estas observaciones de orígenes diferentes no puede dar una imagen completa, coherente, de la situación meteorológica en

un momento dado. Para que este conjunto de observaciones se ajuste de forma coherente para obtener un estado completo, global, de la atmósfera, hace falta la aplicación de un modelo.

La atmósfera es casi, pero no totalmente, determinista. Edward Lorenz, un meteorólogo pionero en los temas de previsibilidad y caos en la atmósfera, elaboró una imagen que ilustra bien esta situación: la de la mariposa cuyo batir de alas una quincena de días más tarde cambia el tiempo en zonas remotas del planeta. Sin dudas es una metáfora indemostrable, pero ilustra los procesos que alteran las previsiones y limitan su utilidad.

El límite absoluto de previsibilidad de dos semanas es un valor teórico; en la práctica es bastante menor debido, por un lado, a los errores del estado inicial y, por otro, a la imperfección de los modelos. Podemos decir que, en la actualidad los sistemas más avanzados de previsión numérica del tiempo dan resultados útiles hasta alrededor de una semana. Las previsiones de uno a dos-tres días son muy buenas o buenas; más allá se degradan poco a poco, hasta perder todo interés.

¿Hay esperanzas de ir más allá de los límites deterministas? Si, no sólo con la ayuda de la estadística, sino también del estudio del comportamiento a largo plazo del sistema Tierra (en particular de las interacciones entre sus componentes: atmósfera, tierra, océanos, hielos, biósfera). Mal que le pese a los impulsores del “new age” y el post-modernismo las leyes físicas se siguen cumpliendo (aunque a veces, es cierto, no se comprendan bien las causas).

A partir de los diez días la atmósfera tiene un comportamiento macroscópicamente previsible: las estaciones de año y las zonas climáticas testimonian de fenómenos reguladores de su circulación general. Un ejemplo típico es el fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (o del Sur) ENOS, ya visto, que pone en juego interacciones con la circulación oceánica, mucho más lenta a evolucionar que la atmósfera. Los regímenes de tiempo ligados al Niño tienen fuertes potenciales predictivos estacionales. También la temperatura del mar evoluciona lentamente y los modelos que acoplan la atmósfera con el océano podrían dar prospectivas estadísticamente útiles hasta uno o dos años. También hay otros fenómenos de evolución lenta que influyen en los regímenes de tiempo, como la humedad del suelo o la extensión de los campos de nieve.

La previsibilidad de los extremos climáticos (p. ej. sequía) ha recibido poca atención. Hay autores que encuentran que la previsibilidad es más alta que la habilidad de pronóstico, y la brecha entre ellos presenta un margen de mejora, pero otros argumentan que no hay necesariamente una relación entre previsibilidad y habilidad de pronóstico. La inconsistencia de estos estudios sugiere que la previsibilidad y la habilidad de pronóstico pueden depender de los modelos climáticos usados, las regiones de estudio y las variables climáticas. Además, también se necesita una investigación cuidadosa sobre si la previsibilidad de la sequía estacional está asociada con el ENOS y cómo los modelos representan tal asociación. (Ref. 1)

Métodos en la previsión de sequías

Generalmente se han utilizado tres tipos de métodos para la predicción de sequías: *estadístico, dinámico y métodos híbridos* (Ref. 1).

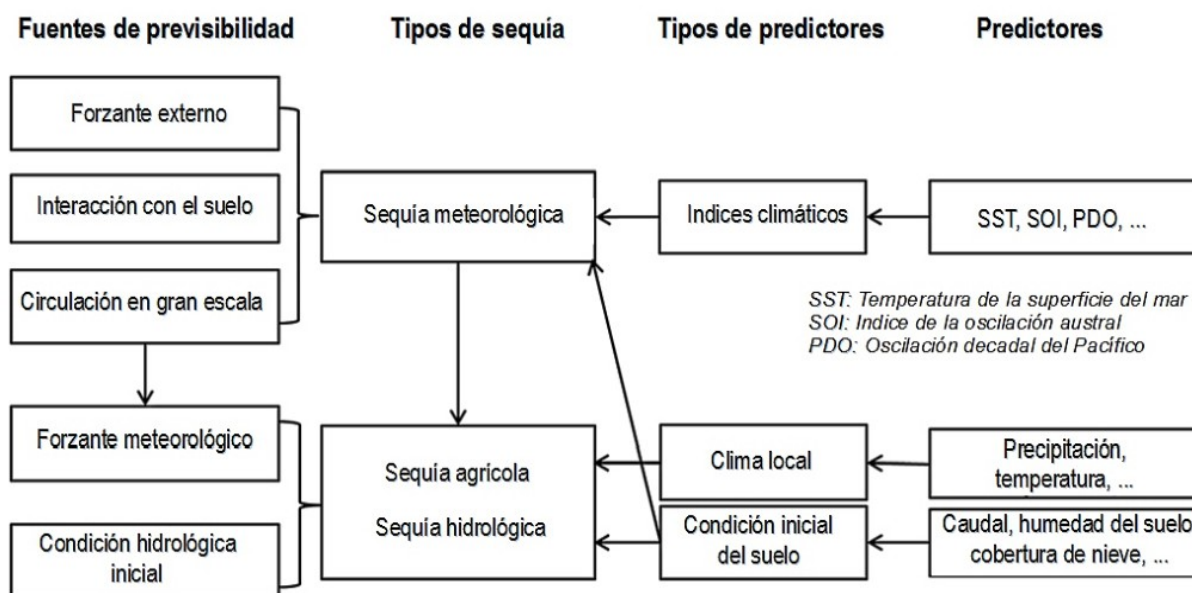
El método de predicción estadística utiliza relaciones empíricas de registros históricos, tomando diferentes factores de influencia como predictores.

Con una mayor capacidad computacional y una mejor comprensión de la físico-dinámica del clima, la predicción de sequías en los últimos años se ha abordado más con modelos de circulación general (*GCM – General Circulation Models*) de última generación, que proporcionan una predicción basada en los procesos físicos de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre.

La última década también ha sido testigo del desarrollo de métodos de predicción híbridos que combinan el pronóstico de métodos tanto estadísticos como dinámicos.

El enfoque estadístico

Para la predicción estadística normalmente se identifica primero una variedad de predictores a partir de registros hidroclimáticos históricos (incluidos los oceánicos, atmosféricos y componentes terrestres) y luego se alimentan a diferentes modelos estadísticos para predecir diferentes tipos de sequías.



La figura anterior (Ref. 1) presenta las fuentes de previsibilidad de diferentes tipos de sequía y los predictores de uso común para la predicción estadística de sequías en una escala de tiempo estacional.

Si bien los predictores generalmente se obtienen a partir de observaciones históricas (o reanálisis) que ya se conocen antes del período de predicción, con los avances actuales en el pronóstico del tiempo y el clima los predictores también pueden obtenerse a partir del pronóstico dinámico para la predicción de variables hidroclimáticas.

En la vigilancia y seguimiento de las sequías además del estudio de series de los índices ya mencionados se aplican métodos estadísticos para estimar frecuencias y periodos de retorno.

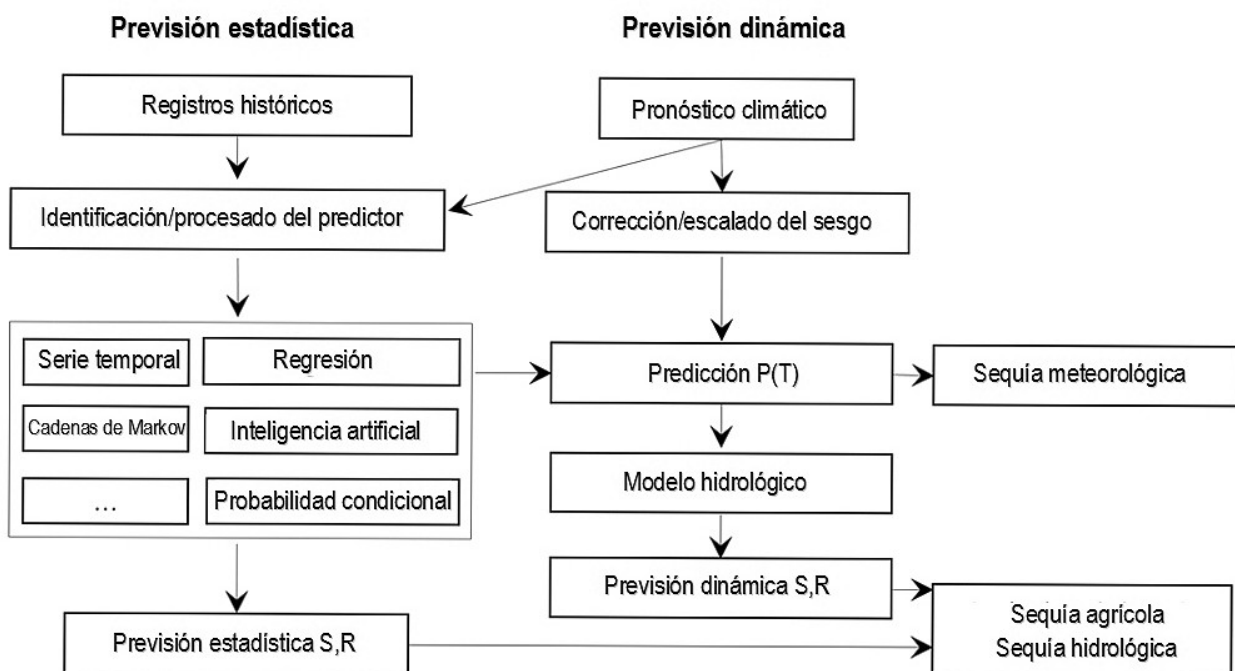
El enfoque dinámico

El método dinámico para la predicción de sequías se basa en modelos climáticos y / o modelos hidrológicos que simulan procesos físicos de la atmósfera, el océano y la tierra. Aquí se aplican los modelos físico-matemáticos descritos anteriormente. La predicción dinámica de sequías hidrológicas y agrícolas en escalas de tiempo estacionales generalmente se logra sobre la base de modelos hidrológicos guiados por modelos climáticos con cierta habilidad de predicción, que depende tanto de los forzamientos climáticos como de las condiciones iniciales.

Debido a la resolución gruesa de los pronósticos con modelos climáticos y a sus sesgos, se han comúnmente utilizado técnicas de posprocesamiento y de conjuntos multi-modelo para mejorar la habilidad de predicción.

Comparación de los enfoques estadístico y dinámico

La figura siguiente (Ref. 1) describe un marco esquemático de los métodos estadísticos y dinámicos de predicción de sequías (la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo y la escorrentía se abrevian como P, T, S y R, respectivamente).



Generalmente, es difícil determinar qué método es finalmente el mejor, y la habilidad predictiva siempre depende de la temporada, región y el periodo de previsión. Sin embargo, existe una clara ventaja de los métodos dinámicos sobre los estadísticos en la predicción hidrológica si el pronóstico de precipitación con modelos físico-matemáticos (*GCMs*) da buenos resultados. Además, para la predicción a largo plazo la habilidad predictiva de los métodos dinámicos es generalmente más alta que la de los métodos estadísticos. Cuando la habilidad de predicción del

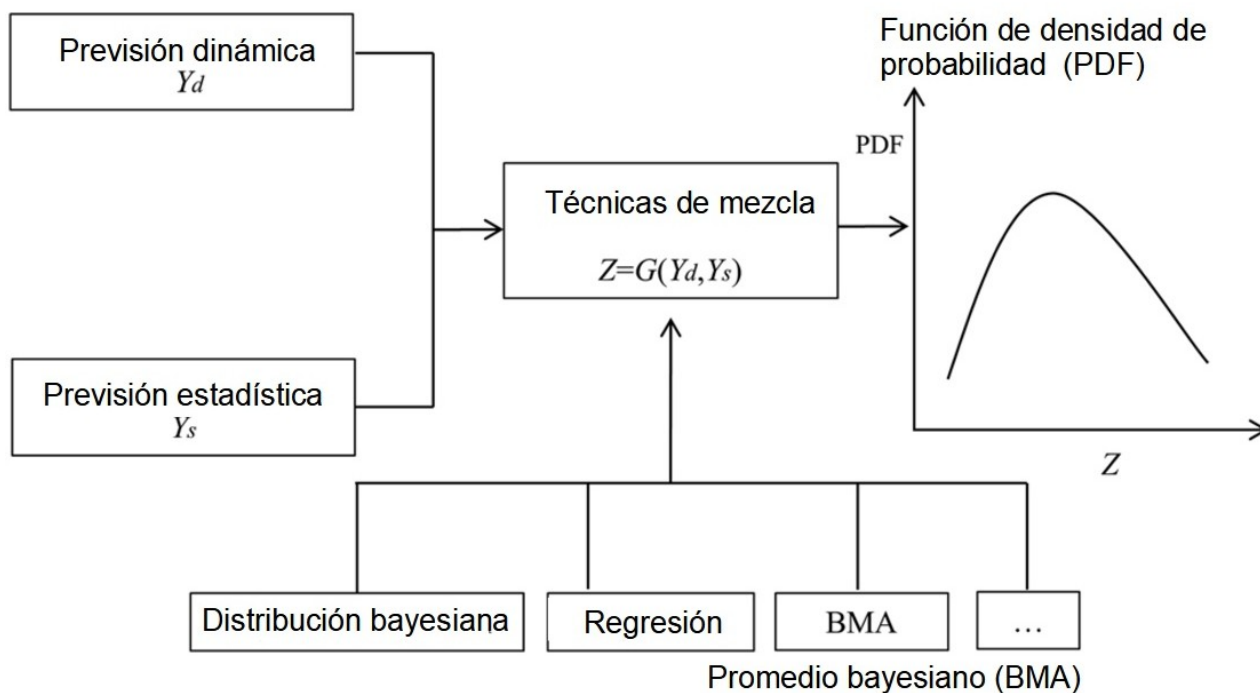
pronóstico climático con modelos dinámicos es baja, la predicción estadística puede proporcionar un pronóstico útil.

Varios estudios han demostrado que los dos tipos de métodos pueden complementarse entre sí. En general, los métodos estadísticos y dinámicos son complementarios en la predicción de la sequía (y del clima) en el sentido de que una mejor comprensión de los pronósticos estadísticos exitosos puede conducir a mejores modelos dinámicos, y viceversa.

El enfoque híbrido

La predicción híbrida estadístico-dinámica de las sequías implica principalmente dos pasos: calibrar el pronóstico del clima para corregir el sesgo (y la dispersión) de los pronósticos de los modelos de circulación general físico-matemáticos (*GCMs*) y combinarlo con pronósticos de múltiples fuentes.

Se muestra en la figura siguiente un marco esquemático de la predicción híbrida de sequía, que fusiona diferentes pronósticos (Ref. 1).



Marco esquemático de predicción híbrida de sequías basado en un indicador de sequía Z mediante la fusión de la previsión dinámica (Y_d) y la previsión estadística (Y_s) con la función G.

Las técnicas de fusión o mezcla (*merging*) de uso común, incluido el modelo de regresión, la distribución posterior bayesiana y el promedio bayesiano BMA (*Bayesian Model Averaging*), pueden emplearse para obtener una predicción probabilística. El método de regresión se puede utilizar directamente para incorporar múltiples indicadores de pronóstico climático y pronóstico estadístico (u observaciones) con el objetivo de obtener coeficientes y parámetros de cada

pronóstico en forma de combinación lineal. La distribución posterior bayesiana se puede utilizar para actualizar el pronóstico dinámico con la distribución previa derivada del pronóstico estadístico. Además, los dos tipos de pronósticos también se pueden combinar a través de promedios bayesianos para obtener el peso óptimo de cada miembro para producir una predicción única.

Se ha demostrado que el método híbrido estadístico-dinámico, basado en la calibración, el puenteo (“*bridging*”) y la fusión (“*merging*”) - CBaM - proporciona mejores pronósticos de las variables climáticas mediante el posprocesamiento de los resultados de los GCMs basados en un modelo de probabilidad conjunta bayesiano (para calibración y puente) y promedio bayesiano (para fusionar). Para este método, el "puenteo" representa la predicción estadística que utiliza los pronósticos de índices climáticos de los GCMs como predictores para producir pronósticos alternativos y la "fusión" se usa para combinar de manera óptima los diferentes pronósticos.

En ciertos casos también se denomina predicción híbrida estadístico-dinámica a la combinación del pronóstico dinámico con predictores obtenidos de observaciones en un marco de predicción estadística.

En la última década, la predicción híbrida estadística-dinámica ha prestado mucha atención a integrar la habilidad de predicción de ambos modelos. Se ha demostrado que se puede lograr el mejor pronóstico mediante la combinación de todas las fuentes de predicciones para respaldar una toma de decisiones bien informada. Dado que la calibración del pronóstico climático es una componente importante de la predicción híbrida, el desarrollo de nuevas técnicas de posprocesamiento de predicción climática e hidrológica es una tarea esencial para mejorar la predicción de sequías. Además, las técnicas de fusión de diferentes pronósticos de modelos dinámicos o estadísticos deben investigarse más a fondo para lograr una combinación óptima.

El desarrollo de modelos híbridos de predicción de sequías y la evaluación de su desempeño en diferentes regiones y estaciones para diferentes tipos de sequía brindarían nuevas oportunidades para mejorar la capacidad de predicción estos fenómenos.

Como ejemplo a destacar mencionemos la aplicación por el Centro Europeo (ECMWF) de su sistema de previsión por *ensembles* (conjuntos) EPS al seguimiento (monitoreo) y previsión de las sequías meteorológicas usando técnicas híbridas. Han tenido cierto éxito, por ejemplo, en prever las condiciones secas asociadas con La-Niña en septiembre-diciembre de 2010 en el Cuerno de África, que fueron correctamente pronosticadas por los pronósticos estacionales del ECMWF a partir de junio de 2010 en adelante . Siguen aplicando este enfoque para el área Europea (Ref. 3).

Perspectivas

Aún existen importantes desafíos en la predicción de sequías a mediano y largo plazo, en un entorno cambiante resultante de factores naturales y antropogénicos. Las perspectivas futuras de investigación para mejorar la predicción de sequías incluyen, entre otros elementos, la asimilación de datos de alta calidad, el desarrollo mejorado de modelos con procesos claves relacionados con la ocurrencia de sequías, el pronóstico de conjunto (*ensemble*) óptimo para seleccionar o ponderar estos conjuntos, y la predicción de sequía híbrida fusionando pronósticos estadísticos y dinámicos.

El uso de técnicas de inteligencia artificial, aprendizaje automático (*machine learning*) y aprendizaje profundo (*deep learning*) también comienza a experimentarse para el caso de sequías.

Como hemos visto las sequías abarcan una enorme variedad de escalas temporales y es importante mejorar los esquemas de previsión que van más allá del medio-plazo (dos semanas). Existe por lo tanto un interés creciente en las comunidades científicas, operativas y de aplicaciones en el desarrollo de pronósticos sub-estacionales a estacionales para proporcionar una alerta temprana de eventos de alto impacto como inundaciones, sequías, olas de calor y frío.

Para cerrar la brecha existente entre las previsiones meteorológicas de medio-plazo y los pronósticos estacionales la OMM (Organización Meteorológica Mundial) dentro del Programa de Investigación Meteorológica Mundial (WWRP) y el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP), lanzó en el año 2013 una iniciativa de investigación conjunta: el Proyecto para la Predicción Subestacional a Estacional (S2S). El proyecto intenta mejorar la habilidad de pronóstico y la comprensión en las escalas de tiempo sub-estacional a estacional, con especial énfasis en los eventos climáticos de alto impacto, y promover la adopción de los resultados por parte de los centros operativos, así como su explotación por parte de la comunidad de aplicaciones. La Fase II del proyecto S2S comenzó en enero de 2019 y continuará hasta 2023, incluyendo nuevos conjuntos de sub-proyectos científicos así como nuevas actividades de investigación operativas (Ref. 4), por lo que tenemos cierta esperanza que se siga expandiendo el conocimiento sobre la previsión de eventos extremos, en particular las sequías.

Referencias

4. Hao, Z., Singh, V. P., & Xia, Y. (2018). *Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects*. *Reviews of Geophysics*, 56, 108–141.
5. Krishnamurthy, V. (2019), *Predictability of weather and climate*, *Earth and Space Science*, 6, 1043–1056.
6. C. Lavaysse, J. Vogt and F. Pappenberger (2015), *Early warning of drought in Europe using the monthly ensemble system from ECMWF*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3273–3286.
4. WCRP World Climate Research Programme, *Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Prediction Project*, <http://s2sprediction.net/static/about>

Parte 3

SEQUIÁS: EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El clima de la Tierra ha cambiado a través de la historia. En los últimos 650.000 años, se han dado siete ciclos de avances y retrocesos glaciales, con el abrupto final de la última era de hielo hace alrededor de 11.700 años, lo que marcó el comienzo de la era climática moderna y de la civilización humana. La mayoría de estos cambios climáticos se atribuyen a variaciones muy pequeñas en la órbita de la Tierra, las cuales alteran la cantidad de energía solar que recibe nuestro planeta.

La tendencia al calentamiento actual resulta de particular importancia ya que es extremadamente posible (con una probabilidad mayor del 95 por ciento) que la mayor parte de ella sea el resultado de la actividad humana desde mediados del siglo XX, y avanza a un ritmo sin precedentes.

Desde hace medio siglo los satélites que orbitan la Tierra y otros avances tecnológicos han permitido a los científicos tener una visión global: han recolectado muchos tipos de información diferentes sobre nuestro planeta y su clima a escala planetaria. Este conjunto de datos, reunido durante muchos años, revela signos inequívocos de un calentamiento.

A mediados del siglo XIX, se demostró que el dióxido de carbono y otros gases llamados “de efecto invernadero” atrapan el calor. Su capacidad para afectar la transferencia de la energía infrarroja a través de la atmósfera es la base científica de muchos instrumentos que se ha puesto en órbita. No cabe duda de que el aumento de los niveles de los gases de efecto invernadero debe provocar que, como respuesta, la Tierra se caliente.

Los núcleos de hielo extraídos de Groenlandia, la Antártida y los glaciares de montañas tropicales muestran que el clima de la Tierra responde a cambios en los niveles de los gases de efecto invernadero. Asimismo, se puede hallar evidencia antigua en anillos de árboles, sedimentos oceánicos, arrecifes de coral y capas de rocas sedimentarias. Esta evidencia del clima antiguo, o “paleoclima”, revela que el actual calentamiento está ocurriendo aproximadamente diez veces más rápido que la tasa promedio de calentamiento que se dio tras las épocas glaciales. Tras la última Edad de Hielo, el dióxido de carbono producido por la actividad humana está aumentando a una velocidad más de 250 veces mayor que el proveniente de fuentes naturales.

La evidencia de un rápido calentamiento global, desestabilizando el sistema climático, es convincente (Ref. 1):

Aumento de la temperatura global : La temperatura promedio de la superficie del planeta ha aumentado aproximadamente 1,18 grados centígrados desde finales del siglo XIX, un cambio impulsado en gran medida por el aumento de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y otras actividades humanas. La mayor parte del calentamiento se produjo en los últimos 40 años, siendo los más cálidos los siete años más recientes. Los máximos registrados se observan en los años 2016 y 2020.

Océanos que se calientan: Los océanos han absorbido gran parte de este aumento de calor: los 100 metros más superficiales del océano muestran un calentamiento de más de 0,33 grados Celsius

desde 1969. La Tierra almacena el 90% de la energía sobrante en el océano. Un punto clave es que los océanos tienen, por lejos, la mayor capacidad de absorción de calor del sistema climático.

Capas de hielo que se encogen: Las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida han disminuido sus masas. Datos del Experimento sobre Clima y Recuperación de la Gravedad, de la NASA, muestran que Groenlandia perdió un promedio de 279.000 millones de toneladas de hielo por año entre 1993 y 2019, mientras que la Antártida perdió aproximadamente 148.000 millones de toneladas de hielo por año durante el mismo período.

Retroceso glacial: Los glaciares se están retrayendo casi en todas partes del mundo, lo que incluye a los Alpes, el Himalaya, los Andes, las Rocallosas, Alaska y África.

Cubierta de nieve reducida: Observaciones realizadas mediante satélites revelan que, en primavera, la cubierta de nieve del hemisferio norte ha disminuido durante las últimas cinco décadas y que la nieve se derrite antes.

Aumento del nivel del mar: El nivel de los mares del mundo aumentó alrededor de 20 centímetros en el último siglo. Sin embargo, la tasa en las últimas dos décadas es casi el doble de la del último siglo y cada año se está acelerando ligeramente. La única forma en que esto puede suceder es que entra más energía en el sistema que la que sale, y la principal razón es porque estamos inyectando CO₂ y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que reduce el flujo de energía saliente de onda larga (infrarroja).

Reducción del hielo marino ártico: Tanto la extensión como el espesor del hielo marino del Ártico se han reducido rápidamente durante las últimas décadas.

Eventos extremos: Se ha observado en épocas recientes que el número de récords de altas temperaturas ha aumentado, mientras que los récords de bajas temperaturas registrados han disminuido. También la ocurrencia de una creciente cantidad de eventos de lluvia intensa. Esto ha sido documentado, p.e. en EEUU, desde el año 1950.

Acidificación de los océanos: Desde los inicios de la Revolución Industrial, la acidez de las aguas superficiales de los océanos ha aumentado alrededor del 30 por ciento. Este aumento es el resultado de que los seres humanos emiten más dióxido de carbono a la atmósfera y, por lo tanto, los océanos absorben más de este gas. La cantidad de dióxido de carbono que absorbe la capa superior de los océanos está aumentando en alrededor de 2.000 millones de toneladas por año. El océano ha absorbido entre el 20% y el 30% del total de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono en las últimas décadas (entre 7.200 y 10.800 millones de toneladas métricas por año).

El calentamiento global es, por lo que hemos visto, una realidad observada, medida y comprobada. Evitemos caer en los cantos de sirena new-age o pos-modernos que nos instan a “no creer” en el calentamiento global o el cambio climático por considerarlo un producto de los medios para atraer un público ávido de sensaciones o bien una estrategia de ciertos científicos para obtener mayores fondos o subsidios para sus proyectos.

¿Debemos preocuparnos por un aumento de la temperatura global de 1,5 a 2,0 grados centígrados en un siglo? Si del invierno al verano pasamos de unos 10-15 grados a 30-35, es decir un aumento de unos 20 grados ¿porqué preocuparse de uno o dos grados?

Son dos situaciones totalmente diferentes. La primera resulta de una variación estacional recurrente en una zona o punto determinado de suma cero. La energía que se gana en una estación del año se pierde en la otra. En la segunda es el calentamiento de gran parte de la masa de la atmósfera. En los cinco primeros kilómetros de la atmósfera se encuentra el 50% de la masa atmosférica. Con un volumen de unos $1.28 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$ da una masa de alrededor de $1.62 \cdot 10^{16}$ toneladas (16200 billones de toneladas). Calentar en uno o dos grados esta exorbitante masa requiere ingresar al sistema enormes cantidades de energía, que provocan fuertes alteraciones al comportamiento de la atmósfera y por consiguiente al tiempo meteorológico y al clima, llevando al llamado “*cambio climático*” e inclusive a afectar fuertemente al medio ambiente global.

En climatología el “*cambio climático*” se define como un cambio en el estado de la atmósfera que puede ser identificado (p.e. usando pruebas estadísticas) por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un periodo extenso, típicamente décadas o más.

Para el IPCC de la ONU (Intergovernmental Panel for Climate Change – Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático) se refiere a cualquier cambio del clima en el tiempo cronológico, sea debido a la *variabilidad natural* o como resultado de la *actividad humana*. El IPCC es una organización original, con científicos de alto nivel y representantes de los países participantes, auspiciada por las Naciones Unidas por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Fundada en 1988, su primer informe se publicó en 1990 y el último, Quinto Informe de Evaluación del IPCC - IPCC Fifth Assessment Report AR5, en 2013-2014. El próximo AR6 se publicará en el 2022.

Para el UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change (Convención Marco de las NNUU para el Cambio Climático) el cambio climático se refiere a un cambio en el clima que se atribuye directa o indirectamente a la *actividad humana* que altere la composición de la atmósfera global y que se agrega a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempo comparables.

Dentro de los eventos extremos se destacan los relacionados con la disponibilidad de agua: las sequías y las inundaciones. Revisemos rápidamente episodios extremos recientes de sequías con fuerte repercusión (los casos en Argentina los trataremos en la próxima Parte).

Las recientes sequías estadounidenses han sido las más extensas en décadas. En 2011, Tejas experimentó los 12 meses más secos de su historia. En el pico de la sequía de 2012, un asombroso 81 por ciento de los Estados Unidos se encontraba bajo condiciones al menos anormalmente secas. El estado de California experimentó una sequía particularmente prolongada que se extendió desde diciembre de 2011 hasta marzo de 2019, interrumpida en parte por el invierno más húmedo experimentado en los Estados Unidos (Ref. 2).

En Francia, los últimos tres años desde el 2018 (2018, 2019 y 2020), cada uno rompiendo récords de sequía, han impactado en la sociedad francesa. Incluso se han visto afectadas regiones en las que hasta entonces eran bastante inusuales, como la región Grand Est. Más frecuentes y más intensas, estas sequías tienen importantes repercusiones tanto en la vegetación como en los suelos (Ref. 3).

El *pantanal* brasileño registró un estiaje severo entre 2019 y 2020. Estudios locales sugieren que fue el resultado de un fenómeno meteorológico natural, similar al que desencadenó la crisis hídrica en el estado de São Paulo entre 2014 y 2016, ligado a un “bloqueo” meteorológico, que provoca una merma del transporte del aire cálido y húmedo del verano de la Amazonia hacia la región. La situación deriva también en un aumento del riesgo de incendios, que se extiende no solamente sobre áreas agrícolas sino también sobre áreas naturales del bioma. Los autores consideran que esas sequías por causas naturales están sufriendo los efectos de la inestabilidad climática y los impactos son entonces peores, pues antiguamente no había mucha ocupación humana como la hay actualmente en la región y, por consiguiente, la población es hoy en día más vulnerable a los impactos provocados por las sequías (Ref. 4).

En el centro de Chile desde 2010 ha prevalecido una secuencia ininterrumpida de años secos, con déficits anuales de precipitaciones que oscilan entre 25 y 45% . Aunque las sequías intensas de uno o dos años son recurrentes en esta región mediterránea, el actual evento se destaca por su longevidad y gran extensión. El carácter extraordinario de esta llamada “mega sequía de Chile central” se estableció evaluando un siglo registros de precipitación regional y una reconstrucción analizando los anillos de árboles (Ref. 5). Los autores remarcan que la mega sequía ocurrió principalmente en condiciones El Niño neutrales (excepto para un año de La Niña en 2010 y el fuerte El Niño en 2015), en contraste con las condiciones frías del Pacífico tropical que a menudo acompañó a los años secos durante el siglo XX. Esto sugiere factores distintos a la temperatura de la superficie del mar tropical en el sostenimiento de la mega sequía (por ejemplo, cambio climático antropogénico).

La dendrocronología es la ciencia que se ocupa de la datación de los anillos de crecimiento de las **plantas arbóreas** y arbustivas leñosas analizando patrones espaciales y temporales de procesos biológicos, físicos o culturales. Ha tenido una gran expansión en los últimos años en la estimación del clima del pasado (paleoclima). En años recientes se han publicado varias notas referidas a estudios de series de sequías aplicando esta metodología. Múltiples conjuntos de datos de observación y reconstrucciones utilizando datos de anillos de árboles confirman que las actividades humanas probablemente estaban afectando el riesgo mundial de sequías ya a principios del siglo XX (Ref. 6).

Describiremos los resultados de una nota muy actual que estimamos relevante. Investigadores europeos analizaron 27.080 mediciones anuales y fechadas de isótopos de oxígeno y carbono estables en anillos de árboles de 21 robles vivos y 126 relictos (supervivientes) para reconstruir el hidroclima estival de Europa Central desde el 75 a. C. hasta el 2018 d. C. (Ref. 7). La reconstrucción demuestra que la secuencia de las recientes sequías estivales europeas desde 2015 no tiene precedentes en los últimos 2.110 años. Los autores sugieren que esta anomalía hidroclimática probablemente sea causada por el calentamiento antropogénico y los cambios asociados en la posición de la corriente en chorro de verano.

¿Cual sería el efecto esperado del CC actual sobre las sequías?

El cambio climático aumenta las probabilidades de que la sequía empeore en muchas partes del mundo en las próximas décadas. Hay varias formas en que el cambio climático puede contribuir a la sequía: estas fases secas pueden incrementarse aumentando la temperatura y la radiación. Las

temperaturas más cálidas pueden aumentar la evaporación del suelo, haciendo que los períodos con bajas precipitaciones sean más secos que en condiciones más frías. Las sequías pueden persistir a través de una "retroalimentación positiva", donde los suelos muy secos y la cubierta vegetal disminuida pueden suprimir aún más la lluvia en un área ya seca. Un clima cambiante también puede alterar los llamados "ríos atmosféricos" (corrientes estrechas de humedad transportadas en la atmósfera), lo que puede alterar especialmente ciertos patrones de precipitación. Una combinación de ríos atmosféricos cambiantes y temperaturas más cálidas también puede afectar en algunas regiones la capa de nieve y su derretimiento, diezmando potencialmente el suministro de agua. Además, cuando los suelos y las plantas se secan, su falta de contenido de agua impide su transferencia por evaporación que enfriaría la atmósfera, lo que induce localmente un calentamiento adicional del aire. Esto a su vez provoca un secado adicional de la atmósfera: este es el llamado *efecto bola de nieve*.

Las estimaciones de los cambios futuros en la precipitación estacional o anual en un lugar en particular son menos seguras que las estimaciones del calentamiento futuro. Sin embargo, a escala mundial, los científicos confían en que los lugares relativamente húmedos, como los trópicos, y las latitudes más altas se volverán más húmedos, mientras que los lugares relativamente secos en los subtropicos (donde se encuentran la mayoría de los desiertos del mundo) se volverán más secos (Ref. 2).

A nivel general el Informe Especial emitido por el IPCC en el 2018 (Ref. 8) incluye varias referencias a los cambios esperados en los extremos térmicos e hídricos.

Parágrafo B.1: Los modelos climáticos prevén diferencias robustas en las características regionales del clima entre el momento actual y un calentamiento global de 1,5 °C, y entre un calentamiento global de 1,5 °C y de 2 °C. Esas diferencias comprenden un aumento de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas (nivel de confianza alto), de los episodios de calor extremo en la mayoría de las regiones habitadas (nivel de confianza alto), de las precipitaciones intensas en varias regiones (nivel de confianza medio) y de la probabilidad de sequía y de déficits de precipitación en algunas regiones (nivel de confianza medio).

El Informe define cinco motivos de preocupación (MdP), establecidos en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC, que brindan un marco para resumir los principales impactos y riesgos respecto de los distintos sectores y regiones. El segundo (MdP 2) se refiere a **Episodios meteorológicos extremos: riesgos o impactos para la salud humana, los medios de subsistencia, los bienes y los ecosistemas derivados de fenómenos meteorológicos extremos como las olas de calor, las precipitaciones intensas, la sequía y los incendios forestales concurrentes y las inundaciones costeras**. Los impactos o riesgos relacionados con este motivo de preocupación, basados en la evaluación de nueva literatura que ha aparecido, se estiman como *moderados a altos* (impactos/riesgos graves y generalizados) si el aumento de la temperatura media global en superficie alcanza o supera 1.5 grados centígrados.

Como expresa el Informe, gran parte de estas estimaciones futuras se obtienen de simulaciones basadas en modelos físico-matemáticos del sistema climático. Estos modelos han mejorado mucho en los últimos años, en parte por enormes avances en la capacidad de computación y también en los conocimientos científicos del comportamiento del sistema terrestre.

El informe del Grupo de Trabajo I (Las bases científicas) del IPCC del año 2013, en su capítulo 9, evalúa los modelos climáticos. Ha habido un progreso sustancial desde el informe anterior en la evaluación de simulaciones de modelos de eventos extremos, aunque reconocen la

dificultad de simular las nubes y sus efectos y admiten que la mayoría de los modelos subestiman la sensibilidad de precipitaciones extremas a la variabilidad o tendencias de la temperatura, especialmente en los trópicos, lo que implica que los modelos pueden subestimar las proyecciones de aumento de las precipitaciones extremas en el futuro.

Existe una alta confianza en que la representación de las situaciones de bloqueo se mejore mediante aumentos en la resolución de los modelos. En cuanto a sequías cabe señalar que existen varias definiciones de sequía y el desempeño de los modelos puede depender de la definición. Actualmente no se dispone de una evaluación integral del grupo de modelos de simulación climática para el caso de sequías, aunque se encuentra que los días secos consecutivos simulados por estos modelos son comparables a las observaciones en magnitud y distribución.

Referencias

1. NASA. *Cambio climático: ¿Cómo sabemos lo que sabemos?* <https://climate.nasa.gov/evidencia/>
2. *Drought and Climate Change*
<https://www.c2es.org/content/drought-and-climate-change/>
3. *Sécheresse et réchauffement climatique en France*
<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/secheresse-et-rechauffement-climatique-en-france>
4. *Científicos identifican las causas de la extrema sequía que afectó al Pantanal de Brasil*
<https://www.dicyt.com/noticias/cientificos-identifican-las-causas-de-la-extrema-sequia-que-afecto-al-pantanal-de-brasil>
5. René D. Garreaud y otros, *The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327, 2017
6. Marvel, K., Cook, B.I., Bonfils, C. et al. *Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence*. *Nature* 569, 59–65 (2019)
7. Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J. et al. *Recent European drought extremes beyond Common Era background variability*. *Nat. Geosci.* 14, 190–196 (2021).
8. *IPCC, 2018: Resumen para responsables de políticas*. En: *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* (Masson-Delmotte V. y otros (Eds.))
Disponible en castellano en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

Parte 4

SEQUIÁS: IMPACTOS EN LA ARGENTINA

En los cursos de geografía de la escuela secundaria aprendemos que en el territorio argentino las áreas subhúmedas, semiáridas y áridas abarcan un 75% del total, mientras que la Argentina húmeda, el restante 25%, principalmente la “Mesopotamia argentina” y la Pampa húmeda, posee lluvias adecuadas, suficientes para permitir cultivos sin necesidad de riego.

En la Región Pampeana se encuentra el mayor porcentaje de la población, la capacidad económica y el poder y si bien la alternancia de extremos hídricos – inundaciones o sequías – le afectan fuertemente también estos extremos impactan en la Argentina árida. Las inundaciones y las sequías son los extremos hidro-meteorológicos de mayor impacto en la Argentina.

Las inundaciones pueden causar daños a tierras agrícolas, afectando los cultivos y el suministro de alimentos, con serios efectos económicos. También pueden desplazar animales tales como roedores y serpientes, acarreando condiciones potencialmente peligrosas tanto para los seres humanos como para los animales útiles. Además aumentan los riesgos sanitarios ya que las fuentes de agua pueden contaminarse con materiales tóxicos. Un informe reciente del Banco Mundial sobre “Impactos de las crisis climáticas en la pobreza y la macroeconomía en la Argentina” (Ref. 1) revela que por inundaciones hay pérdidas anuales promedio de activos de entre US\$ 500 millones y US\$ 1400 millones, o sea en promedio de US\$ 1.000 millones anuales y estas pérdidas podrían aumentar el 125% debido al cambio climático .

Las sequías extremas también pueden tener importantes consecuencias para el ambiente, la agricultura, la economía, la salud y la sociedad. Aunque sus efectos puedan variar dependiendo de la vulnerabilidad de la región o población afectada, las consecuencias más comunes son la disminución de la producción agrícola y la capacidad de carga del ganado, malnutrición, deshidratación, hambrunas, migraciones masivas, daños al hábitat, erosión y eventuales tormentas de polvo, conflictos sociales y alimentarios. En un mundo más cálido, la evaporación aumenta, lo que puede hacer que incluso las regiones húmedas sean más susceptibles a la sequía. Varios organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Banco Interamericano de Desarrollo (IDB), el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (WFP) y la UNESCO desarrollan actividades y proyectos para ayudar a sus miembros a responder adecuadamente a las crisis causadas por las sequías.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se encuentra ahora en su sexto ciclo de evaluación, en el que está produciendo el Sexto Informe de Evaluación (AR6) con contribuciones de sus tres Grupos de Trabajo y un Informe de Síntesis, tres Informes Especiales y un refinamiento de su último Informe Metodológico. El Informe de síntesis será el último de los productos AR6, que actualmente se lanzará en 2022.

La contribución del Grupo de Trabajo I - Bases físicas- al Sexto Informe de Evaluación fue presentada el 9 de agosto último. Este informe aborda la comprensión física más actualizada del sistema climático y el cambio climático, reuniendo los últimos avances en la ciencia climática y combinando múltiples líneas de evidencia del paleoclima, observaciones, comprensión de procesos y simulaciones climáticas globales y regionales. Respecto de la situación presente confirma que “El

*cambio climático inducido por el hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. Hay evidencia que los cambios observados en extremos como olas de calor, fuertes precipitaciones, **sequías** y ciclones tropicales y, en particular, su atribución a la influencia humana, se ha fortalecido desde el Quinto Informe de Evaluación (AR5)”.*

También expresa que *“El cambio climático inducido por el hombre ha contribuido al aumento de **sequías agrícolas y ecológicas** en algunas regiones debido al aumento de la evapotranspiración de la tierra (con nivel de confianza media)”,* que la influencia humana probablemente ha provocado aumentos en la frecuencia de olas de calor y sequías concurrentes a escala global (con un alto nivel de confianza) y que *“Con cada incremento adicional del calentamiento global, los cambios en los extremos continúan haciéndose mayores. Por ejemplo, cada 0,5°C adicional de calentamiento global provoca aumentos claramente perceptibles en la intensidad y frecuencia de extremos cálidos, incluidas olas de calor (muy probable) y fuertes precipitaciones (nivel de confianza alto), así como **sequías agrícolas y ecológicas** en algunas regiones (nivel de confianza alto). Se observan en algunas regiones cambios perceptibles en la intensidad y frecuencia de las **sequías meteorológicas**, con más regiones que muestran aumentos que disminuciones, por cada 0.5°C adicional de calentamiento global (confianza media). Los incrementos en la frecuencia e intensidad de las **sequías hidrológicas** se hacen mayores con el aumento del calentamiento global en algunas regiones (confianza media)”.*

Este informe se caracteriza, respecto de los anteriores, por incluir discusiones a nivel regional. En las regiones de nuestros interés el gráfico con las síntesis de la evaluación del cambio observado en la sequía agrícola y ecológica indica un “Bajo acuerdo en el tipo de cambio” y/o “Datos y/o literatura limitados”. Respecto a este último punto se refiere a la cantidad limitada de publicaciones disponibles en las redes científicas.

En la Argentina el sector agropecuario, motor de su crecimiento económico (en la década 2010-2019 representó el 8,7% del PIB y un 60% promedio de las exportaciones del país), es particularmente vulnerable a las sequías.

Resumiremos algunos de sus impactos según la Referencia 1 : La grave sequía que sufrió la Argentina a principios de 2018 generó una caída del PIB del 2,5%, junto con la conmoción financiera y la depreciación del peso que se produjo a partir de abril de ese año. La recesión económica comenzó en el segundo trimestre, cuando la producción agrícola cayó un 32% anual debido a la grave sequía y, del lado de la demanda, las exportaciones se contrajeron más del 8% (también anual). La sequía de la campaña 2008/2009, en el marco de la crisis financiera internacional, también afectó los precios de las exportaciones. En esa ocasión, la pérdida de producción representó más del 40% de la caída de 2009, que representó casi el 80% de la recesión.

En una evaluación del impacto económico de los eventos climáticos extremos en Argentina efectuada por la Facultad de Ciencias Económicas de la UBA en 2017 se indica que *“En las campañas 2008/09 y 2009/10, las pérdidas estimadas de ingreso directo por sequía en el cultivo de soja ascienden a u\$s 4.115,88 millones y u\$s 2.606,37 millones, respectivamente”* y, en cuanto a la comparación con las inundaciones, expresa *“Valuando las pérdidas directas en el cultivo de soja, se observa que los eventos de sequía generan pérdidas más cuantiosas que las inundaciones. Asimismo, su extensión geográfica resulta muchísimo mayor, y la magnitud de la pérdida la convierte casi en un evento con impactos macroeconómicos. No obstante, los impactos indirectos y sobre la vulnerabilidad social de las inundaciones pueden resultar muy superiores”.*

Además del impacto que las sequías tienen en los ingresos nacionales, son muy costosas a nivel provincial. El año pasado (2020) presentó un cuadro de sequías muy preocupante a nivel de varias provincias.

En esta sección presentaremos una breve revisión de publicaciones y notas sobre el fenómeno sequía en la Argentina aparecidas en tiempos pretéritos.

Revisión histórica

Una referencia histórica obligada es la publicación de Florentino Ameghino, *“Las secas e inundaciones en la Provincia de Buenos Aires”*, 1884 (Ref. 2). Su subtítulo resume todo un programa de acción : *“Obras de retención y no de desagüe”*.

Al estudiar las inundaciones y los medios de evitarlas Ameghino remarca que *“... esta cuestión estaba íntimamente ligada con la de las secas, que de tiempo en tiempo hacen sentir sus desastrosos efectos sobre distintas regiones de la Provincia. Aun más, adquirí la convicción de que todo esfuerzo y todo trabajo que tendiera a evitar uno de esos males sin tomar en cuenta el otro ocasionaría probablemente más perjuicio que beneficio.”*.

Los títulos de los diferentes capítulos construyen en su conjunto un breve texto de referencia: *“Las secas e inundaciones constituyen un mismo problema”*, *“No hay agua de sobra ¿porqué desaguar?”*, *“Escasez de agua como consecuencia inmediata del desagüe ilimitado”*, *“Denudación y esterilización del suelo por efecto del desagüe”*, *“Primera idea del aprovechamiento del sobrante de las aguas para fertilizar el suelo en las épocas de seca”*, ..., *“El papel que desempeñan las grandes arboledas”*, *“Los bañados temporarios y los daños que producen”*, *“Las obras más urgentes para evitar las inundaciones”*, *“Obras de retención en el curso los ríos y creación de reservorios y estanques artificiales”*, *“Desaparición de las lagunas, causas que la producen y medios de contrarrestarla”*, *“Modificaciones modernas en el cauce de los ríos y su fijación por medio de plantaciones”*, *“Denudación del suelo acelerada por la agricultura y modo de combatirla”*, *“La creación de bosques artificiales es indispensable”*, *“Fijación y aprovechamiento de las dunas litorales y médanos del interior”*, *“Canales navegables”*.

También cita escritos anteriores de Estanislao S. Zeballos, uno de los más destacados intelectuales y políticos de la generación del 80 que ocupó tres veces el cargo de Ministro de Relaciones Exteriores. Respecto a la región bonaerense Zeballos, en 1876, expresa *“A pesar de sus arroyos, lagunas y ríos, esta Provincia sufre sequías espantosas”*, *“La solución del problema de la seca se relaciona con esta otra cuestión muy importante: la transformación conveniente de ciertos accidentes del terreno que permitan utilizar las aguas que hoy en día se pierden estérilmente ...”*, *“.. aprovechar las aguas que afluyen a las depresiones de la Pampa y que se pierden en su seno; sin perjuicio de las medidas generales, que reputo indispensables para combatir la seca y sus efectos”*.

Como surge de los títulos de capítulos mencionados anteriormente Ameghino sigue estas ideas, rechazando el desagüe simple e ilimitado de los terrenos *“que hará más intensos, más prolongados y más desastrosos los periodos de grandes secas”*. También, como Zeballos, promueve la creación de grandes arboledas ya que *“dejan caer el agua de las lluvias de un modo más suave;*

por medio de las raíces hacen más poroso el terreno, de modo que las aguas se infiltran en él con mayor facilidad; anulan la denudación que ejercían las aguas que corrían antes por la superficie sin ser absorbidas por el suelo; favorecen la formación del humus, cuyas propiedades higrométricas son bien conocidas; contrarrestan en parte los efectos desastrosos de las inundaciones, impidiendo que se efectúen con demasiada rapidez; atenúan la evaporación que producen los rayos solares y los vientos demasiado secos, conservando en el suelo un mayor grado de humedad; impiden el derrumbamiento de las barrancas de los ríos y riachuelos, regularizando su curso; templan las temperaturas excesivamente cálidas; purifican la atmósfera, deteniendo los miasmas palúdicos que transportan los vientos; atraen los vapores acuosos de los aires cargados de humedad, obligándolos en parte a condensarse en lluvia, etc.”.

Por supuesto que estas opiniones de mediados del Siglo XIX deben ajustarse a las realidades actuales, pero nos asombra la visión global del problema que aplican estos precursores, digamos en un sentido ambientalista. Revisando los Planes Maestros actuales de algunas provincias para distintas cuencas podemos ver que se aplica un enfoque más bien ingenieril y en algunos casos, cuando presentan bibliografía, se ignora la contribución pionera de Ameghino.

Notemos que en el vecino Uruguay es muy común realizar obras de ingeniería de pequeña o mediana escala que interceptan y acumulan el agua de escurrimiento, llamados “*tajamares*”, como método de almacenaje de agua, de abrevadero animal, y también para evitar o moderar efectos de la sequía. Es una respuesta a la extrema variabilidad e irregularidad del régimen de precipitaciones de esa región que produce una cierta alternancia de inundaciones y sequías, a veces extremas (tal es así que se ha dicho que el Uruguay es “*un país seco donde llueve mucho*”). Los tajamares también se construyen en Argentina y Paraguay.

El interés por las secas en nuestras regiones se remonta a épocas muy anteriores a la de la generación de 80. Basados en la información brindada por la Referencia 3 resumiremos los casos más destacados de sequías en la Provincia de Buenos Aires (en dicho trabajo también se tratan las inundaciones).

En la carta del 29 de marzo de 1576 el Tesorero del Rio de la Plata, don Hernando de Montalvo, escribe al Rey sobre la expedición de Juan Ortiz de Zarate expresando: “... *el año fue fértil de aguas cuando llegaron (1574) y después acá en dos años y medio que estamos no hemos visto llover sino muy poco, en esta tierra tan estéril que se siembra y no grana...*”.

En las épocas coloniales los habitantes atribuían a la sequía, además de sus efectos sobre praderas, aguadas, cultivos y ganados, un agravamiento de epidemias y enfermedades en hombres y animales, por lo que cada alarma de un periodo seco era acompañada por Acuerdos del Cabildo decretando cierres de comercio para novenarios, octavarios y procesiones en las que se le imploraba al santo patrono San Martín de Tours una mejoría de la inclemencia. Basada en esta información el periodo 1600-1810 puede ser considerado como seco en general, destacándose por lo menos dos sub-periodos de sequías muy graves y prolongadas (1690 -1708 y 1753 - 1758) y muchas sequías breves.

Durante el periodo 1827 - 1832 reinó una intensa sequía, conocida como la “Gran Seca” o “Gran Seco”, lloviendo tan poco que la vegetación fue desapareciendo por completo y los campos se convirtieron en grandes polvaredas. Las aves, los mamíferos salvajes, las vacas y los caballos perecían de hambre y de sed.

El *Diario de Dolores* en su edición del 16 de enero de 1883 cita : “*Mal año. A las quemazones (por la seca) de campos tenemos que agregar otro mal no menos grave: la langosta que ha invadido ya una extensión, dejando los campos totalmente arrasados. Si la seca se prolonga el mal acrecentará notablemente*”.

Investigadores de la Unidad de Historia Ambiental, Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales (INCIHUSA) del Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CRICyT), Mendoza, han publicado varios artículos muy completos y elaborados sobre los efectos del clima en la sociedad colonial, analizando una variedad de documentos históricos y prestando atención a extremos hídricos como inundaciones y sequías. En distintos periodos que van del Siglo XVI al XVIII estudian las secuencias secas y húmedas, y sus extremos, en varias regiones argentinas como el noroeste (NOA) y la Cuenca del Plata, así como en ciudades como Córdoba y Mendoza. Aquellos interesados en estos periodos recomendamos consultar la Referencia 4 que, aunque trata específicamente el caso de Córdoba, contiene información sobre otras áreas e incluye una bibliografía muy completa.

Otra investigación similar sobre el efecto del clima en la época colonial en Argentina y Chile se encuentra en la Referencia 5. Aunque algo sesgada hacia eventos fríos y lluviosos también incluye información sobre periodos secos extremos.

Un interesante estudio histórico sobre los cambios climáticos en la pampa húmeda, basado en una nota de la revista “*Todo es Historia*”, se presenta en la Referencia 6. Los autores, refiriéndose a la secuencia de inundaciones y sequías, afirman “*que el clima fue el determinante de hechos trascendentales, el que realmente decidió políticas, batallas, fundaciones... constituyéndose en ingrediente fundamentalísimo de la idiosincrasia pampeana*”. Discuten brevemente los procesos de formación del clima, el paleoclima, las “edades” del planeta, en particular la “pequeña edad del hielo” y su fin a mediados del Siglo XIX y sus efectos en la zona pampeana, y el “regreso” de la humedad hacia mediados de los años 70 del siglo pasado, humedecimiento que “*debía corresponderse con una tendencia al aumento de las temperaturas medias mundiales*”. Comentando las opiniones del entonces secretario del PROSA (Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua) e integrante de la Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FECIC), Tomás Anchorena, los autores reivindican las ideas de Ameghino escribiendo

“ Si se continúa con una política simplista de eliminar el agua con la apertura indiscriminada de zanjales y canales, es que no se piensa que se repetirán las épocas de sequía. Sobre el tema, subraya Anchorena en la mejor síntesis que quien realiza esta crónica haya leído en su vida, existen dos teorías.

Una, la que partiendo del pensamiento de Florentino Ameghino considera el problema integral de alternativas, de excesos hídricos sucedidos de grandes sequías. Plantea la necesidad de manejar los excesos de agua dentro de las cuencas regionales para poder así mantener los excedentes aprovechables en épocas de sequía.

Otra, la que busca una solución coyuntural, eliminando lo mas prontamente posible los excesos de agua, mediante canales que los expulsen al océano. Esta es la que ha sido adoptado hasta el momento.

"Todos los antecedentes existentes permiten aceptar, razonablemente, que actuar exclusivamente sobre una emergencia conduce al caos que hoy presenta la provincia de Buenos Aires" “

A partir de la creación en 1872 de la Oficina Meteorológica Argentina, hoy Servicio Meteorológico Nacional, durante la presidencia de Domingo F. Sarmiento (uno de los primeros servicios meteorológicos del mundo) comienza una época de información meteorológica sistematizada, a partir de estaciones con instrumental específico y medición de variables y elementos meteorológicos en forma metódica. Para la ciudad de Buenos Aires, por ejemplo, hay registros sistemáticos desde 1876. En la sección siguiente discutiremos los trabajos sobre sequías producidos durante este periodo instrumental, complementado a partir de los años 70 con mediciones remotas instaladas en satélites.

Cerramos esta sección recordando al Ing. Juan Jagsich, de origen croata, recibido en la Escuela Politécnica Federal en Zurich, un centro de excelencia que produjo varios premios Nobel. Esta sólida formación explica su producción científica sumamente numerosa, abarcando en especial la Topografía, Cartografía, Geodesia, Astronomía, Meteorología, Climatología y Oceanografía. En el año 1912 llega a la provincia de Córdoba en donde es nombrado Profesor Titular de Topografía al igual que de Cartografía y Dibujo Cartográfico, luego en 1923 Profesor Titular de Geodesia, y en 1944 se encarga de la Cátedra de Geodesia Superior y Astronomía Práctica. En Abril de 1954 aparece su obra: "*Meteorología Física*".

Ya en 1925, en ocasión del Tercer Congreso Universitario Anual, reunido en Córdoba en el mes de Octubre, Jagsich sugiere la conveniencia de propiciar la *'iniciación de estudios oceanográficos continuos, como asimismo la intensificación de las observaciones meteorológicas y geofísicas en general, con particular atención de las regiones antárticas, para facilitar de este modo los estudios tendientes a resolver el problema de la predicción del tiempo a largo plazo, de excepcional interés para la agricultura de nuestro país'*. En sus estudios sobre este último tema aplica ideas de científicos destacados como Humpreys, von Bezold, Defant, Angot, Angström, Koeppen, Geiger, Exner, Milankovitch y otros. En sus notas sobre la climatología sudamericana introduce conceptos de movimientos turbulentos, fenómenos oceanográficos como el Niño, y la influencia de grandes perturbaciones de la circulación atmosférica general, como anticiclones. Es notable que estos conceptos relativamente avanzados o novedosos para la época se publicaran en varias notas en el diario porteño "La Prensa" desde mediados de los años 20 hasta fines de los 30.

En cuanto a sequías destacamos las notas publicadas en "La Prensa" en 1929 (Ref. 7) y 1936 (Ref. 8) donde Jagsich muestra la importancia de la interacción atmósfera-océano en la generación de fluctuaciones atmosféricas que darían lugar a periodos de lluvias o sequías sobre los continentes. Nos sorprende que estos temas, que se consolidarían en el ámbito académico dos o tres décadas más tarde, hayan sido incluidos en años tan tempranos en un periódico de gran circulación.

En estos últimos años hubo, y hay al presente, una intensa actividad de investigación sobre estos extremos hídricos en las regiones argentinas por parte de meteorólogos, climatólogos, hidrólogos, geógrafos y agrónomos, entre otros. Su estudio, análisis e interpretación es de máxima importancia ya que, si somos conscientes de las amenazas reales o potenciales de estos fenómenos, estaremos entonces en una mejor posición para prevenirlos o mitigarlos.

En la próxima sección intentaremos resumir e interpretar los resultados de los trabajos recientes más relevantes sobre sequías, basándonos en la bibliografía existente en inglés y castellano, entendiendo que, dado que el fenómeno sequía es - como hemos discutido antes -

complejo y de gran magnitud, en muchos casos deberemos simplificar las discusiones y hasta en algunas ocasiones analizar resultados antagónicos.

¿Qué sabemos sobre las sequías en regiones argentinas?

El fenómeno sequía ha atraído la atención en años recientes por la intensidad de sus últimas ocurrencias en regiones argentinas. Basta reproducir los títulos de algunas notas aparecidas en la red:

- en el 2018: *“La sequía en Argentina causa grandes pérdidas en la agricultura”* - Según el informe “Campaña 2017/18: Actualización del Impacto Económico de la Sequía”, elaborado por la Gerencia de Estudios Económicos de la Bolsa de Comercio de Rosario, y agrega que *“se han duplicado respecto del análisis previo”*; febrero: *“La sequía más importante de los últimos 70 años” en Argentina*”;

- en el 2020: agosto: *“La sequía ya alcanza a 11 provincias y genera pérdidas en la actividad agropecuaria”*, *“Se agudiza la sequía en gran parte de la Argentina”*; octubre: *“Afirman que por la sequía Tucumán perdió el 80% del trigo”*, *“San Luis sufre la peor sequía en 50 años y tiene sus diques por debajo de la cota mínima”*; noviembre: *“Argentina soporta una de las peores sequías en 20 años”* ;

- este año (2021): abril: *“Entrerrianos acusan pérdidas serias por la sequía y vuelven a reclamar por la emergencia agropecuaria”*; julio: *“Argentina recomienda ahorrar agua ante la sequía histórica del río Paraná”*; agosto: *“La cuenca del Paraná tiene 70 millones de hectáreas afectadas por la sequía: cuándo se podría revertir”*, *“Río Negro y Neuquén tomaron una fuerte medida para afrontar una extrema sequía”*; *“Sequía y falta de nieve en Patagonia y Cuyo: Varias regiones de la Argentina sufren las consecuencias de una prolongada e intensa sequía, que como ya se observó, produce diversos impactos en sectores de la actividad productiva y preocupa a expertos y autoridades. La situación se perfila compleja y en el horizonte las noticias no son alentadoras”*.

Si bien los titulares reflejan un tinte tremendista, bastante común en los medios a fin de atraer audiencia, no es menos cierto que las sequías están impactando muy fuertemente. ¿Cuál es el nivel de esa intensificación? ¿Como se distribuyen regionalmente? ¿Cómo evolucionaron? Para intentar responder a estos interrogantes revisaremos y resumiremos la literatura especializada de los últimos años. No es una revisión exhaustiva, sino que hemos elegido las contribuciones que nos han parecido más relevantes. Los lectores seguramente podrán identificar otros casos referidos a su región o período de interés consultando las referencias bibliográficas de los distintos artículos citados.

Ordenaremos los artículos, en lo posible, en un orden cronológico, comenzando por los más recientes, y geográfico, comenzando por los regionales, siguiendo con los provinciales y finalmente con los locales o puntuales.

El informe del Banco Mundial (Ref. 1, 2021) , en cuanto a los impactos macro económicos de las sequías, indica que *“han resultado ser muy costosos para la economía argentina e incluso*

podrían serlo mucho más en el futuro si las sequías inducidas por el cambio climático reducen los rendimientos agrícolas más severamente y con más frecuencia que en el pasado”.

Repasemos las principales conclusiones obtenidas (algunas evidentes):

- *A nivel nacional, las sequías tienen un impacto significativo en el PIB y en los ingresos fiscales.*
- *Las sequías parecen ser eventos especialmente disruptivos, con un efecto no lineal en el PBP (Producto Bruto Provincial).*
- *El impacto de las sequías también se refleja en las exportaciones, ya que el sector de las oleaginosas es uno de los que más exportan.*
- *Una de las consecuencias de la reducción de la producción agrícola es la contracción de los ingresos por impuestos, tanto provinciales como nacionales.*
- *La falta de precipitaciones parece ser un factor importante en el déficit de ingresos en el total, con resultados mixtos en cada provincia.*
- *Los resultados muestran que una reducción permanente en los impuestos a las exportaciones y un aumento acorde en el IVA generará una base imponible más estable sujeta a la condición de las perturbaciones por sequía, y mejorará considerablemente los resultados a largo plazo, logrando que los costos fiscales de las sequías se reduzcan de manera significativa.*

También señala que *“será necesario aplicar estrategias de adaptación en el sector agropecuario y lograr un gran aumento de los posibles rendimientos agrícolas para compensar los impactos del cambio climático”.* Al respecto opina que *“... a medida que el clima se vaya haciendo más cálido, es posible que haya nuevas áreas de la Argentina que estén mejor adaptadas a las nuevas semillas, lo que permitirá reorganizar las principales áreas de producción y compensar por pérdidas en los actuales departamentos productores”.*

En abril de este año la UNESCO organizó un seminario de formación de cuatro días en Montevideo sobre el tema *“Caracterización, monitoreo y naturaleza de las sequías”* cuyo objetivo general era incrementar y estandarizar los conocimientos sobre las causas y modalidades de las sequías, y dar a conocer las diferentes herramientas disponibles para el monitoreo, vulnerabilidad y estimación de su frecuencia e intensidad.

Hay disponibilidad en línea de las presentaciones del curso, preparadas por expertos del CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe), que son muy completas, claras y abarcativas (Ref. 9, 2021). Son cuatro unidades tratando los temas: *“Causas naturales y antrópicas de la sequía”*, *“Impactos de las sequías en América Latina y el Caribe”*, *“Monitoreo de las condiciones de sequía meteorológica e hidrológica”*, y *“Vulnerabilidad a la sequía”*. Es una referencia obligada para quien quiera tener un panorama actual y completo sobre el tema y se recomienda su consulta. Si bien se orienta hacia áreas geográficas regionales, también discute los mecanismos globales y regionales del clima y sus relaciones con la sequía, así como algunas características sub-regionales y nacionales. Aunque no trata específicamente de la Argentina, mucha de la información es de utilidad y pertinente. También analizan los factores socio-demográficos y su asociación con el impacto de la sequía. En este tema destacamos una frase: *“... los impactos secos tienen un efecto mucho mayor que los grandes impactos húmedos en los resultados del mercado laboral. En particular, las pérdidas de ingresos de los grandes choques secos son de dos a cuatro veces mayores que las de los choques húmedos. Esto sugiere claramente*

la necesidad de una mayor atención política a las consecuencias a menudo subestimadas de los shocks secos en las ciudades”

La Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC) originó el Proyecto RIOCCADAPT cuyo objetivo es identificar, revisar y evaluar las acciones de adaptación al cambio climático que se estén llevando a cabo en los países de la RIOCC. Un informe reciente de este proyecto sobre la adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos, en su capítulo sobre “Inundaciones y Sequías” (Ref. 10, 2020), incluye varias discusiones e información sobre sequías en la Argentina. Es muy completo, amplio y con una extensa y actualizada bibliografía. Debido a las limitaciones de espacio solo lo comentaremos brevemente.

Discute resultados de investigaciones recientes, basadas en el estudio de series de índices de sequía más usados. Observan, entre otras características, que aparecen superficies progresivamente más secas principalmente en la Península Ibérica, Centroamérica y el Caribe, Amazonia y el sudoeste de Sudamérica; que algunas áreas de la región RIOCC, como México, Amazonia y Nordeste de Brasil, Patagonia y la Península Ibérica, experimentaron una mayor frecuencia de sequías (también en el norte de Argentina y Uruguay); y que la evolución anual del área cubierta por sequía para cinco regiones que incluyen todos los países RIOCC muestran una clara tendencia hacia un mayor porcentaje de áreas en sequía, en particular el sur de América del Sur.

En cuanto a las evoluciones futuras se prevé que la magnitud de las sequías aumentará con el calentamiento, con un incremento del 30 %, 38 % y 51 % de la superficie terrestre global (excluyendo desiertos, regiones hiperáridas y frías) bajo escenarios de calentamiento de 1,5 °C, 2 °C y 3 °C, respectivamente. En particular, en el extremo sur de Sudamérica (al sur de 30°S) el déficit de agua podría quintuplicar al del periodo de referencia 1976-2005.

Comenta también un informe reciente de la organización Christian Aid, con sede en Londres, identificando los 10 eventos climáticos extremos (sequías, inundaciones, incendios, olas de calor, tifones, huracanes) más destructivos del año 2018. Entre ellos, figura la sequía en Argentina desarrollada entre fines de 2017 y abril de 2018. Durante ese periodo, las precipitaciones en algunas partes del país fueron menores al 50 % de lo normal convirtiéndose en la peor sequía del país en 50 años. Como consecuencia, las cosechas de soja y maíz fueron 31 % y 20 % inferiores a las del año anterior, respectivamente, lo cual se tradujo en pérdidas económicas de 6.000 millones de dólares.

Un estudio, citado en la Referencia anterior, que utiliza una nueva base de datos global de sequías meteorológicas durante el periodo 1951 a 2006 se presenta en la Referencia 11 (2019). Considera tres escalas espaciales: global (0,5 °), macro-regional y nacional. La base de datos de los eventos de sequía tiene entradas específicas para cada macro-región y país. Utiliza dos índices a diferentes escalas de acumulación (de 3 a 72 meses): el tradicional Índice de Precipitación Normalizado (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), basado en la precipitación y la evapo-transpiración potencial, que depende de la temperatura. La base de datos incluye aproximadamente 4800 eventos basados en SPEI-3 y 4500 basado en SPI-3. Cada

evento se describe por su fecha de inicio y finalización, duración, intensidad, gravedad, área pico, media y máxima en sequía, y una puntuación especial para clasificar 52 mega-sequías. Obtuvieron también tendencias en la frecuencia de las sequías y severidad, por separado para SPI y SPEI, en una escala de acumulación de 12 meses, que generalmente está relacionada a las sequías hidrológicas. El estudio analiza 23 macro-regiones, basadas en las definidas en el 5º Informe del IPCC. Incluye la de mayor interés para nosotros: la SSA (Sur de Sudamérica).

Los resultados muestran varios puntos críticos de sequía en las últimas décadas: Amazonia, Sur de Sudamérica, la región del Mediterráneo, la mayor parte de África, el noreste de China y, en menor medida, Asia central y el sur de Australia. En América del Norte, Europa central, central Asia y Australia, el reciente aumento progresivo de la temperatura superó el aumento de precipitaciones causando sequías más frecuentes y graves.

La correlación entre el calentamiento global y algunos índices de sequía en regiones tropicales y subtropicales se discute en la Referencia 12 (2019) . En particular destaca, entre otros puntos, tendencias positivas o crecientes de los índices de sequía en los subtropicos y que en partes de los subtropicos hay dos períodos distintos, uno con frecuentes sequías en la primera mitad del siglo pasado, y una segunda con lluvias excesivas en la segunda mitad del siglo XX. Además que en la último década ha habido también largos procesos de sequía que estarían contribuyendo a cambios en las tendencias generales. Concluye que el calentamiento global estaría contribuyendo al proceso de sequedad de las regiones subtropicales en el 25% de las regiones analizadas, mientras que el 58% muestra una oscilación que se extiende a lo largo del siglo XX, final del Siglo XIX y principios del XXI.

El libro *“El Cambio Climático en la Cuenca del Plata”*, (Ref. 13, 2006) es el resultado del Proyecto *“Trends in the hydrological cycle of the Plata basin: Raising awareness and new tools for water management”* (Tendencias en el ciclo hidrológico de la cuenca del Plata: Creando conciencia y nuevas herramientas para el manejo de los recursos hídricos) financiado por el Instituto Interamericano para el Cambio Global (IAI). Su objetivo era difundir en la comunidad hidrológica los importantes cambios ocurridos en el clima y la hidrología de la cuenca del Plata durante las últimas décadas. Es un texto muy completo y abarcativo que también incluye varias referencias a las sequías en la región. Citamos los extractos que consideramos más significativos sobre el tema:

“La composición de eventos El Niño muestra mayor precipitación y caudal que la composición de eventos Niña” y que “Notablemente, los eventos fríos (La Niña) no están asociados a sequía o a una importante reducción de los caudales. Ello se debe a que las anomalías negativas de la precipitación durante estos eventos, ocurren hacia el Sur de la cuenca y fuera de las áreas que alimentan los caudales de los principales ríos”.

“Para reducir la vulnerabilidad social al Cambio Climático en el recurso agua (crecidas y sequías) se requiere de la acción de un amplio espectro de actores, incluidos los gestores de las ciudades, las organizaciones comunitarias, los planificadores, el sector agrícola, sector salud y los gestores de desastres, al igual que la gente y las instituciones del sector hídrico”.

“Las prolongadas sequías afectan fuertemente al sector agropecuario tanto a los cultivos comerciales, como a los de subsistencia. Afectan también la ganadería, con mortandad de animales, reducción en la producción lechera por escasez y mala calidad del agua en estanques y tajamares y falta de forraje por la pérdida de pasturas”.

“Muchos de los países dependientes de la hidroelectricidad están ya experimentando escasez energética en períodos de sequía. Los países que han sufrido apagones y racionamiento de energía debidos a las sequías en recientes años, incluyen, Argentina,”

“... la producción de energía eléctrica en la cuenca del Plata es potencialmente altamente vulnerable al Cambio Climático siendo desde este punto de vista una de las regiones del mundo de mayor vulnerabilidad”.

“ Las sequías traen muchos perjuicios económicos y sociales, especialmente en países con gran dependencia de la agricultura. La afectación de las sequías en las usinas hidroeléctricas también puede ocasionar problemas económicos, en momentos en que la economía ya se ve afectada por la baja producción de alimentos y la reducción de las exportaciones. Las capacidades de generación plena se ven reducidas sustancialmente y en algunos casos se llega a una reducción extrema en los niveles de los embalses como en Itaipú en 1999 y en Salto Grande en 2004”.

“... los cambios observados durante el período instrumental, como la sequía de la década del 1930 en América del Norte, estuvieron probablemente relacionada con cambios en la circulación atmosférica debido a la variabilidad natural del clima de escala decadal, y por lo tanto no puede extenderse a escenarios de cambio permanente por las emisiones de GEI”.

La utilización del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) como herramienta para el monitoreo regional de las sequías en Sudamérica Austral (SSA - Southern South America) se discute en la referencia 14 (2015). Los datos para el estudio consistieron en series de tiempo de precipitación mensual en 56 estaciones que cubren el período 1961-2008, ubicadas en al sur de 20 ° S de América del Sur, que forman parte de la base de datos CLARIS LPB. Se utilizaron series del índice de sequía Standardized Precipitation Index (SPI o índice normalizado de precipitación IPN) . Para definir las condiciones de El Niño / La Niña, se utilizó el Oceanic Niño Index (ONI), desarrollado por el Climate Prediction Center (CPC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). El ONI se obtuvo del conjunto de datos de temperaturas globales mensuales de la superficie del mar Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v3b como promedio móvil de 3 meses aplicado a las anomalías de la temperatura del mar en el sector El Niño 3.4 (5°N – 5°S, 120°W – 170°W). Con el fin de obtener las características regionales de las series de tiempo de precipitación, utilizaron el método de análisis de componentes principales rotadas (RPCA) y filtros estándar para decidir cuántas componentes principales se conservaban para separar la señal del ruido.

Las conclusiones resumen claramente los resultados obtenidos:

“El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur tiene un impacto significativo en las precipitaciones en SSA, tanto en su modulación interanual como en el signo de anomalías en las precipitaciones asociado con las dos fases: El Niño y La Niña. Las correlaciones estacionales entre SST y las series de tiempo de precipitación regional muestran una marcada estacionalidad, tanto para las sequías

de corto plazo como para las prolongadas. Esta información es útil para pronósticos estacionales de precipitación y puede ser utilizada y aplicada para pronosticar sequías en condiciones de La Niña. Es necesario establecer un sistema de pronóstico que aborde la relación entre las series de tiempo ENSO y la precipitación a nivel regional a través del análisis en diversos rezagos, debido a los cambios experimentados por el ciclo estacional identificado en las correlaciones. Incluso cuando el fenómeno ENOS es responsable de grandes variaciones de la precipitación regional en SSA, el siguiente paso para un modelo de pronóstico exitoso debería ser considerar otros modos de variabilidad que producen cambios a gran escala en precipitaciones, como el caso de la Oscilación Antártica”.

El cálculo de amenaza de sequías es una aplicación útil que puede estimarse a través del índice de precipitación estandarizado (SPI o índice normalizado de precipitación IPN) en distintas escalas temporales. La distribución espacial de los valores de amenaza posee implicancias socio-económicas y puede permitir el desarrollo de mapas de riesgo asociado a las sequías meteorológicas en la región sur de Sudamérica. En la Referencia 15 (2015) se usa un índice de amenaza de sequías, un indicador recientemente propuesto, que se basa en las características espacio-temporales del índice de precipitación estandarizado. El mapa de amenaza de sequías se obtuvo en escalas de 3 y 12 meses, para el periodo 1961-2008 y permitió identificar regiones de amenaza baja, moderada y alta. Citamos las conclusiones:

“Se identificaron regiones con alta amenaza de sequía, principalmente en la región central de Argentina y en la Patagonia, dependiendo de la escala de tiempo considerada. Parte de la región central de Argentina registró incrementos en los acumulados de precipitación durante la segunda mitad del siglo XX, lo cual fue propicio para una expansión en la frontera agropecuaria. No obstante, considerando la reversión en las tendencias de la precipitación desde fines de la década de 1980 y principios de la década de 1990 ... y su condición de poseer una amenaza de sequías alta, se recomienda la realización de planes de contingencia y mitigación de los efectos de las sequías a fin de reducir sus impactos, principalmente a nivel agrícola “.

Un documento reciente de la Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA) de las Naciones Unidas pretende promover una discusión sobre la dimensión y las consecuencias humanitarias que la sequía, entre otros factores, genera en las poblaciones que habitan en el Norte argentino, limitando la capacidad de provisión de alimentos a la población (Ref. 16, 2020).

Respecto a la situación hidroclimática expresa:

“El Norte argentino - y sobre todo el Gran Chaco - arrastran un déficit hídrico de más de un año, causado por precipitaciones por debajo del promedio desde septiembre de 2019, agravado en la época seca entre abril y octubre de 2020, y teniendo como resultado una sequía extendida. Prestando atención al panorama más amplio, según la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2015), la precipitación media anual aumentó en la mayor parte del país, pero ahora presenta mayores variaciones inter-anales e inter-decenales, aumentando el número de fuertes inundaciones y sequías prolongadas”

En cuanto a sus impactos alerta:

“... los sectores con gran impacto por esta sequía son medios de vida y seguridad alimentaria. Fundamentalmente, las actividades productivas más afectadas son las agropecuarias, lo que sumado a la crisis por COVID-19, lleva a situaciones de vulnerabilidad a familias rurales de escasos recursos, comunidades rurales dispersas y poblaciones indígenas, principalmente aquellas situadas en las provincias de Formosa, Chaco, Santa Fe, Entre Ríos, Corrientes y Misiones en el noreste argentino, además de las provincias de Santiago del Estero, Jujuy y Salta”.

Este documento discute, en particular, las necesidades prioritarias; el impacto de la crisis (su escala y alcance, la población expuesta) y el entorno operativo (capacidad y respuesta internacional, nacional y local, las brechas en la respuesta y los desafíos logísticos).

La Escuela de Economía y Negocios, de la Universidad Nacional de San Martín UNSAM presentó, en marzo de 2018, un trabajo preliminar para estimar la pérdida económica respecto al cultivo de soja, generada por la sequía que estaba afectando a la principal zona productora agrícola del país (Ref. 17, 2018). Teniendo en cuenta que los efectos de la sequía afectan desde el momento de la cosecha hasta la comercialización, las actividades perjudicadas de acuerdo a la estructura de costos utilizada serían, en orden de importancia: Flete corto y largo, Cosecha, Secado, Comisión de acopio, Paritaria y Zarandeo. Estiman, respecto al efecto fiscal, que *“Casi dos tercios de la pérdida de recaudación se explican por el Impuesto a las Ganancias, seguido por el Impuesto al Valor Agregado. El resto lo componen, Impuestos a los Combustibles (7%) e Impuestos a los Débitos y Créditos Bancarios el (5%)”* y que *“Por el carácter de coparticipables de estos, no sólo se ven afectados los ingresos públicos nacionales sino que además los provinciales y municipales”*. También consideran al impacto sobre el PBI y los efectos sobre el empleo.

Destacamos dos puntos salientes de sus conclusiones:

“Analizando el impacto sobre el PBI de acuerdo a las estimaciones realizadas, por cada millón de toneladas de soja no cosechadas queda afectado el 0,06%. Con lo cual en este caso ante la perspectiva de una pérdida de doce millones de toneladas en la cosecha de soja, esto significaría una disminución del crecimiento esperado de la economía del 0,7%. Las proyecciones de crecimiento para este año son del 3%.

Desde el lado del empleo por cada millón de toneladas no cosechada se ven afectados 3.300 puestos de trabajo, especialmente del sector transporte y servicios agropecuarios”.

El patrón de precipitación durante el evento La Niña 2017/18 en San Luis se estudia en la Referencia 18 (2018). En el semestre octubre 2017 a marzo 2018 las precipitaciones en gran parte del centro del país fueron escasas, a lo que se les sumaron las altas temperaturas durante el verano induciendo a un incremento de la sequía, que resultó extrema en algunas zonas. Esta sequía estuvo influenciada por el establecimiento un evento “La Niña” (fase fría del fenómeno ENSO) que comenzó tardíamente alcanzando su pico máximo en el verano austral y que, además, resultó débil en intensidad y de corta duración. En términos generales “La Niña” se relaciona en nuestro país con menores precipitaciones y temperaturas superiores a lo normal en la región central y noreste. Además, otros dos forzantes de gran escala contribuyeron a inhibir las lluvias en el área central del

país : la Oscilación Antártica (AAO) y la Oscilación de Madden-Julian (MJO) (Ver Apéndice 2). La AAO se mantuvo en su fase positiva la mayor parte del semestre, dando lugar a condiciones atmosféricas estables y la MJO , en enero y febrero, generó condiciones desfavorables para el desarrollo de precipitaciones en el Litoral y el área centro-este del territorio.

Para el estudio del régimen de precipitaciones en la provincia de San Luis durante el periodo utilizaron datos mensuales de precipitación desde 1961 de dos estaciones meteorológicas puntanas: San Luis Aero y Villa Reynolds Aero y, de octubre de 2017 a marzo de 2018, de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la red de estaciones meteorológicas de la provincia de San Luis (REM). Calcularon valores normales, desvíos porcentuales y anomalías respecto de promedios y analizaron los resultados mensuales del índice de sequía IPE (o índice normalizado de precipitación IPN) para tres meses (2017/2018) en las dos estaciones mencionadas. Se verifica la influencia de los fenómenos en gran escala citados en la ocurrencia de una sequía que impactó principalmente al centro-este del país y que estos indicadores también explican el régimen de precipitaciones deficitarias encontrado en San Luis. Destacan que *“En marzo la sequía alcanzó su mayor extensión horizontal, observándose una disminución pronunciada de las lluvias en el este provincial y se evidenciaron los desvíos más críticos del semestre estudiado, lo cual además se refleja en el valor del índice IPE- 3 más severo de ese período”* y que *“Esta sequía fue la segunda más severa de los últimos diez años en San Luis”*.

La Universidad Nacional de Lomas de Zamora publicó una nota técnica sobre la recurrencia de sequías e inundaciones en llanuras argentinas (Ref. 19, 2017). El autor expresa que el cambio climático es un fenómeno común en la historia del globo terráqueo, que es poco lo que se sabe sobre las sequías e inundaciones y su recurrencia, y que *“en las llanuras argentinas siempre hubo sequías e inundaciones, por lo menos se tienen registros de ello desde el momento mismo de la llegada de los primeros pobladores europeos”*. Considera además que *“la recurrencia de las sequías e inundaciones son fenómenos más ligados a la variabilidad climática que al cambio climático”*, una afirmación algo alejada de otras opiniones recientes.

Siguiendo a Ameghino señala a las sequías y las inundaciones en la región como recurrentes y como *“las dos puntas de una misma soga”*, un hecho que *“no significa que sean temporalmente simétricas. su ocurrencia y recurrencia se produce en distintos períodos, con distintas intensidades y con predicción un tanto incierta a mediano y largo plazo”*. También que *“La solución del problema de las sequías e inundaciones no debe ser considerada en forma aislada, sino tratar de que la solución al problema sea integral y que ese flagelo bifronte de la naturaleza se anule entre sí o que disminuya sus efectos destructivos”*.

Propone una serie de medidas para evitar o reducir a un mínimo los efectos negativos de estos extremos hidrometeorológicos, que permitan una sostenibilidad temporal y espacial de los sistemas favoreciendo el desarrollo humano. En cuanto a las sequías, en pequeños poblados, sugiere la construcción de aljibes para el acopio de agua de lluvia para consumo humano, durante los períodos húmedos, y en el medio rural cosechar agua de lluvia y almacenarla en lagos y lagunas para ser utilizadas como riego complementario de las escasas lluvias de los períodos y hasta la posibilidad de utilizar los acuíferos profundos de agua dulce. En la producción ganadera, *“se deben hacer reservas forrajeras: heno, silo de forrajes verdes o granos”* y para el caso de los cultivos agrícolas *“se deberían extremar las medidas de incorporación de materia orgánica a los suelos, para aumentar la capacidad de almacenar humedad”*. Por último que *“la rotación de cultivos y*

fundamentalmente la diversificación de la producción agropecuaria aseguran una mayor estabilidad al sistema productivo”.

La referencia 20 (2016) presenta una nota técnica de la Universidad Nacional de Córdoba que estudia sequías hidrológicas en 14 cuencas hidrográficas argentinas en los ríos Colorado, Mendoza, San Juan, Atuel, Ctlamochita, Anisacate, Xanaes, Suquía, Dulce, Juramento, Salado, Paraná, Bermejo y Pilcomayo. La identificación y caracterización temporal y espacial de las sequías hidrológicas permite evaluar la disponibilidad hídrica regional y local, una componente esencial en la planificación del agua. En este trabajo se define como sequía hidrológica aquel suceso en el cual la oferta de caudal (medio anual) en cuencas naturales no reguladas sea inferior al valor del caudal excedido el 70% de tiempo. El uso de un valor umbral adoptado por diversos autores en el mundo permite la comparación de los resultados, pues utilizar una probabilidad de excedencia permite caracterizar sequías en regiones no homogéneas climatológicamente.

Resumimos las principales conclusiones de este estudio:

- *Los resultados obtenidos en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas, indicaron que en la región de estudio (14 cuencas de la región Centro, Cuyo y Norte de la Argentina) ocurrieron sequías hidrológicas plurianuales y simultáneas para todas las cuencas, registradas en los periodos 1967-1971, 1945-1952 y 1936-1939.*
- *También se observa que de forma simultánea en todas las cuencas estudiadas existieron periodos húmedos a mediados de la década de 1970. Se evidenció un quiebre en este periodo entre una época seca y húmeda, lo cual coincide con la década húmeda (1977-1987) detectada en Chile y con el cambio en las condiciones medias de temperatura del Pacífico ecuatorial central de 1976-1977 y la transición climática que afectó a más de 40 variables bioambientales del Pacífico y de América, que son expresiones de la variabilidad “tipo” ENOS (El Niño/Oscilación Sur)*
- *En el nivel espacial se observa un agrupamiento entre las cuencas que presentan sequías simultáneas la mayor parte de tiempo analizado.*
- *En la última década, los eventos de déficits hídricos han impactado en la sociedad, con pérdidas económicas en la actividad productiva del suelo, afectación de obras de ingeniería para abastecimiento de agua y pérdidas en la capacidad de generación de centrales hidroeléctricas (al verse reducidos los niveles de los embalses). Las sequías que han generado estos impactos no han alcanzado el orden de magnitud de las registradas antes de 1970 (que han sido las más críticas en cuanto a duración, magnitud e intensidad)*

El Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales CREAN, UNCONICET, publica un *Atlas de Sequías de la República Argentina* (Referencia 21, 2014) disponible en el enlace <https://www.crean.unc.edu.ar/atlas-de-sequias-2/> Presenta una colección de mapas e imágenes de índices de sequías para el período 1980 a 2012 así como una serie de aproximadamente 14 años de imágenes satelitales de un índice de vegetación para análisis complementarios del efecto de las deficiencias hídricas. También incluyen ejemplos de análisis agro-económicos, estadísticos, climáticos de los índices de sequía y de imágenes satelitales. La actualización de los mapas de

sequías del Atlas para fechas más recientes puede realizarse a través de la página web del CREAN (ver Apéndice1).

El folleto de presentación, disponible en formato pdf, es un compacto y útil material de referencia. Se inicia con una breve discusión de las características y tipos de sequías, y los índices utilizados en el Atlas (IPN, PDSI y NVDI). Discute luego las aplicaciones de estos índices, las pérdidas en agricultura por las sequías en la Provincia de Córdoba, analiza las sequías extremas en 2008/09 y 2011/12 dentro del territorio argentino y los periodos de retorno en Marcos Juárez. Sigue con cortas secciones sobre la evaluación satelital de las sequías mediante el NDVI, la ocurrencia del fenómeno El Niño y las sequías en Argentina, y finaliza con una muy breve discusión sobre los pronósticos y el alerta temprana de las sequías

Como vimos en la sección histórica la Referencia 3 (2013) analiza la evolución de eventos húmedos y secos en la provincia de Buenos Aires desde la época colonial hasta 2008. Aplicando un modelo de balance de agua en el suelo utilizan datos diarios de precipitación y constantes hidrológicas de los suelos (basados en datos obtenidos *in situ*) y obtienen la distribución de los excesos y deficiencias de agua en el suelo, considerados como desencadenantes de los eventos hidrológicos extremos, durante el periodo 1969-2008. Mediante el uso de datos de 29 estaciones el SMN y 5 del INTA analizan la suma de los excesos y las deficiencias anuales de agua en el suelo en 16 sectores, determinados según sus cuencas, y exponen los resultados en mapas con su distribución espacio-temporal.

Entre las conclusiones destacamos “...son más serios los procesos de falta de agua pues actúan en forma más limitante de acciones paliativas que la inundación ...”, “... en la provincia de Buenos Aires existe la presencia continua de ocurrencia de riesgo de eventos hidrológicos extremos en el balance de agua en el suelo. Ellos constituyen un fenómeno natural que puede desencadenar un desastre con consecuencias sociales y económicas”, “La cuenca del Rio Salado es la más sensible a los excesos y la región sudoeste de la provincia a las deficiencias”.

Estudiando la variabilidad temporal y espacial de las sequías durante el período 1955/2009 en la provincia del Chaco, en base a series de precipitación obtenidas de fuentes estadísticas provinciales y nacionales como la APA (Administración Provincial del Agua), el INTA y el Servicio Meteorológico Nacional, se concluye que este fenómeno es un riesgo constante en dicha provincia (Ref. 22, 2012). Los datos se obtuvieron de mediciones en 19 puestos pluviómetros a los que se han aplicado técnicas estadísticas para controlarlos (test de rachas) y el método de anomalías porcentuales para detectar los meses y años secos y muy secos.

Analizan la variabilidad interanual para la serie 1955/2009 calculada a partir de las desviaciones de los montos anuales con respecto de la media del período de estudio. Estas desviaciones están expresadas en porcentaje para facilitar la comparación entre los puestos pluviométricos., organizando los resultados según la localización espacial de las localidades, es decir, según se encuentren en el Oeste, Centro o Este de la provincia. Con respecto de las desviaciones negativas o inferiores a la normal, en general, se suceden con más frecuencia las desviaciones de -50 % e inferiores, siendo muy excepcionales los años que superan el -60 %. La presencia de estadios o fluctuaciones entre años secos y húmedos sucesivos es más frecuente en el

Oeste, que en el Centro y Este provincial, y se debe a que los estadios secos y húmedos sucesivos son más cortos, temporalmente, comparados al resto de la provincia.

Con los datos pluviométricos mensuales de la serie estadística calcularon las anomalías absolutas (en mm) y porcentuales, mes a mes, con respecto a la media del período.. Teniendo en cuenta únicamente las anomalías negativas se elaboró una tabla de 10 intervalos (de 0 a -10 hasta -91 a -100) contabilizando el número de meses (frecuencia) que presentan los valores de cada grupo. Los resultados muestran que todas las localidades presentan mayor frecuencia de secuencias secas de 2, 3 ó 4 meses de duración, siendo mínimas o nulas las que superan los 7 meses. Notan que los numerosos meses que presentan anomalías extremadamente secas quedan diluidos en el monto anual y, por ende, en los valores de desviación porcentual lo que pone en evidencia que muchos meses secos son compensados por pocos meses húmedos o muy húmedos.

Produjeron también tablas de frecuencias de los meses secos consecutivos. para cada uno de los puestos pluviométricos observándose que todas las localidades presentan mayores frecuencias de secuencias secas de 2 a 4 meses de duración, siendo mínimas o nulas las que superan los 7 meses. Finalmente, luego de contrastar las zonas de actividad económica con la ocurrencia de extremos secos, expresan que *“podemos concluir que la sequía constituye un riesgo constante para la población chaqueña, las actividades que ésta realiza y para el ambiente. Actualmente se “percibe” que la magnitud y la longitud del fenómeno se han acentuado, sin embargo, debe considerarse que el Hombre tiende a localizarse y emprender actividades en áreas que son inadecuadas para esos fines por ser azotadas, con cierta frecuencia, por sequías de rango extraordinario”*.

Las causas físicas probables de las sequías en el sector sur de Sud América (al sur de 20°S) se analizan en la Referencia 23 (2010) por medio de índices de sequía climática mensual y anual en seis regiones de ese sector y sus asociaciones con diecisiete predictores. Uno de los principales predictores es la actividad anticiclónica subtropical sobre ambas costas de América del Sur junto con su interacción con la depresión continental y la temperatura de la superficie del mar en la costa de Brasil. La mayor predictibilidad se concentra en los meses de noviembre-diciembre-mayo y las más bajas en marzo, junio y agosto. En la escala subregional, los principales predictores responden a anomalías de la presión atmosférica en el Océano Atlántico para el Noroeste de Argentina (NOA), la temperatura de la superficie del mar en la costa brasileña para el Nordeste argentino (NEA), las condiciones anticiclónicas sobre el Pacífico y el Atlántico para el Centro Oeste (CO), estas últimas y su interacción con la depresión continental para la Pampa Húmeda (PH), y la actividad anticiclónica sobre el Pacífico para la Patagonia (PAT) y la Circulación transcordillera para Chile Central y el Comahue (CHI).

En las conclusiones destacan también que *“Por otro lado, la relevancia del ciclo ENSO se infiere del desarrollo de la predictibilidad durante el otoño-invierno y su interacción con la evolución de la depresión continental durante la primavera, alcanzando máximos previsibilidad en noviembre-diciembre. La Pampa Húmeda encabeza el grupo de índices de sequía regional en seis meses consecutivos (agosto-enero), un período de gran importancia estacional para la gran cosecha de granos en el país”*.

La referencia 24 (2009) presenta un estudio sobre las sequías en la provincia de Buenos Aires durante el período 1996 –2007 a partir de datos de precipitación correspondientes a 33

estaciones meteorológicas que cubren el ámbito de la Provincia de Buenos Aires y datos de riesgo por sequía suministrados por el Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia analizando el fenómeno desde el punto de vista meteorológico, o sea como una disminución significativa en las precipitaciones. Luego proceden a indagar sobre las consecuencias directas e indirectas de las sequías con la finalidad diferenciarlas de acuerdo a tipos de sequías: meteorológicas, agrícolas e hidrológicas.

Las principales conclusiones del estudio son:

- La sequía es un evento recurrente en la provincia Buenos Aires, que estaba siendo afectada por una considerada como la peor de los últimos 20 años, provocando grandes pérdidas en distritos del norte, sur y sudoeste de la misma.
- Las sequías meteorológicas, ocurridas por ausencia prolongada en la distribución de las precipitaciones, afectan de manera directa a las actividades humanas derivándose su prolongación en sequías agrícolas e hidrológicas.
- Los años con menor cantidad de precipitaciones han ido en disminución, siendo el año 2005 el más afectado, en tanto que para el año 2008 un 30% de los partidos de la provincia declararon la emergencia y/o el desastre agropecuario.
- Aquellos partidos en emergencia agropecuaria coinciden con zonas en las cuales el punto de marchitez del suelo supera el 50%.
- El área más afectada respecto al fenómeno estudiado es el ámbito suroeste de la provincia, centro y noroeste.
- En los últimos quince años (1991-2005), la región estuvo ininterrumpidamente afectada por situaciones de sequía, lo que lleva pensar en “condiciones climáticas”, más que en eventuales “emergencias climáticas”.

En tanto que cierta legislación (por ejemplo la Ley de Emergencia Agropecuaria - LEA) considera la sequía como un fenómeno puramente meteorológico la Referencia 25 (2009), estudiando las sequías en el sudoeste bonaerense, la aborda como producto de la *vulnerabilidad social*, consecuencia de una gestión deficiente y de la imprevisión por parte de los productores agropecuarios afectados.

Se estudia la ocurrencia de sequías en los partidos de Adolfo Alsina, Saavedra, Puán, Tornquist, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Bahía Blanca, Villarino, Patagones, Guaminí, Coronel Suárez y Coronel Pringles (que configuran el Sudoeste Bonaerense) durante el periodo 2001-2006. El trabajo discute *in-extenso* el impacto en distintos cultivos (maíz, trigo, girasol, soja) así como la legislación vigente respecto a la sequía y el Plan de Desarrollo del Sudoeste, que identifica la urgente necesidad de la puesta en marcha de soluciones integrales para contrarrestar las limitaciones de la región.

Citamos, a continuación, los párrafos que consideramos más destacados del trabajo:

“El análisis realizado permite afirmar que la región posee un alto riesgo agrícola en comparación con el resto de la provincia. Los rendimientos de los principales cultivos pampeanos se posicionan por debajo del promedio provincial, lo que manifiesta una situación de desventaja productiva. Esta situación hace reflexionar sobre cuán conveniente resulta apostar a estos cultivos. Más aún, si se tiene en cuenta el hecho de que en el período 1991-2005 la región estuvo ininterrumpidamente en emergencia por sequía.”

“Las sequías afectan gran parte del Oeste y Sudoeste bonaerense; sus consecuencias son recurrentes, especialmente para los sectores más vulnerables desde el punto de vista social.”

“A partir de los ‘90 la región estuvo ininterrumpidamente afectada por situaciones de sequía, lo que lleva a pensar si se trata de “emergencias climáticas” o, más bien, de “condiciones climáticas”. La legislación pertinente a la problemática propone soluciones ex-post, en lugar de métodos preventivos en relación con las características socio-productivas de los involucrados. A ello se le suma que el Código del Agua resta importancia a la sequía como riesgo hídrico.”

Un estudio sobre sequías en tres localidades de la región oriental agropecuaria de la provincia de La Pampa, General Pico, Santa Rosa y Guatraché, para el período 1921/2009 se presenta en la Referencia 26 (2009).

Calculan el índice de Severidad de Sequía de Palmer para caracterizar agroclimáticamente la región. *“Durante el período analizado las tres localidades se caracterizaron por presentar mayor frecuencia de episodios secos que húmedos y normales. General Pico fue la de menor número de casos con sequía, seguida por Santa Rosa y Guatraché. Los tres sitios presentaron mayor frecuencia de sequías débiles. Analizando la marcha temporal de los períodos secos y húmedos se observa que en las tres localidades hay un predominio de meses negativos (secos) hasta mediados de la década de 1970, a partir de la cual los índices positivos (húmedos) aumentan en frecuencia e intensidad mientras que los índices negativos son menos frecuentes y sólo alcanzan magnitudes elevadas al final del período analizado sobre todo en Santa Rosa y Guatraché”.*

El impacto de las sequías en la productividad del maíz en la Pampa Húmeda durante el siglo pasado se estudia en la referencia 27 (2007) empleando datos pluviométricos mensuales de localidades ubicadas en la Pampa Húmeda Argentina que incluyen al Sur de la provincia de Santa Fe, provincia de Entre Ríos y la provincia de Buenos Aires en el período 1903-2001. Para la detección de sequías areales que afectaran a la región se utilizó un método, propuesto por el autor principal, que utiliza los totales mensuales de precipitación en las estaciones consideradas. Un análisis previo de correlación entre el índice de sequía anual con los rendimientos promedios de trigo y maíz en Argentina, indicó un mayor grado de asociación con el segundo, mostrando la mayor sensibilidad del cultivo del maíz a las fluctuaciones hídricas, motivo por el cual se eligió este cultivo para el análisis de impacto. El trabajo incluye extensas discusiones sobre distintos aspectos técnicos de interés, entre ellos la influencia en los rindes de las retroacciones entre tecnología, fertilización y aumento de precipitación que dificultan la estimación adecuada del impacto del salto climático ocurrido en las décadas de 1950-60, con un aumento en la precipitación total sobre los rindes.

Resumimos las principales conclusiones:

- *En este trabajo se muestra que la región bajo estudio posee un régimen donde predominan las rachas secas de corta duración que la torna propicia para la agricultura de secano.*
- *El período lluvioso reciente ha retraído al fenómeno estudiado, de tal manera que en la segunda mitad del siglo pasado no se observaron períodos anuales tan secos como los registrados durante la primera mitad del Siglo XX.*

- *En las tendencias de largo plazo sobre las precipitaciones estacionales puede verse un sesgo de crecimiento de las precipitaciones veraniegas y lo contrario en las invernales*
- *Los valores de productividad del maíz, cereal utilizado para el análisis de impacto de las sequías, han pasado del orden de los 1.500 Kg/Ha a unos 4.000 Kg/Ha en el transcurso del siglo pasado. De esta tendencia parte es explicada por el crecimiento de la precipitación, otra por efectos de la tecnología y no se descarta una interacción entre ambos factores.*
- *Las fluctuaciones hídricas en la región pueden hacer variar a la productividad entre 1.200 a 4.600 Kg/Ha. Bajo situaciones de sequías, efectos tecnológicos y otros, poco pueden hacer para cambiar los rindes, y a la inversa en situaciones de excesos de agua.*
- *Filtrando los efectos de larga escala se ven como importantes las caídas de la productividad ocurridas durante las sequías de La Niña de 1988-89 y 1995-96. También esto muestra lo importante que fueron ambas sequías para hacer caer la productividad en las últimas décadas, a pesar de estar encubierta por posibles efectos tecnológicos.*

En la Referencia 28 (2007) se intenta averiguar la influencia que ejercen sobre la variación de las precipitaciones, en una región mediterránea como la del Noroeste Argentino, las fluctuaciones térmicas de las aguas superficiales de los flancos oceánicos Atlántico y Pacífico. Fueron utilizados datos mensuales de las anomalías térmicas de las estaciones costeras Lima, Rio de Janeiro y Rio Gallegos como indicadoras de las temperaturas del mar adyacente, correspondiente al periodo 1951-1980, y se calcularon los índices de sequía regionales, mensuales y anuales, para igual periodo analizando series pluviométricas de treinta estaciones seleccionadas, correspondientes al mismo periodo, dispersas en las seis provincias que conforman la región del Noroeste Argentino: Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, Tucumán y Santiago del Estero .

Se ha encontrado que las sequías regionales del Noroeste Argentino se relacionan preferentemente con anomalías térmicas negativas de las aguas oceánicas costeras.

En el noroeste de la Provincia de Buenos Aires el aumento en las precipitaciones permitió un incremento de la superficie dedicada a la agricultura en secano. A partir de la década de 1970, la frontera de la agricultura experimentó un marcado corrimiento hacia el oeste, penetrando en zonas que durante las décadas precedentes habían sido predominantemente ganaderas y con poca aptitud para la producción de cultivos de cosecha debido a su clima semiárido. Diversos estudios sugieren que dicho avance, observado en la Región Pampeana durante el último cuarto del siglo XX, fue favorecido por un incremento en el régimen de lluvias, que actuó en forma sinérgica con el incremento en la demanda de los mercados internacionales y las innovaciones tecnológicas.

La Referencia 29 (2006) intenta dilucidar si dicho fenómeno constituye un cambio irreversible o forma parte de un ciclo de larga duración, con fases secas y húmedas, separadas por fases de transición, es decir si el régimen de precipitación se ajusta a una evolución lineal o bien a una cíclica. Se emplearon registros mensuales de lluvia 1918-2000, de las cabeceras de partido de las localidades de Carlos Tejedor, Rivadavia, Trenque Lauquen, Pehuajó y Carlos Casares. La probabilidad de un cambio lineal en el régimen hídrico se evaluó por medio de un análisis de correlación y regresión y de la existencia de un ciclo hídrico de larga duración correlacionando linealmente las series de precipitación con un ciclo hipotético basado en la función seno. Tanto el

ajuste lineal como el cíclico arrojan parámetros estadísticos significativos. Las series de precipitaciones utilizadas arrancan en 1918, o sea durante el final de una transición húmeda-seca y casi al inicio de una fase seca, y terminan en el año 2000, al final de una fase húmeda, provocando que el periodo empleado presente una tendencia lineal estadísticamente significativa. Sin embargo, cuando las series se ajustan al ciclo periódico, se pone en evidencia que el ajuste explica un mayor porcentaje de la varianza.

Los autores alertan que con la hipótesis del ciclo hídrico (variabilidad a muy largo plazo) sería necesario prever las consecuencias que traería aparejado un retorno a periodos de bajas precipitaciones durante las próximas décadas, escenario que exigiría ajustar el sistema productivo buscando el máximo de seguridad, renunciando en alguna medida a la máxima productividad. Esta precaución, si bien significaría menor rentabilidad, por las mayores erogaciones en el desarrollo de sistemas de riego u otra tecnología, permitiría al sistema de producción adquirir capacidad para resistir años secos. En cambio si el incremento en el régimen de lluvias se atribuye a un proceso lineal, la estrategia adecuada conduciría a ajustar el sistema productivo a un uso eficiente de alta disponibilidad de humedad, buscando la máxima productividad.

La aceleración del calentamiento global de comienzos de siglo, provocando un fuerte aumento en intensidad y frecuencia de eventos extremos, nos sugiere que la hipótesis de un cambio permanente (la más aceptada en la comunidad especializada) es la más plausible.

Una evaluación de las sequías extremas en la región pampeana argentina para los periodos 1931/1960 y 1961/1990 se presenta en la referencia 30 (1997?). Se utilizaron datos de precipitación y evapotranspiración potencial mensuales de 28 estaciones meteorológicas ubicadas en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, La Pampa y Entre Ríos calculándose el balance hídrico y el índice de sequía de Palmer.

Resumimos sus conclusiones:

“En general, puede apreciarse que el período 1961/90 posee una mayor superficie con sequías severas en la que se destacan las áreas oeste, sudeste y noreste. El análisis comparativo de ambos períodos refleja que las áreas en el oeste de la región pampeana y la porción SE de la provincia de Buenos Aires presentan persistencia de sequías moderadas o severas”.

“No se identificaron patrones de distribución espacial de las sequías extremas. Sin embargo, ciertas regiones aparecen consistentemente con eventos de menor magnitud mientras que otras áreas en el oeste y sudeste presentan sequías severas en ambos períodos. El período 1961/90 presentó sequías más severas que durante el período anterior. Sin embargo, se pudo comprobar que los eventos extremos ocurrieron al comienzo de la década del 70 y que en las décadas posteriores se produce una declinación en la severidad de las sequías. Esta tendencia puede tener consecuencias económicas beneficiosas en las nuevas áreas incorporadas a la agricultura”.

Un estudio de la evolución temporal del Índice de Palmer para la ciudad de Villa Mercedes , San Luis , durante el periodo 1903-2003 se presenta en la Referencia 31 (2004) utilizando datos meteorológicos de la Estación Meteorológica de Villa Reynolds, la Estación Agrometeorológica de la Estación Experimental Agropecuaria INTA San Luis y de la Dirección del Agua del Gobierno de

la Provincia de San Luis y cálculos del agua útil para los suelos de la zona hasta un metro de profundidad, siendo la capacidad de retención de los mismos de 150 mm. Este índice combina precipitación y temperatura y categoriza las sequías de acuerdo a su intensidad, indicando el grado de sequedad en los estratos que componen el suelo, en: condiciones normales, sequía incipiente, débil, moderada, severa y extrema.. Encuentran que *“Podemos concluir que en los últimos 33 años (1970-2002) las sequías disminuyeron su frecuencia e intensidad, pero ésta tendencia se ha revertido recientemente con una prolongada sequía durante el año 2003, que alcanzo una intensidad nunca observaba a través del siglo pasado. La sequía actual (n.b. 2004) en el área que nos ocupa, es la de mayor intensidad en los últimos 100 años”*.

De la consideración de la copiosa bibliografía anterior surge que en la Argentina el fenómeno seguía ocurre, en mayor o menor grado, en muchas y variadas regiones del país; que es frecuentemente recurrente en muchas de ellas (p.e. la provincia de Buenos Aires); que cuando se consideran estadísticas acumuladas (p.e. anuales) los periodos húmedos pueden enmascarar a los secos; que hay cierta previsibilidad de la sequía en algunas regiones cuando se utilizan como predictores las tele-conexiones con fenómenos globales como el conocido ENSO o, en forma secundaria, con patrones de oscilaciones como la antártica o la de la atmósfera tropical (Madden-Julian); que el acelerado calentamiento global presente, provocando una fuerte inestabilidad climática, puede aumentar la ocurrencia e intensidad de las sequías en la región; y también que los eventos de sequía muy extremos pueden provocar impactos socio-económicos negativos muy severos.

Comentarios finales

La República Argentina abarca un extenso territorio que presenta climas y biomas muy diversos. Sin embargo el fenómeno de sequías se presenta, en muy distintos grados y periodos, en casi todo el país. Por lo que vimos, de estimaciones surgidas de la investigación científica, si bien la variabilidad climática es con frecuencia la principal causa de los eventos individuales de las sequías ocurridas, la ocurrencia de casos severos durante años recientes en muchas regiones es consistente con resultados derivados de simulaciones forzadas con aumentos en la concentración de gases de efecto invernadero, por lo que se espera que estos fenómenos puedan continuar intensificándose en el futuro mediano.

En estas notas hemos intentado dar información y divulgar conceptos sobre este extremo hidro-meteorológico para su uso por las comunidades que sufren sus consecuencias, incluyendo nociones sobre: su definición y características, algunos índices e indicadores para su seguimiento, su previsibilidad y los métodos de previsión, y su comportamiento en varias regiones del país. Esperamos que les hayan sido de utilidad.

Como se ha visto, dada su complejidad y la variedad de actores y áreas donde impacta, para enfrentar o mitigar la sequía con cierto éxito es necesario una serie de acciones para mejorar su gestión que pueden incluir: su identificación, monitoreo, alerta temprana y eventual previsión mediante el uso de productos elaborados por centros o instituciones especializadas; la construcción de obras de almacenaje de agua en épocas lluviosas para su uso en los periodos secos; la contratación de seguros específicos; la siembra de variedades de semillas resistentes a las sequías y

hasta, como sugiere el Banco Mundial, la aplicación de políticas fiscales que permitan a los productores poder absorber y superar los impactos de este fenómeno extremo.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) publicó en el año 2014 “*Directrices de política nacional para la gestión de sequías*” (Ref. 32) como una herramienta para la gestión integrada de las sequías y como guía o material de recursos para los profesionales involucrados. Recientemente la FAO y el Banco Interamericano de Desarrollo (IDB) han publicado guías sobre estrategias y políticas para gestionar las sequías, brindando una orientación práctica en términos de planificación y gestión para enfrentarlas mejor preparados. En el año 2020 la FAO lanzó una “*Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola*” (Ref. 33) y en este año el IDB un informe de políticas (Ref. 34) donde analiza las crisis hídricas producidas por sequías en España (incluidas las Islas Canarias), Chile, México, el corredor seco entre Honduras, Guatemala y El Salvador, Brasil y Sudáfrica, explorando hechos y errores comunes en los mecanismos de respuesta y extrayendo lecciones valiosas para ayudar a que los encargados de las políticas puedan lidiar con las sequías.

Referencias

1. Banco Mundial: *Inundaciones y sequías, los riesgos climáticos que más impactan a Argentina*, julio 2021
Disponible en <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2021/07/01/inundaciones-y-sequias-los-riesgos-climaticos-que-mas-impactan-a-argentina>
2. Florentino Ameghino: “*Las secas e inundaciones en la Provincia de Buenos Aires*”, 1884 - Quinta reimpresión 1984 La Plata,
Disponible en http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/sipcyt/bfa000991.pdf
3. Olga Eugenia Scarpati, Alberto D. Capriolo : *Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal*, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM , Núm. 82, pp. 38-51, 2013.
4. María Del Rosario Prieto, Roberto Gustavo Herrera: *De sequías, hambrunas, plagas y “otras varias y continuas calamidades acaecidas en la jurisdicción de Córdoba” durante el siglo XVIII*, Cuadernos de Historia, Serie Ec. y Soc., N° 4, Secc. Art., CIFYH-UNC, Córdoba 2001.
5. Margarita Gascón, César N. Caviedes : *Clima y sociedad en Argentina y Chile durante el periodo colonial*, [Anuario Colombiano de Historia Social y de la Cultura](#), Vol. 39, N° 2, julio - diciembre 2012.
6. José María Suriano y Luis Humberto Ferpozzi: *Inundaciones y sequías en la historia pampeana* , Rev. de la Sociedad Rural de Jesús María, 77:20-24, 1993.
7. Jagsich, J. : *La sequía reinante y su probable duración*, Diario “La Prensa”, Buenos Aires, 30 de Mayo, 1929.

8. Jagsich, J. : *Las causas de la gran sequía de 1935 - Posibilidad de previsión de nuestras sequías y épocas de lluvia a base de observaciones oceanográficas* , Diario “La Prensa”, Buenos Aires, 13 de Marzo 1936.
9. UNESCO, *Caracterización, monitoreo y naturaleza de las sequías*, Seminario en línea, 19 al 22 de abril 2021, Montevideo. Material disponible en <https://events.unesco.org/event?id=4150143266&lang=3082>
10. Camilloni, I., V. Barros, S. Moreiras, G. Poveda y J. Tomasella: 2020: *Inundaciones y sequías. En: Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT*, McGraw-Hill, Madrid, España.
11. Jonathan Spinoni y otros: *A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016*, Journal of Hydrology: Regional Studies 22, 2019
12. Juan L. Minetti, Darío P. Ovejero y Walter M. Vargas: *Trends in drought indices on the tropical-subtropical region and its correlation with the global warming*, Revista de climatología, Vol. 19 : 1-16 , 2019
13. Vicente Barros, Robin Clarke, Pedro Silva Días (Editores): “*El Cambio Climático en la Cuenca del Plata*”, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, 2006.
14. J.A. Rivera, O.C. Penalba: *El Niño/La Niña events as a tool for regional drought monitoring in Southern South America*, Drought: Research and Science-Policy Interfacing – Andreu et al. (Eds), 2015
15. Juan Antonio Rivera, Olga Clorinda Penalba: *Distribución espacial de la amenaza de sequías en el sur de Sudamérica*, Conference Paper · May 2015
16. Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA) de las Naciones Unidas: *ARGENTINA: SEQUÍA 2020 - Análisis preliminar de situación*, elaborado el 27 de noviembre 2020
17. Adrián Gutiérrez Cabello, Agustina Ciancio: *El impacto de la sequía en la economía Argentina. El caso del cultivo de soja*, Escuela de Economía y Negocios UNSAM , 2018
- 18E.C. González Morinigo, N.S. Bonel, J. Stella: *Análisis del patrón de precipitación durante el evento La Niña 2017/18 en San Luis*, XVII Reunión Argentina de Agrometeorología , San Luis, 2018
19. I. Feldman, *Recurrencia de sequías e inundaciones en llanuras argentinas*: Revista de Divulgación Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental Facultad de Ciencias Agrarias. UNLZ. Vol. 4 (1) 2017
20. E. Díaz, A. Rodríguez, O. Dölling, J. C. Bertoni, M. Smrekar: *Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Argentina*. Tecnología y Ciencias del Agua, 7(1), enero-febrero, 2016
21. A. C. Ravelo, R.E. Zanvettor y P.E.C. Bolett: *ATLAS DE SEQUÍAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA*, CREA / Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales UNC -CONICET, 2014

22. Gómez, C. V; Pérez, M. E. “*Sequía: Un Riesgo Constante en la Provincia del Chaco*”. IX JORNADAS NACIONALES DE GEOGRAFÍA FÍSICA BAHIA BLANCA. 19 al 21 de Abril de 2012. 50-61 pp ISBN 978-987-1648-32-0
23. Juan Leonidas Minetti, Walter Mario Vargas, Arnobio German Poblete, Maria Elvira Bobba: *Regional drought in the southern of South America - Physical aspects*, Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.1, 88 - 102, 2010
24. Andrea Pérez Ballari, María Inés Botana, Paola Laporta, Laura Iezzi: *Sequías en la Provincia de Buenos Aires: resultados de un proceso de investigación*, X JORNADAS DE INVESTIGACIÓN, Centro de Investigaciones Geográficas - Departamento de Geografía, La Plata, 12 y 13 de Noviembre de 2009
25. María Isabel Andrade, Paola Laporta, Laura Iezzi: *Sequías en el sudoeste bonaerense : vulnerabilidad e incertidumbre*, Geograficando, Vol . 5, N° 5, 213-231, 2009
26. G. Vergara, G. Casagrande, J. Arnaiz, F. García: *Las sequías (1921/2009) en tres localidades de la provincia de La Pampa (Argentina)*, Rev de la Fac. de Agronomía, UNLPam, Vol N" 10, 2009
27. J. L. Minetti, W. M. Vargas, B. Vega, M. C. Costa: *Las sequías en la pampa húmeda: impacto en la productividad del maíz*, Revista Brasileira de Meteorologia, v.22, n.2, 218-232, 2007
28. María Elvira Bobba , Juan Leonidas Minetti: *Las sequias de la region del Noroeste Argentino y su relacion con las temperaturas costeras superficiales del mar*, Espacio y Desarrollo N° 19, 2007
- 29 Eduardo M. Sierra, Silvia P. Pérez: *Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agroecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina*, Revista de climatología, vol. 6 , 2006
30. Andrés C. Ravelo, Walter A. Da Porta, Roberto E. Zanvetor: *Evaluación de las sequías extremas en la región pampeana argentina durante el periodo 1931/90*, disponible en <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/524.pdf>, 1997(?)
31. Roberto Zanvetor, Francisco Orta: *Análisis de las Sequías en Villa Mercedes, San Luis (1903-2003)*, X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología, Mar del Plata, octubre 2004
32. *Directrices de política nacional para la gestión de sequías: Modelo para la adopción de medidas*, Organización Meteorológica Mundial, OMM - N.º 1164, 2014
33. G. Fuganti, M. Minelli, O. Rojas: *Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola*, Ciudad de Panamá, FAO, 2020
34. Raphaëlle Ortiz, Anamaría Núñez, Corinne Cathala, Ana R. Rios, Mauro Nalesso/ editores, Raúl Muñoz, Alfred H. Grunwaldt, Claudia Calderón: *Water in the Time of Drought II: Lessons from Droughts around the World*, Banco Interamericano de Desarrollo, IDB Technical Note N° 2246, Julio 2021
-

Apéndices

1. Centros operativos con información y guía sobre sequías

Recordemos que GEA (Guía Estratégica para el Agro) - un servicio de la Bolsa de Comercio de Rosario con el objetivo de contribuir a mejorar el proceso de toma de decisiones de los agentes de la comercialización de granos - genera información con los indicadores climáticos que impactan sobre los cultivos, analiza semanalmente el pulso productivo de la principal área agrícola de Argentina (la Región Núcleo) y presenta informes de seguimiento, estimaciones y análisis de coyuntura de fenómenos hidro-meteorológicos (entre ellos la sequía) que inciden sobre la producción agrícola. Toda esta información se encuentra públicamente disponible a través de la web de la Bolsa de Comercio y los canales digitales de comunicación.

Desde hace unos años se han establecido centros que brindan información en línea, en diferentes escalas geográficas, sobre fenómenos meteorológicos y climáticos que pueden impactar a un amplio rango de actividades y usuarios. Mostraremos algunos a nivel mundial, regional y nacional que ofrecen productos ligados a sequías.

A nivel global:

- Destacamos el International Research Institute for Climate and Society (IRI), establecido en 1996 por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos y la Universidad de Columbia como el primer instituto internacional del mundo con la misión de aplicar la ciencia climática al servicio de la sociedad. El enlace a las herramientas de análisis disponibles en línea es

https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Drought/Global/CPC_GOB/Analysis.html

A nivel regional:

- SISSA: Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica, que funciona en el marco del Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (CRC-SAS) que es una organización virtual, constituida en forma de red, según los principios definidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La información brindada incluye el estado actual de las sequías, índices y también pronósticos a 15 días. Su enlace es <https://sissa.crc-sas.org/que-es-sissa/>

Los fundamentos de esta iniciativa del CRC-SAS, que intenta alejarse del modo reactivo de gestión de crisis de las sequías hacia un enfoque más proactivo, se encuentra en su Plan Estratégico 2018 -“*Towards a Drought Information System for South America*” (versión pdf en https://www.crc-sas.org/en/pdf/capacitacion/cursos/0810_08_2017_buenosaires/SADIS_Strategic_Plan.pdf). Es además un excelente texto de referencia sobre sequías.

El CRC ha lanzado recientemente un Boletín Climático Regional cuyo primer número se publicó en el mes de abril. En éste se proporciona información sobre el comportamiento de las principales variables meteorológicas, como precipitación y temperatura, en el Sur de América del Sur durante el año 2020. Así también, se destacan los eventos extremos más importantes registrados en cada país de la región. Se puede obtener en formato pdf en el sitio

<https://www.crc-sas.org/es/pdf/Boletin%20Climatico%20Regional%20%202020.pdf>

- El Laboratorio Climatológico Sudamericano, que estudia la variabilidad y el cambio climático en la región (Argentina y Sudamérica) como asimismo el impacto de éstas en el medio natural y las actividades antrópicas (Agricultura, ganadería, generación de energía y otros). Ofrece información sobre perspectivas climáticas e índices de sequía en el enlace <https://labclisud.com.ar/servicios-laboratorio/indice-de-sequia/>

A nivel nacional:

- El monitoreo de sequías meteorológicas y agropecuarias es realizado por una Mesa Nacional de Monitoreo de Sequías integrada por especialistas. Se basa en varias fuentes de datos, incluidas observaciones de expertos en campo, de acuerdo con el Protocolo interinstitucional para sequías meteorológicas y agrícolas, que en su versión de diciembre 2015 puede consultarse en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sequias_meteorologicas.pdf

Se emiten informes mensuales de sequías, incluyendo zonas en riesgo, un resumen de la situación general y la evolución en cinco zonas (NOA, NEA, Centro, Patagonia y Cuyo). Pueden consultarse en el sitio del MAGyP https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/d_eda/sequia/

También la Oficina de Monitoreo de Emergencias Agropecuarias (OMEGA) del MAGyP, (que tiene el objetivo de informar a las instituciones y público en general en la elaboración de medidas tendientes a prevenir y a mitigar la vulnerabilidad social y productiva a las sequías, incendios e inundaciones) publica informes de monitoreo semanales. Ver el sitio https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/d_eda/omega/

- El Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) de la Universidad de Córdoba opera un Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías que genera mensualmente índices, tales como el SPI, permitiendo detectar y evaluar condiciones de sequías o excesos de humedad a nivel regional, provincial y nacional. Su sitio <https://www.crean.unc.edu.ar/monitoreo-de-sequias/> además de presentar mapas mensuales de los índices, incluye también un historial mensual desde el año 2011, así como acceso a una variada información sobre el tema sequías y desertificación.

- El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) opera un Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) en línea que permite la consulta de información actual e histórica de diversas redes de estaciones meteorológicas del INTA (y extra-INTA) así como pronósticos agrometeorológicos en el sitio <http://siga.inta.gob.ar/>.

- El Instituto Nacional del Agua (INA) (<https://www.argentina.gob.ar/ina>) emite alertas hidrológicas en la Cuenca del Plata así como informes y boletines hidrometeorológicos y desarrolló un Sistema de Gestión de Amenazas hidrológicas (SGA) en línea (<https://sga.ina.gob.ar/cirsa/>).

- El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ofrece una variada información de utilidad para el monitoreo de extremos hidrometeorológicos, incluyendo informes especiales para casos muy intensos, previsiones meteorológicas para las actividades agropecuarias (https://www.smn.gob.ar/pronostico_agropecuario) y un monitoreo agrometeorológico diario, decádico y mensual (https://www.smn.gob.ar/monitoreo_periodos). El SMN además participa activamente, junto con otros servicios nacionales de la región, en la confección de productos que ofrece el SISSA, Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica, mencionado más arriba.

2. Fenómenos globales que influyen sobre los eventos hidro-meteorológicos extremos

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

Se genera a través de interacciones moduladas estacionalmente entre el océano Pacífico tropical y la atmósfera, e influye en los fenómenos severos, las lluvias, el flujo de los ríos y la producción agrícola en gran parte del mundo. De hecho, la influencia climática remota del ENOS es tan grande que el conocimiento de su fase actual y los pronósticos de su fase futura en gran medida sustentan muchos pronósticos estacionales de lluvia y temperatura en todo el mundo.

El continuo de eventos de El Niño generalmente se estratifica en dos tipos (a menudo denominados "sabores" - "*flavours*"), Pacífico Central y Pacífico Oriental, donde el nombre indica la ubicación de las anomalías de temperatura de la superficie del mar (SST) más grandes de los eventos. Los diferentes tipos de eventos tienden a producir distintas teleconexiones e impactos climáticos.

Los efectos climáticos del ENSO fuera del Pacífico tropical surgen en gran medida a través de las teleconexiones atmosféricas inducidas por cambios impulsados por el ENSO en la convección profunda y el calentamiento de la atmósfera tropical. Las teleconexiones a latitudes más altas son forzadas por ondas que se propagan hacia los extratropicos y excitan respectivamente los patrones del Pacífico-Norte y del Pacífico-Sud en los hemisferios norte y sur. Las observaciones muestran una fuerte modulación multi-decádica de la varianza del ENSO a lo largo del siglo XX, con el período más reciente mostrando una mayor variabilidad mientras que a mediados del siglo mostró una variabilidad relativamente baja.

A largo plazo, es muy probable que aumente la variación de la precipitación relacionada con El Niño-Oscilación del Sur y es prácticamente seguro que el ENSO seguirá siendo el modo dominante de variabilidad interanual en un mundo más cálido.

Oscilación antártica (AAO) o Modo Anular del Sur (SAM)

La Oscilación Antártica (AAO) o Modo Anular del Sur (SAM - Southern Annular Mode) consiste en una redistribución meridional de la masa atmosférica alrededor de la Antártida, asociada con un desplazamiento meridional del chorro en altura y los vientos del oeste en superficie sobre el Océano Austral. Los índices SAM se definen de diversas formas como la diferencia en la presión media zonal al nivel del mar o en la altura geopotencial entre latitudes medias y altas o mediante un análisis de componentes principales.

El modo anular del sur (SAM) es el modo principal de variabilidad atmosférica extratropical a gran escala en el Hemisferio Sur e influye en la mayoría de los extratropicos australes. En su fase positiva, se caracteriza una presión anómalamente baja sobre el casquete polar y una presión alta en las latitudes medias australes. Si bien hay algunas asimetrías zonales en la estructura del SAM, es más simétrico que su homólogo boreal.

Aunque el SAM se usa a menudo como un indicador (proxy) para la ubicación del cinturón de vientos del oeste en latitudes medias, las tendencias en el SAM pueden reflejar una combinación de cambios en la posición, el ancho y la intensidad de la corriente en chorro. Los cambios en la

circulación del Hemisferio Austral asociados con el SAM influyen en el estrés del viento en la superficie y, por lo tanto, afectan el Océano Austral.

Durante el período instrumental, ha habido una sólida tendencia positiva en el índice SAM, particularmente desde 1970 (*confianza alta*). Existe una *confianza media* en que la tendencia reciente en el SAM no tiene precedentes en los últimos siglos. Existe una *confianza alta* en que el agotamiento del ozono estratosférico y los aumentos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) han contribuido a la tendencia positiva de la SAM durante finales del siglo XX, con el agotamiento del ozono dominando en el verano austral, luego del pico del agujero de ozono antártico en septiembre-octubre, y los aumentos de GEI dominando en otras temporadas.

Bajo los escenarios de emisiones más altas en los modelos de simulación numérica del clima, el SAM en el verano austral se volvería más positivo durante el siglo XXI (*confianza alta*).

Oscilación Madden-Julian (MJO)

La Oscilación Madden-Julian (MJO) es el modo principal de variabilidad tropical intraestacional con una escala de tiempo de 20-90 días y es una fuente importante de variabilidad y previsibilidad climáticas regional en todo el mundo en escalas de tiempo sub-estacionales (de una semana a meses). Se caracteriza por perturbaciones a escala planetaria (número de onda zonal 1-3) de presión, viento, nubes y lluvia que se mueven predominantemente hacia el este a lo largo del ecuador a una velocidad promedio de 5 metros por segundo. Más precisamente, la MJO se caracteriza por regiones alternas de convección suprimida e intensificada, acoplada a una circulación anómala de vuelco zonal de la atmósfera. La MJO está impulsada por procesos internos del océano y la atmósfera que ocurren durante todo el año, pero exhibe una estacionalidad prominente con señales más pronunciadas en el invierno boreal.

Durante el verano boreal, los centros de actividad convectiva asociados con la MJO se alejan del ecuador a 10°N-20°N y se propagan hacia el norte en la región del monzón asiático, además de la propagación hacia el este, a menudo denominada *oscilación intraestacional del verano boreal* (BSISO). Mientras que la MJO se considera presente en todas las estaciones, aunque con una amplitud débil en el verano boreal, la BSISO tiende a prevalecer durante el verano boreal, con influencias sobre monzones, ciclones tropicales y otros aspectos del ciclo del agua.

3. Influencia de la deforestación del Amazonas en el ciclo hidrológico de la Cuenca del Plata

La selva amazónica juega un papel activo en impulsar el transporte de humedad atmosférica y generar precipitación en América del Sur. Esta estrecha asociación entre la superficie terrestre y el ciclo del agua hacen de la Amazonía un potencial foco de cambios abruptos. Se proyecta que tanto la deforestación como el secado aumentarán para 2100, lo que resultará, en el peor de los casos, de hasta un 50% de pérdida de cobertura forestal para 2050. La deforestación en la Amazonía también aumenta la probabilidad de incendios catastróficos. La combinación de deforestación, condiciones más secas y aumento de incendios puede llevar al ecosistema de la selva tropical a un punto de inflexión, más allá del cual hay una rápida degradación de la superficie de la tierra, una fuerte reducción en el reciclaje de la humedad atmosférica, un aumento en la fracción de precipitación que se escurre, y un nuevo cambio hacia un clima más seco. Una caída rápida de las precipitaciones tiene un impacto directo en los caudales de los ríos, provocando cambios a escala de cuenca de un estado regulado a uno no regulado. Los experimentos de modelos climáticos regionales confirman que el aumento de la deforestación conduce a un clima más seco, aunque no todos los modelos muestran un verdadero punto de inflexión, al menos en las condiciones climáticas actuales.

En este tema un sistema de circulación regional importante es el llamado *monzón sudamericano* (SAmerM). Se caracteriza por la afluencia de vientos de bajo nivel desde el Océano Atlántico hacia Sudamérica, involucrando a Brasil, Perú, Bolivia y el norte de Argentina, asociado con el desarrollo de gradientes de presión en superficie (y precipitación intensa) durante el verano austral (diciembre-enero-febrero). En base a la intensidad de la precipitación climatológica, la región del SAmerM está delimitada aproximadamente por 5°-25°S y 70°-50°W.

Durante la primavera austral (septiembre-octubre-noviembre), las áreas de convección intensa migran desde el noroeste de América del Sur hacia el sur formando la *Zona de Convergencia del Atlántico Sur* (SACZ) durante el verano austral. Asociado con este régimen, se forma un anticiclón de la troposfera superior (el Alta Boliviana) sobre la región del Altiplano durante el inicio del monzón. El establecimiento de este anticiclón de nivel superior se ha relacionado con la transición de los vientos del sur a los del norte y la ocurrencia de un fuerte calentamiento convectivo sobre el Amazonas. El SAmerM luego se retira durante el otoño austral (marzo-abril-mayo) con una migración hacia el noreste de la convección.

Un factor de peso en este régimen es el transporte de humedad desde las regiones amazónicas hacia la Cuenca del Río de la Plata por medio de la llamada *Corriente en Chorro de Capas Bajas Sudamericana* (SALLJ – South American Low Level Jet). Puede definirse como un máximo de la velocidad del viento que ocurre en los niveles bajos de la troposfera y se caracteriza por la presencia de una corriente del norte al este de los Andes centrada en la zona cercana a Santa Cruz de la Sierra, Bolivia (17°S-63°W) que alcanza su máxima intensidad durante los meses de Diciembre y Enero. Desempeña un papel importante en el transporte de humedad desde latitudes tropicales a extra-tropicales, favoreciendo el desarrollo de convección profunda organizada (por ejemplo, los sistemas convectivos de mesoescala) en su región de salida sobre el sudeste de Sudamérica. La región de salida del chorro en capas bajas tiene una región asociada de convergencia del flujo de humedad sobre el sudeste de Sudamérica, donde se observan fuertes precipitaciones, ráfagas, granizo, rayos y tornados, relacionados con la ocurrencia de estos sistemas convectivos de mesoescala.

El Amazonas es la cuenca fluvial más grande del mundo y contiene entre el 15 y 20% del agua dulce del mundo. Un estudio publicado en 2010 por la Universidad Tecnológica de Delft, en Holanda, afirma que la cuenca del Río de la Plata depende de la selva amazónica para el 70% de sus recursos hídricos. El aire caliente en la atmósfera tiene una gran capacidad para contener mucho vapor de agua y es la fuente para la precipitación. Se ha visto que el transporte de humedad desde el Amazonas, a través del chorro en capas bajas, es fundamental para la alimentación de los fenómenos convectivos intensos que ocurren en la cuenca del Plata. Aunque el pantanal, con su gran humedal, pueda contribuir al aporte de humedad, la fuente amazónica por lejos la supera. Es así que compartimos la preocupación existente respecto la deforestación sistemática de la selva amazónica, por las potenciales consecuencias negativas que pueda acarrear sobre el balance hídrico en nuestras zonas. Ver también video INCAGRO sobre “*Procesos meteorológicos y la Cuenca del Río de la Plata*”, <https://incagro.org.ar/capacitacion/video/147/procesos-meteorologicos-y-la-cuenca-del-rio-de-la-plata/>.

Nota: Los textos de estos apéndices son, en su mayoría, versiones en castellano de algunos párrafos de la versión preliminar, sin editar, del Sexto Informe del Grupo de Trabajo I del IPCC, agosto 2021.