



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de Balances Hídricos de Corto Plazo en la Cuenca del Río Cauca: Una Aproximación al Funcionamiento del Almacenamiento del Agua en el Suelo

Anexos

Harol Alexander Cetre Orejuela

Universidad Nacional de Colombia

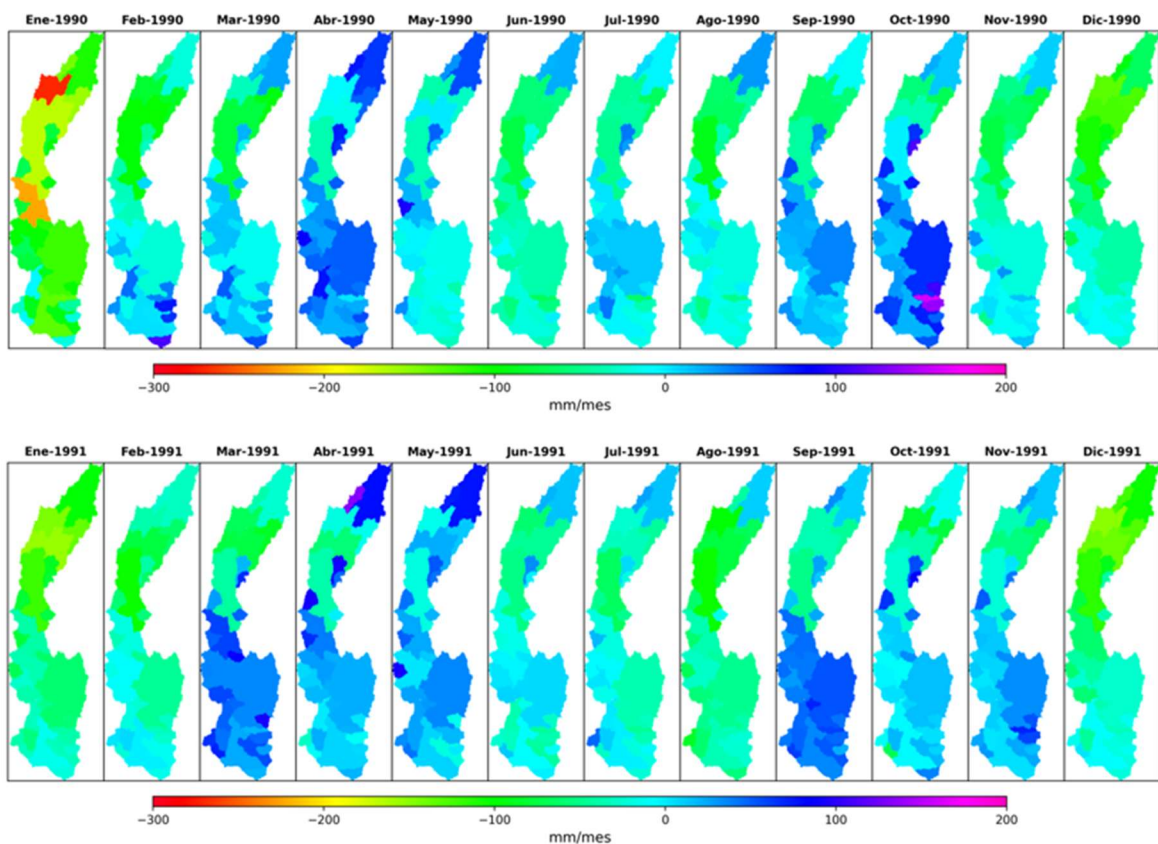
Facultad de Minas

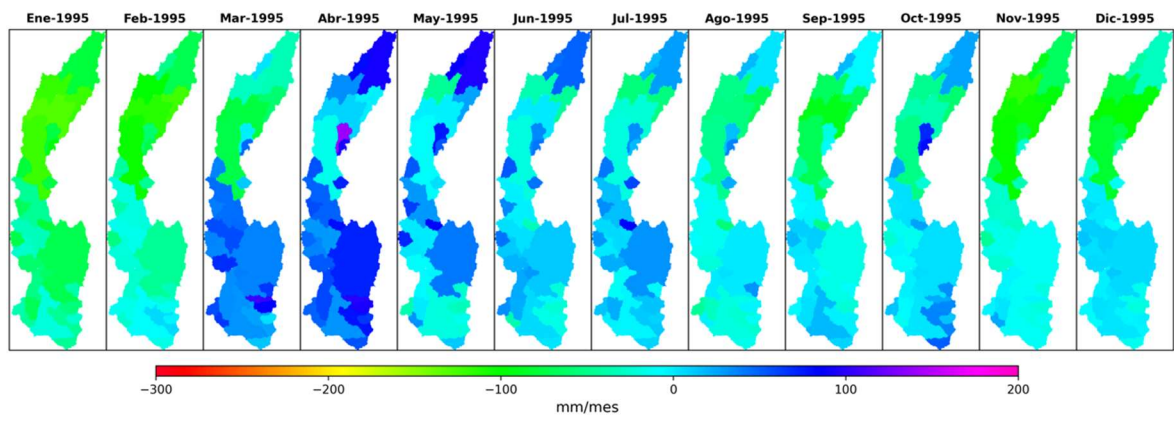
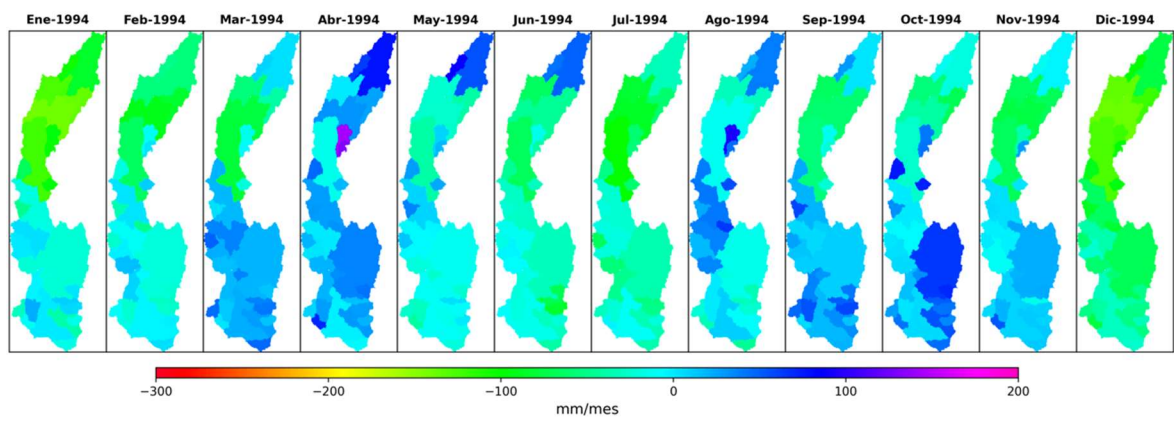
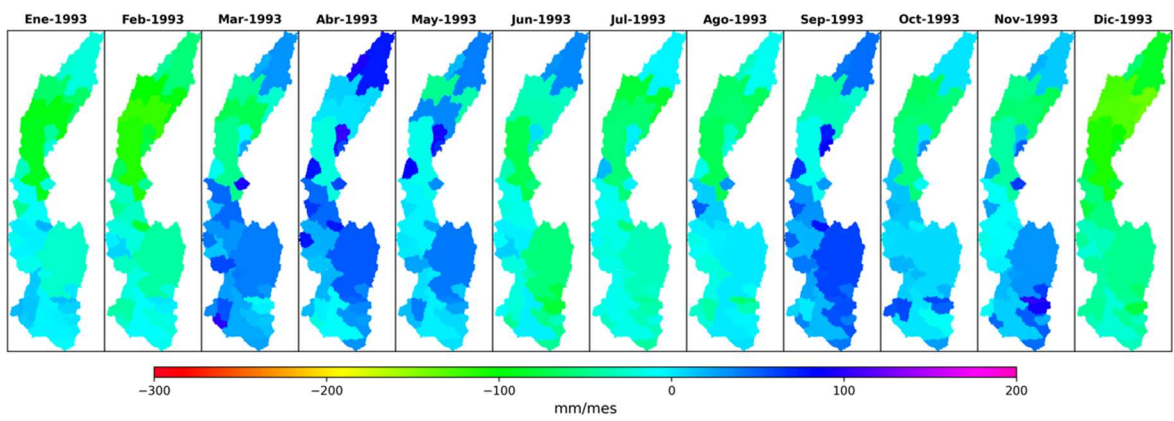
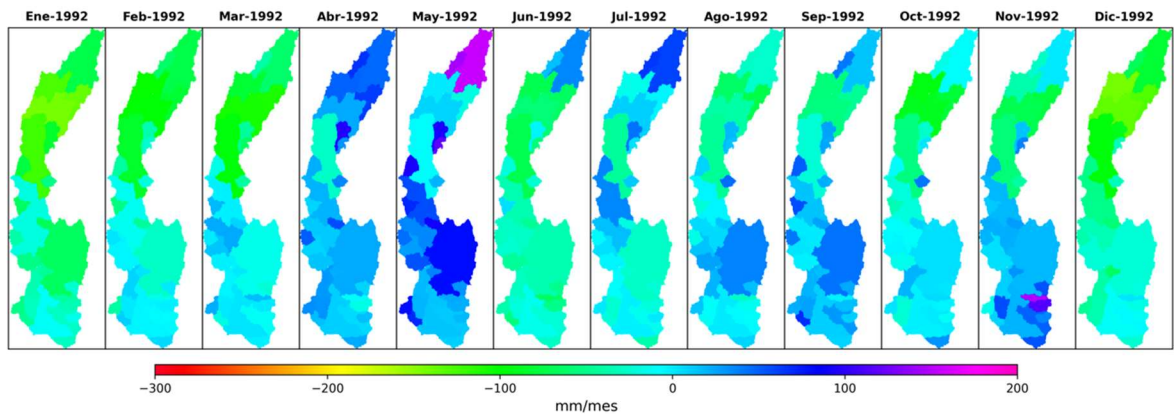
Medellín, Colombia

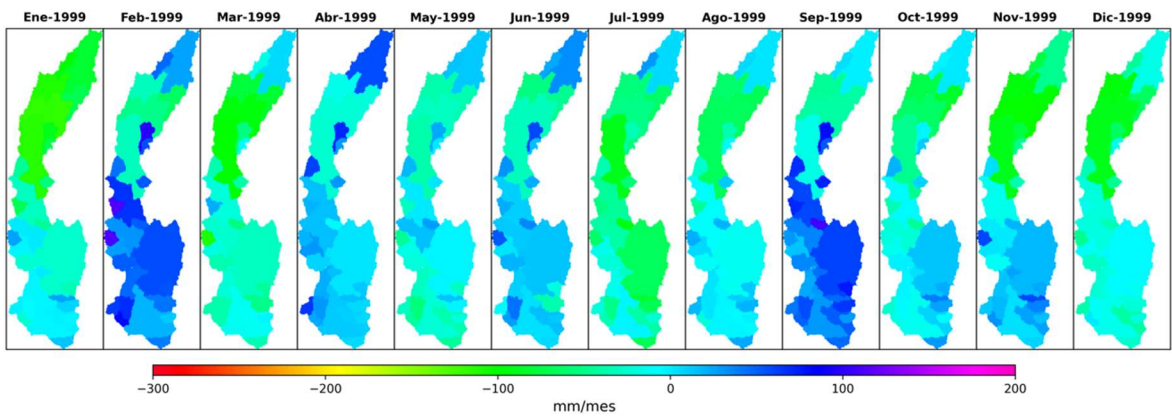
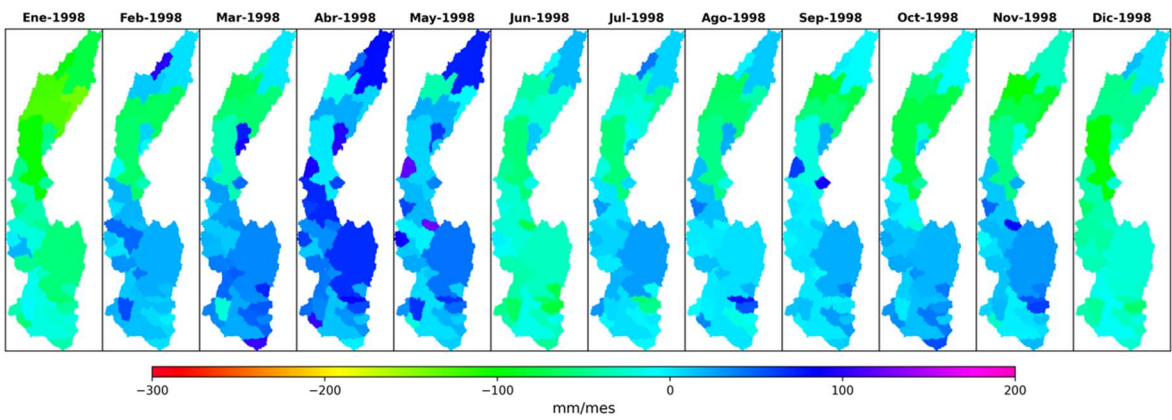
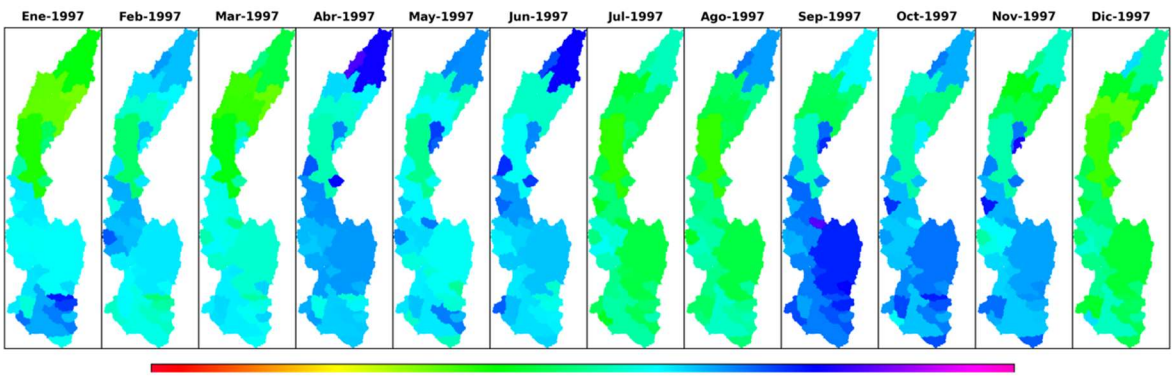
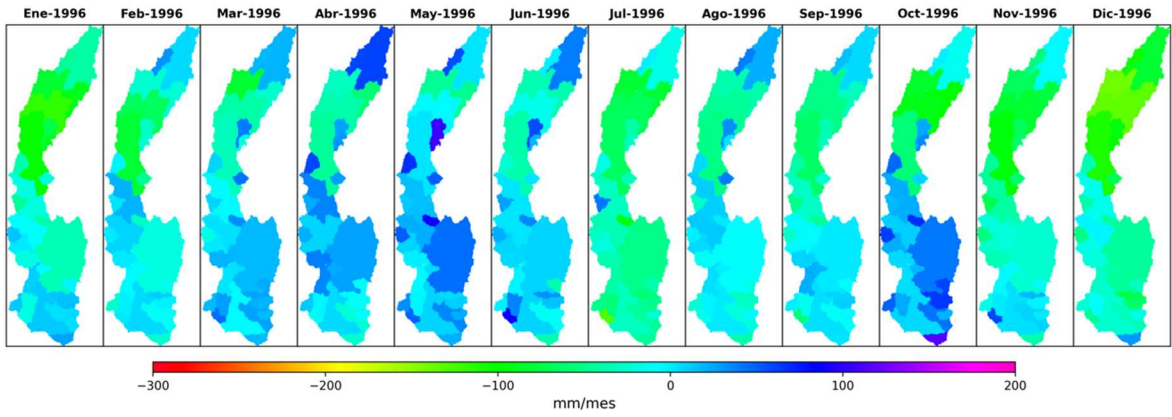
2024

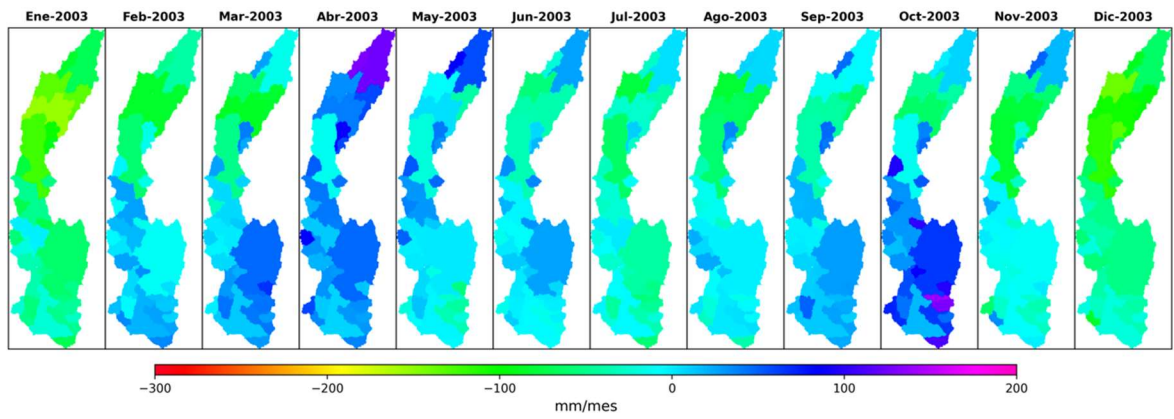
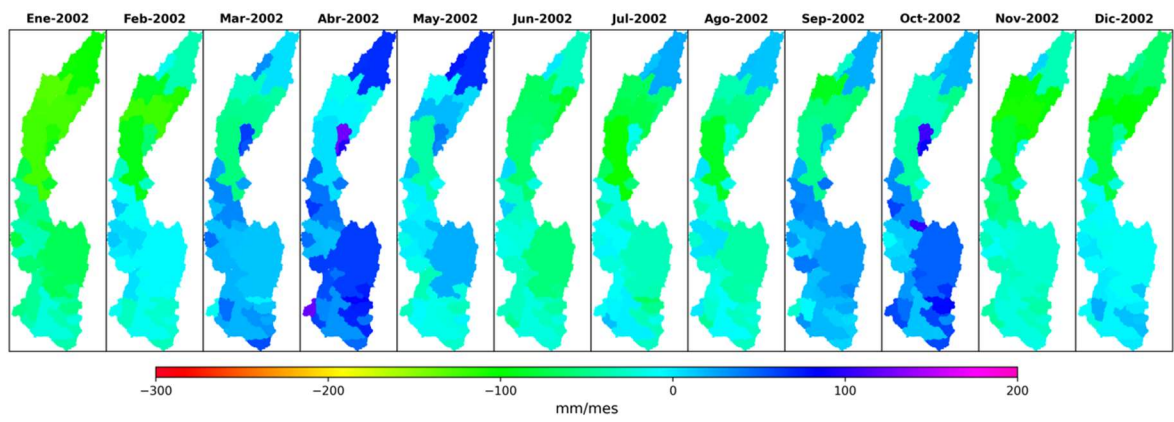
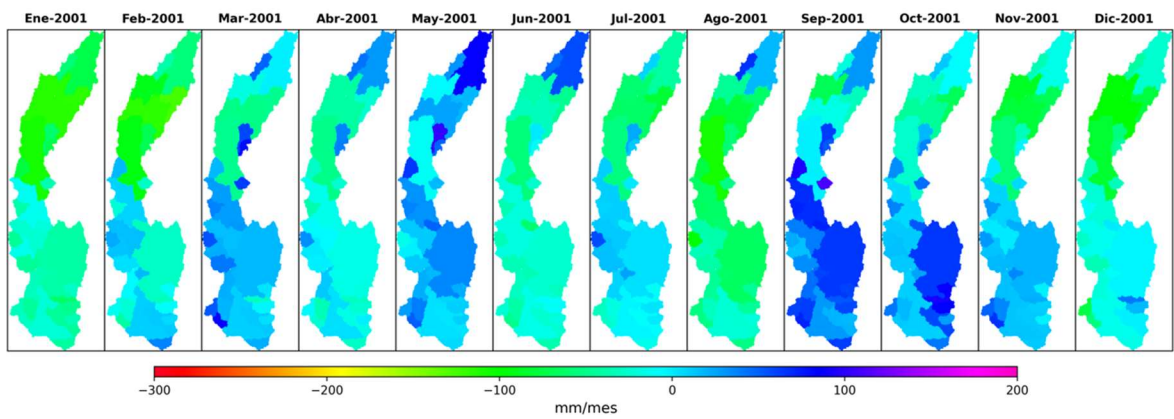
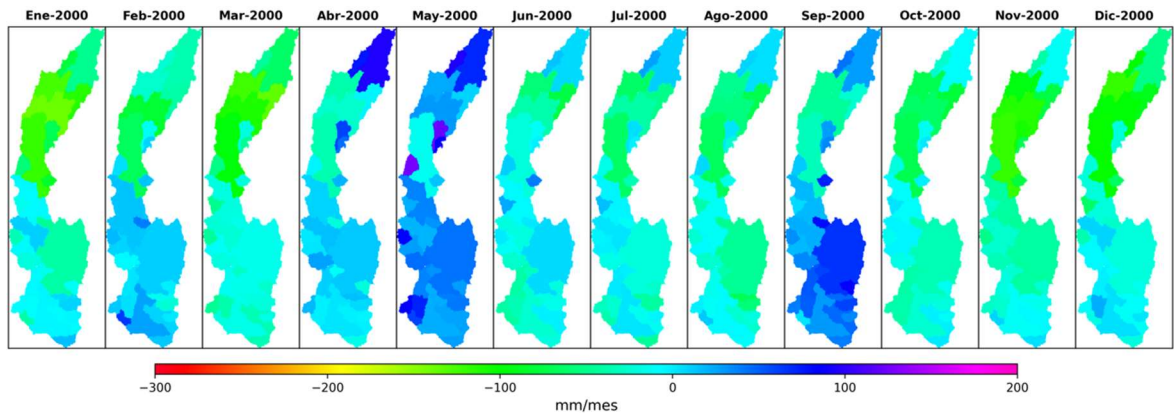
A. Anexo: Variabilidad espacial del AAS a escala mensual para todas las cuencas de la zona de estudio

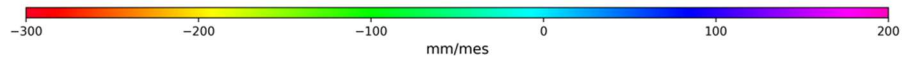
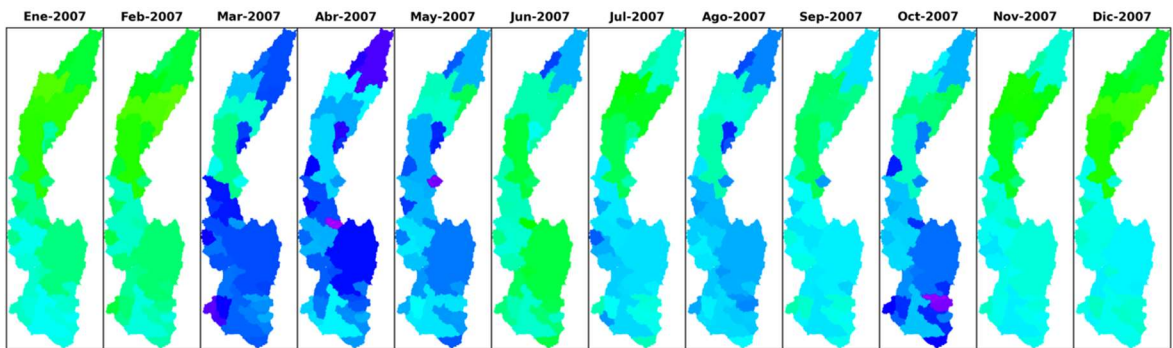
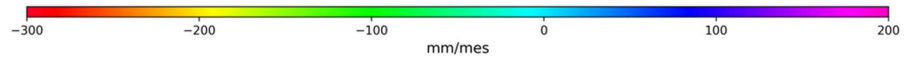
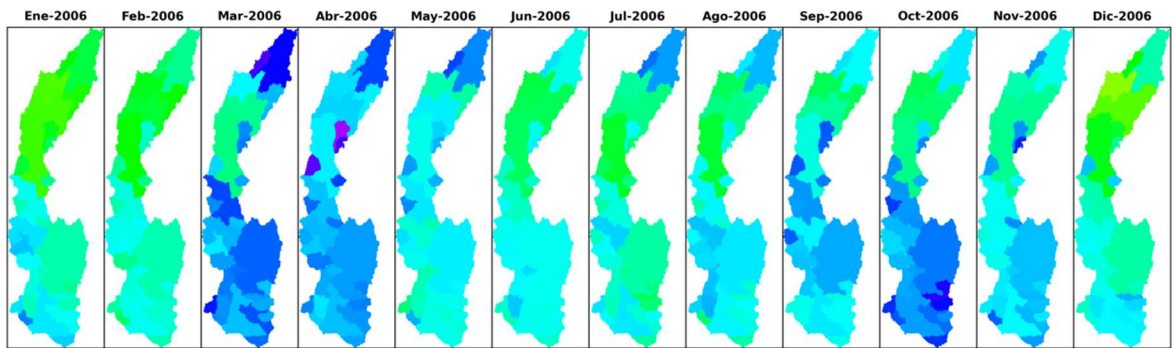
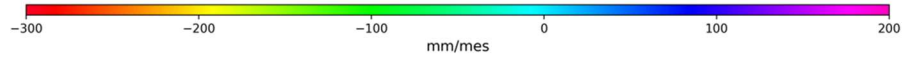
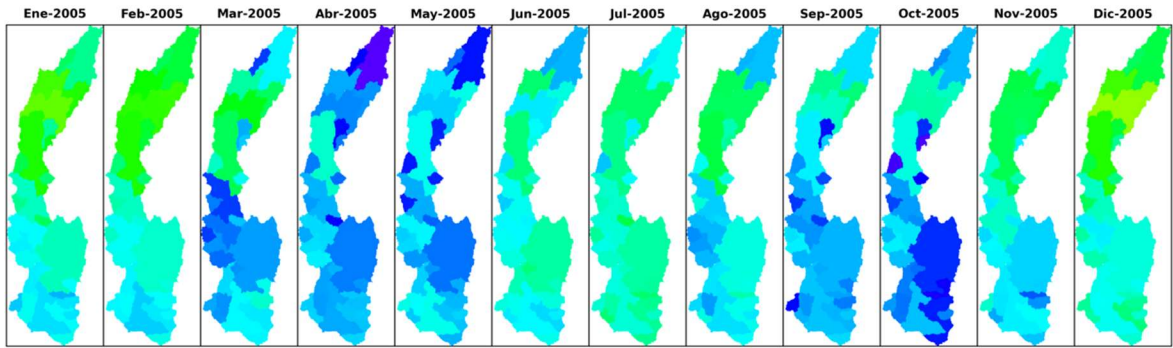
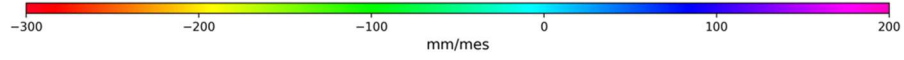
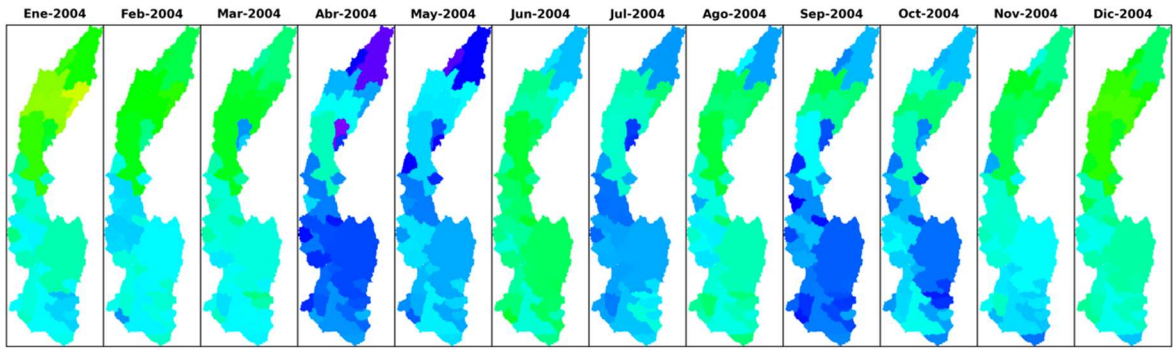
Se presenta la variabilidad espacial del almacenamiento de agua en el suelo –AAS- en la zona de estudio. Los mapas tienen periodicidad mensual y abarcan el periodo comprendido entre los meses de enero de 1990 y diciembre de 2009.

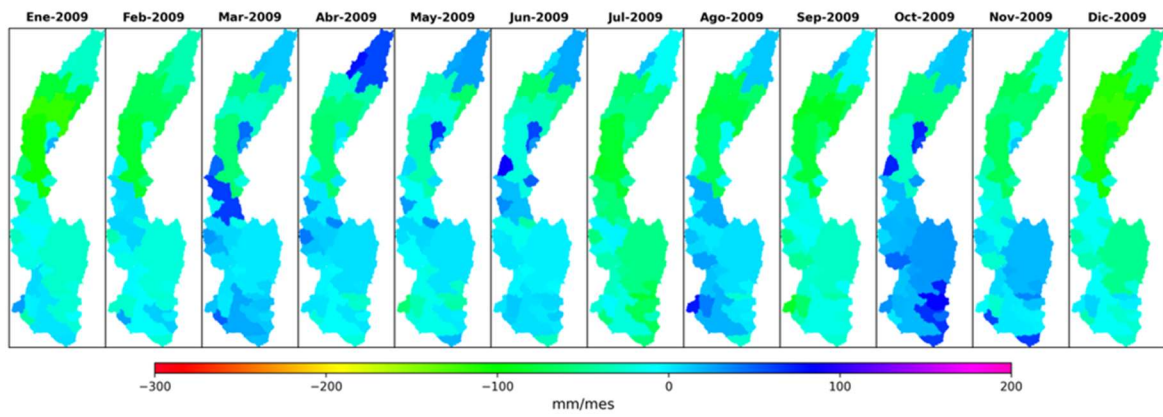
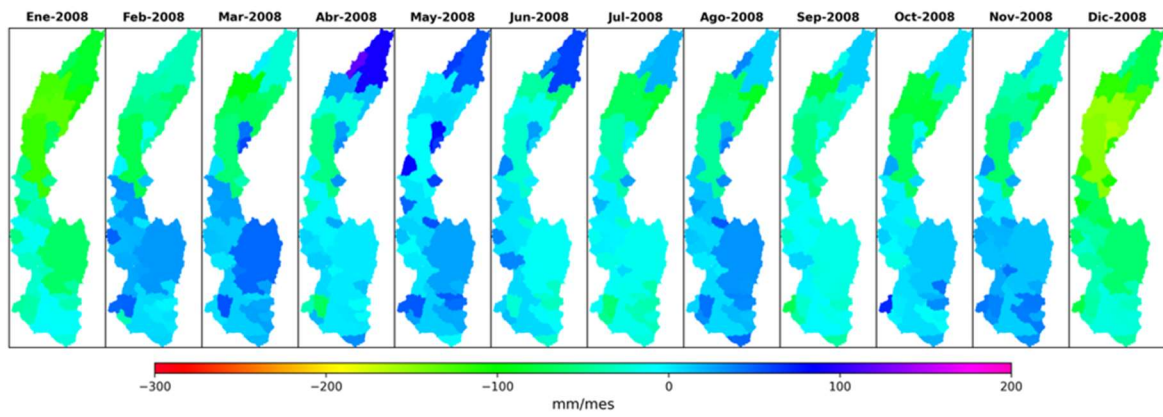












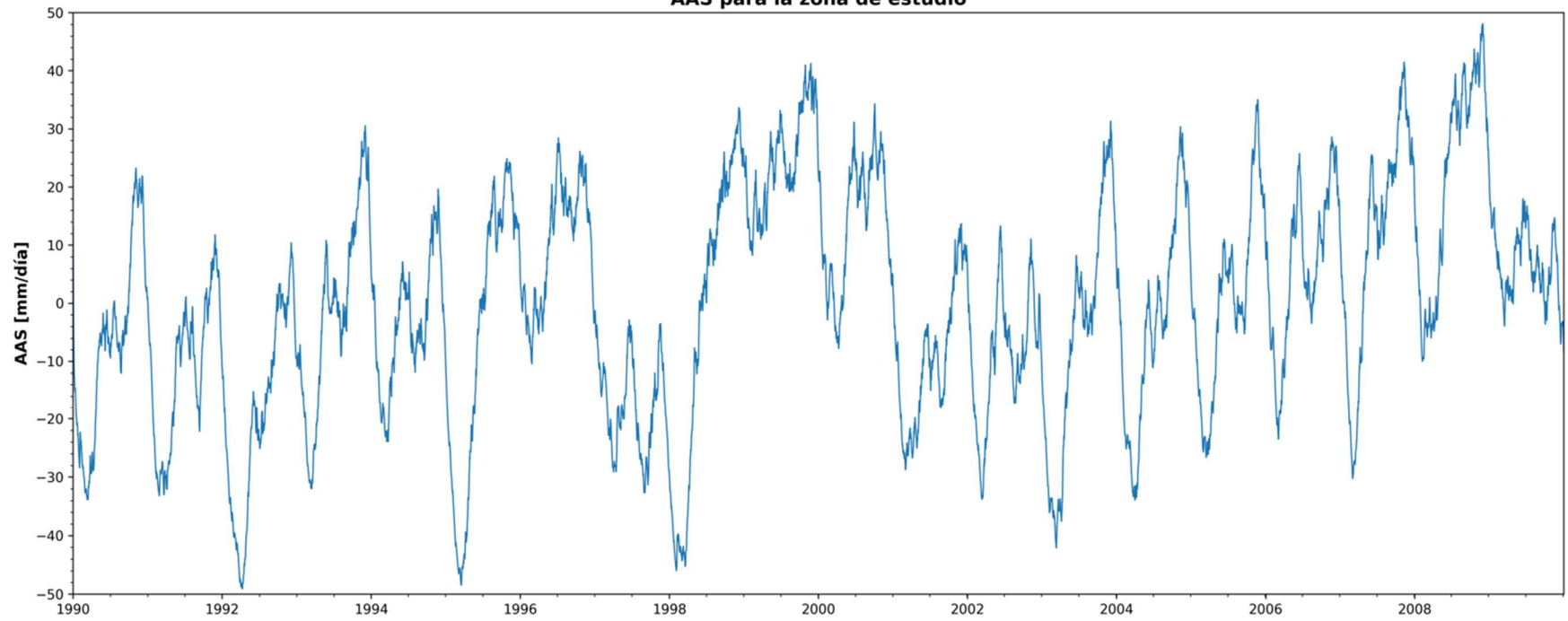
B. Anexo: Variabilidad temporal del AAS a escala diaria agregado para la zona de estudio y en las cuencas

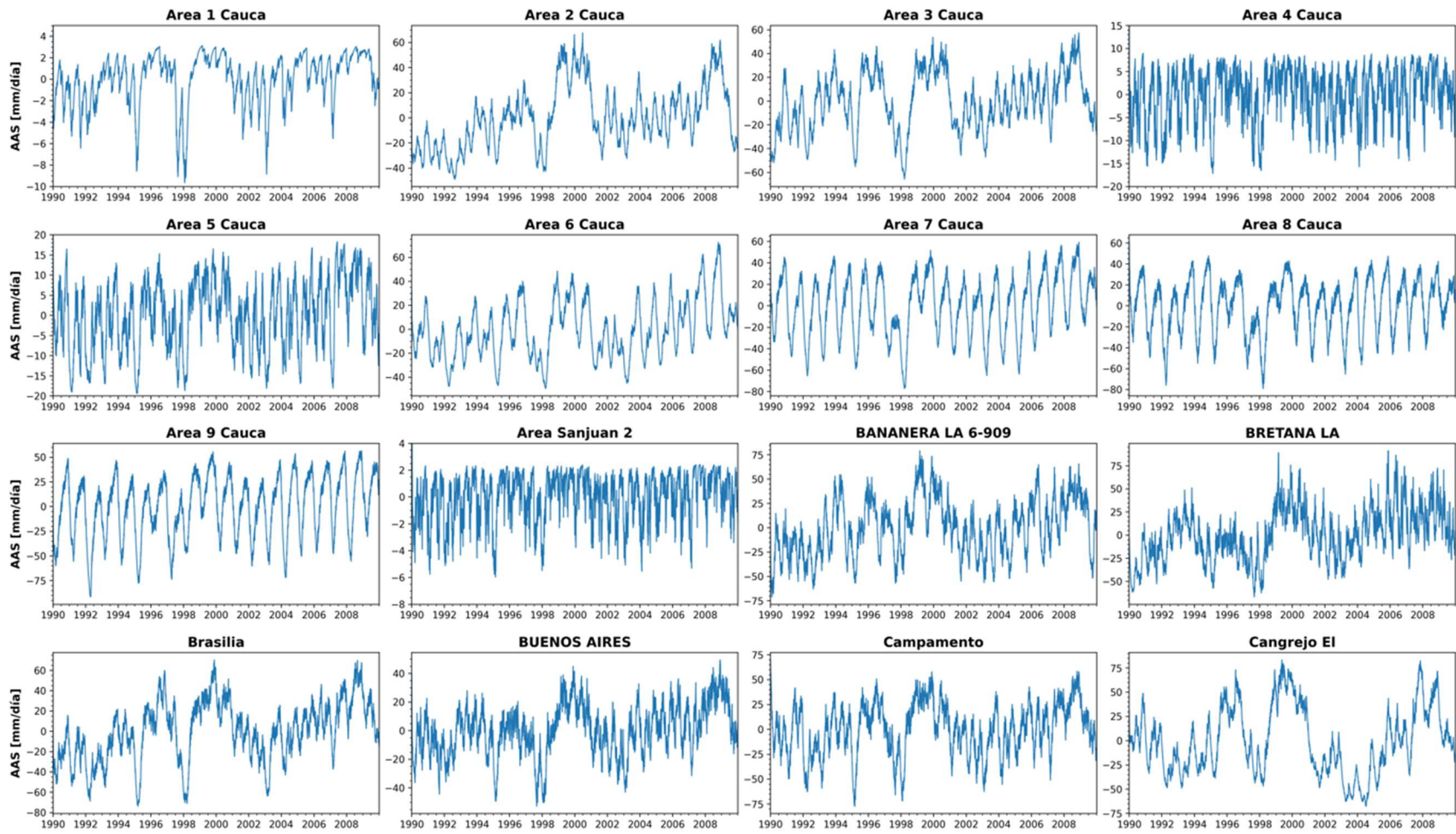
Se presenta la variabilidad temporal con resolución diaria del AAS tanto para la zona de estudio como para las 32 cuencas que la conforman. Las series abarcan el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 2009.

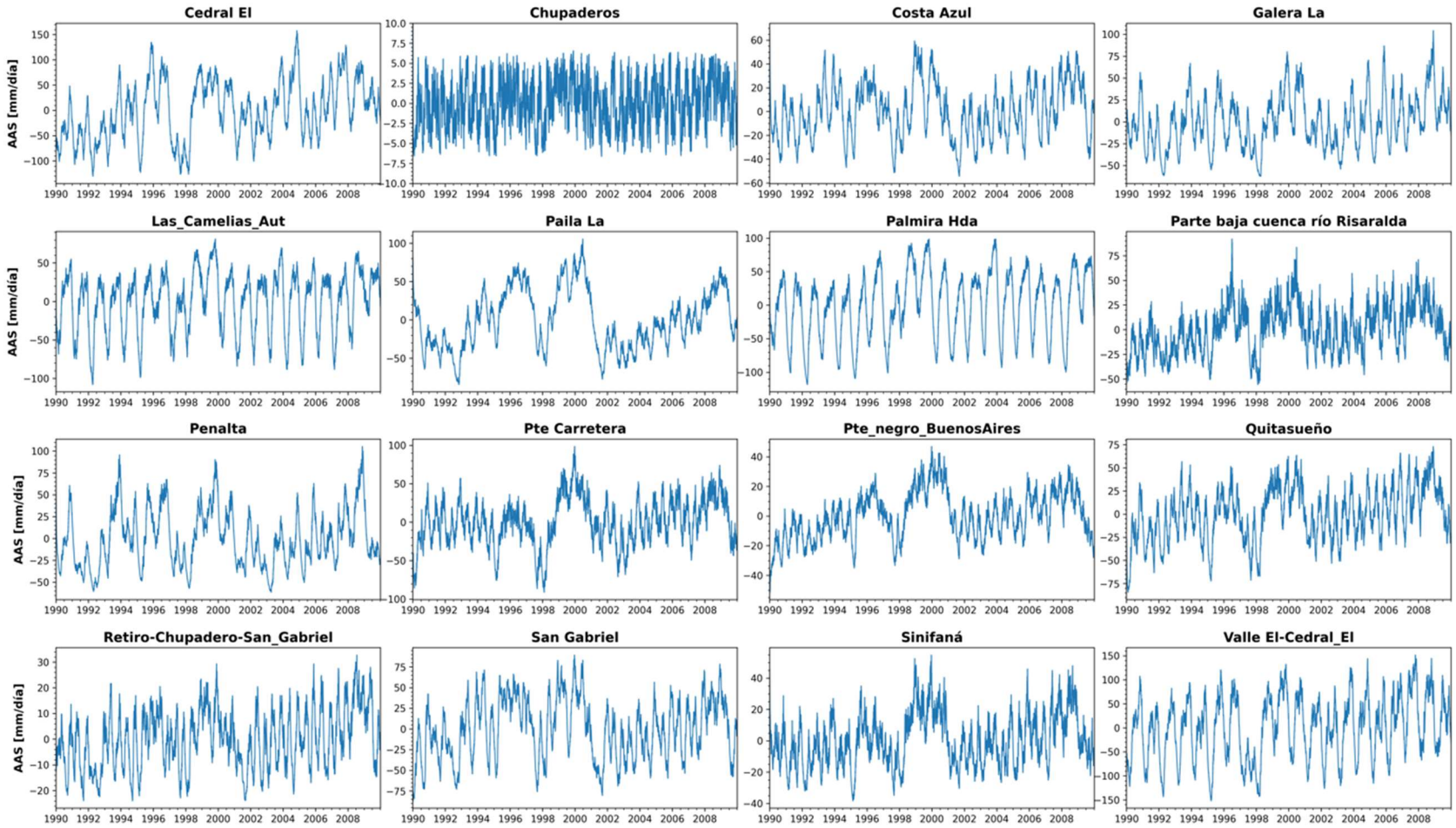
Las series de tiempo que permiten describir la variabilidad del AAS en las 32 cuencas de la zona de estudio son el resultado de integrar el agua de los almacenamientos subsuperficial (T3) y subterráneo (T4) del modelo hidrológico agregado –MHA- implementado en cada cuenca.

En el caso de la serie de AAS para toda la zona de estudio, es el resultado de agregar las series de AAS de las 32 cuencas.

AAS para la zona de estudio



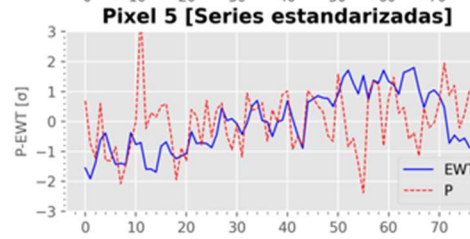
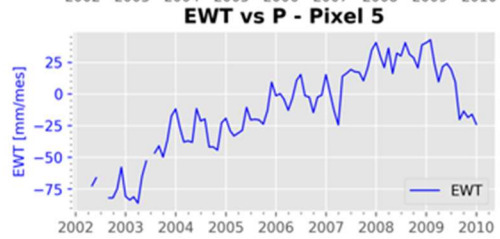
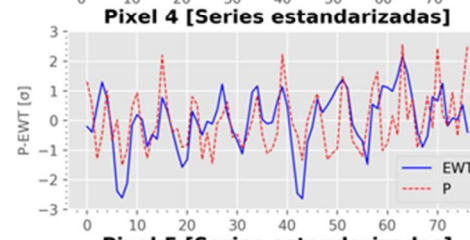
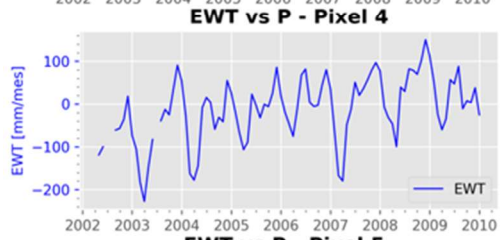
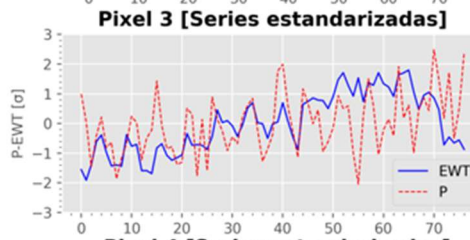
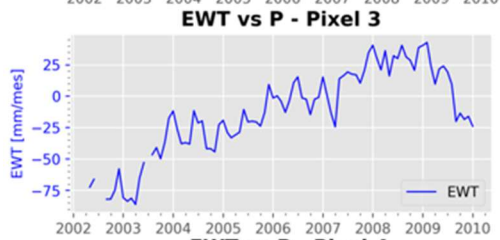
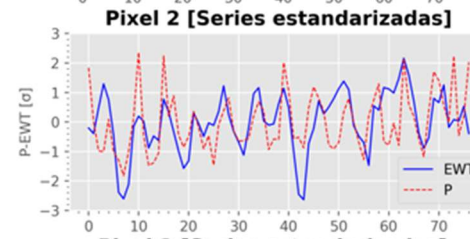
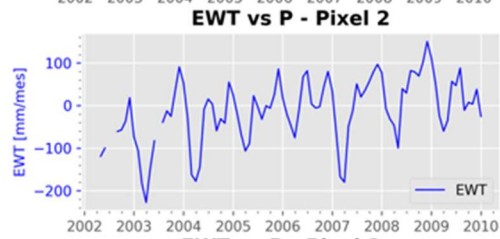
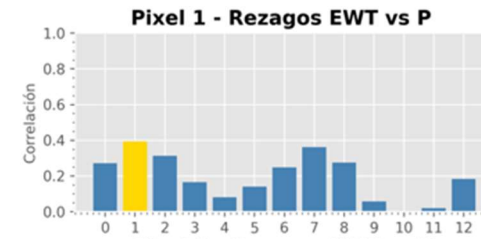
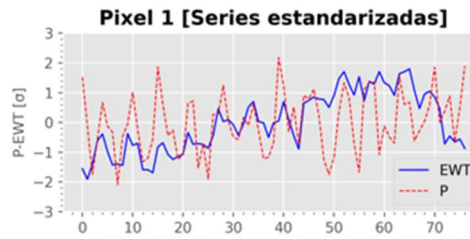
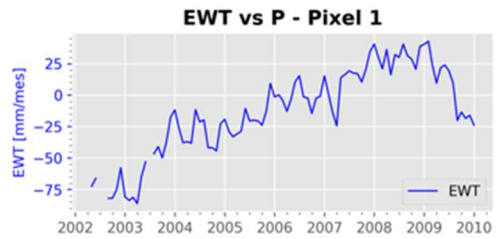


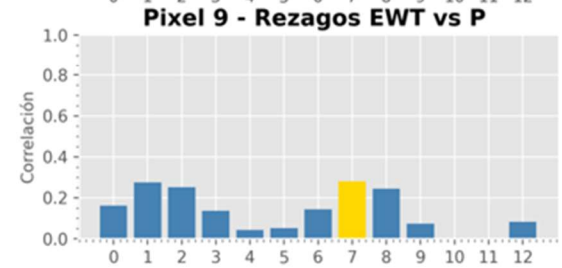
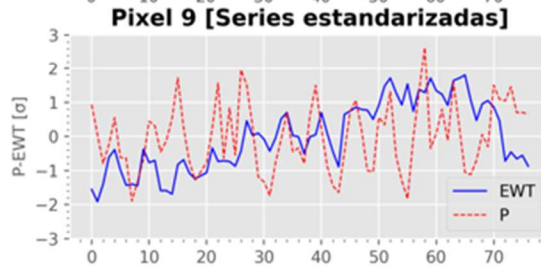
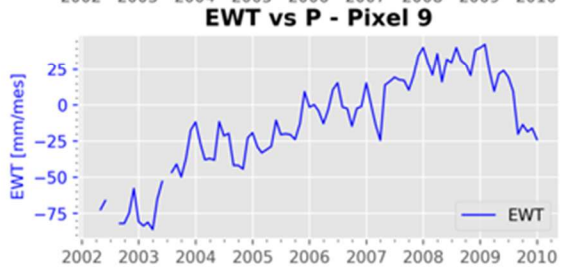
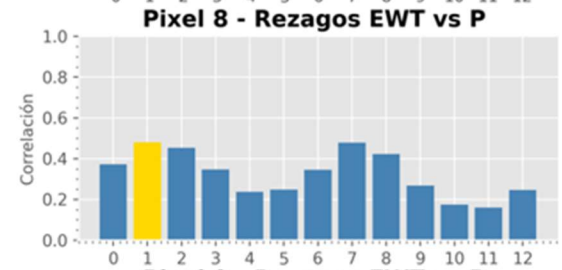
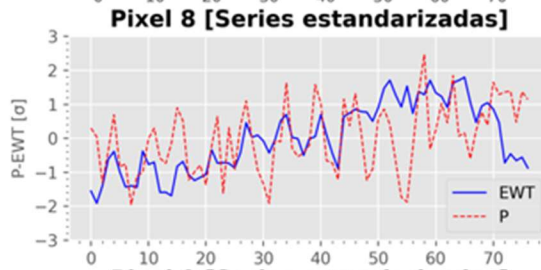
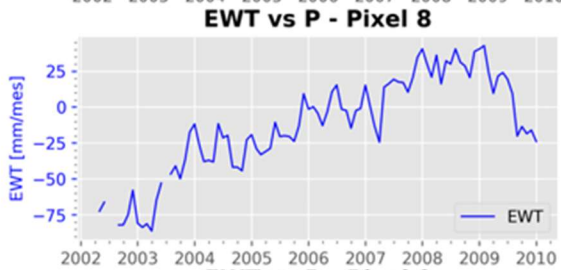
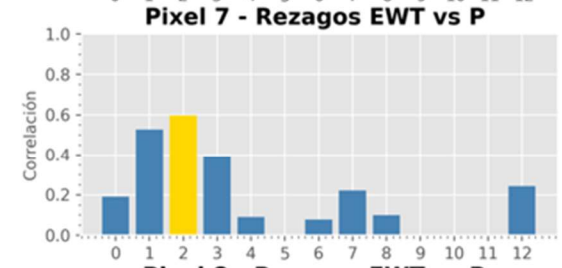
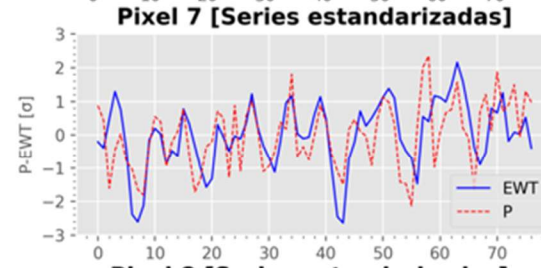
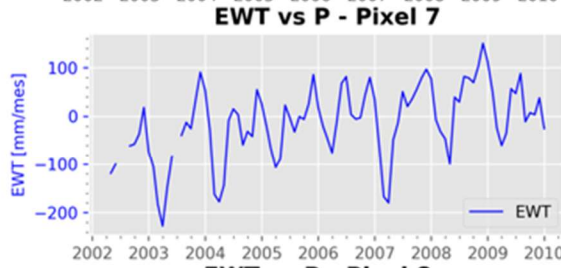
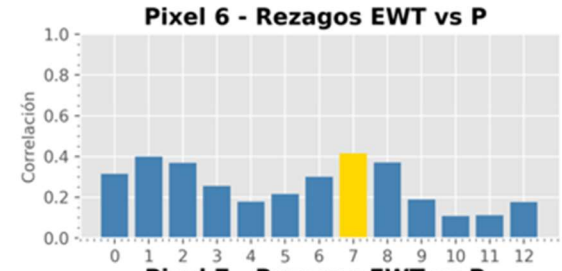
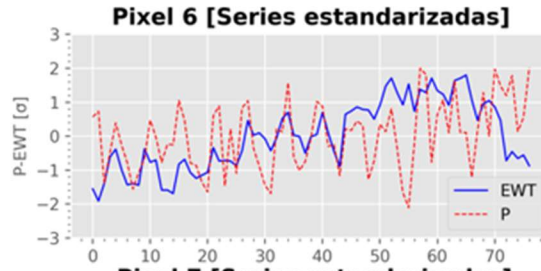
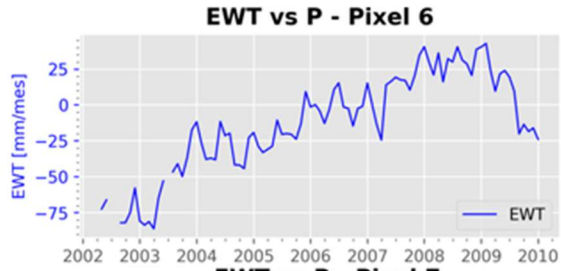


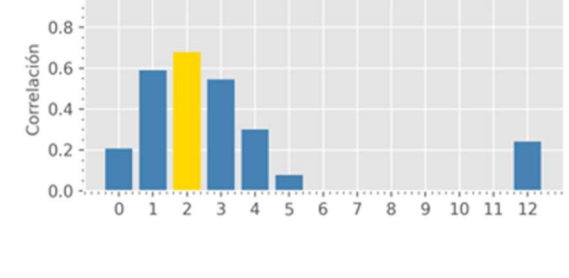
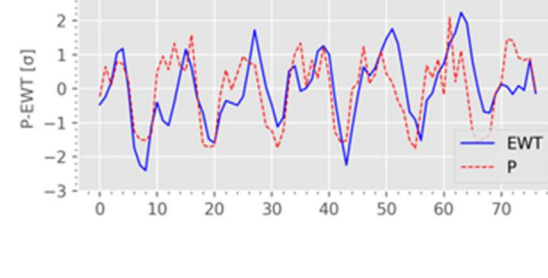
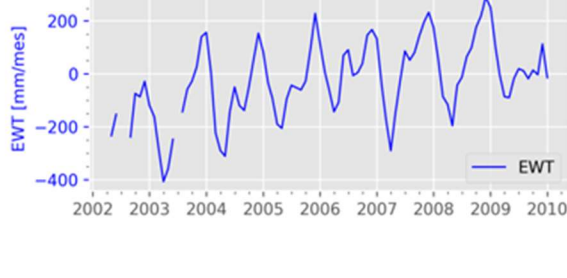
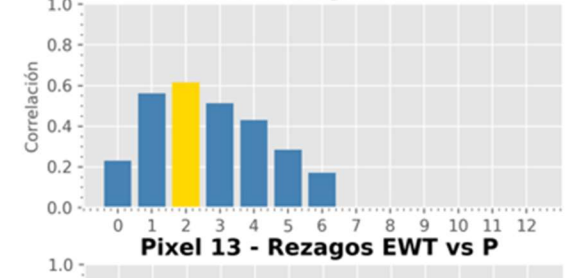
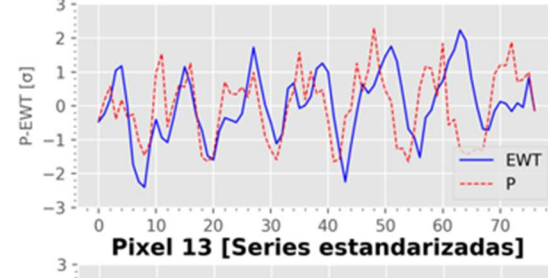
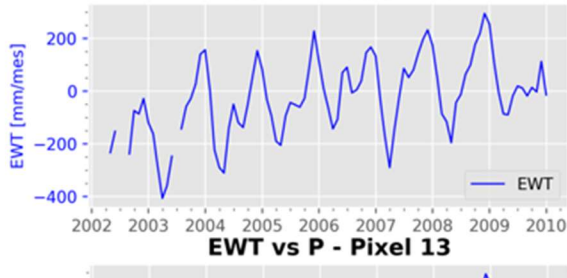
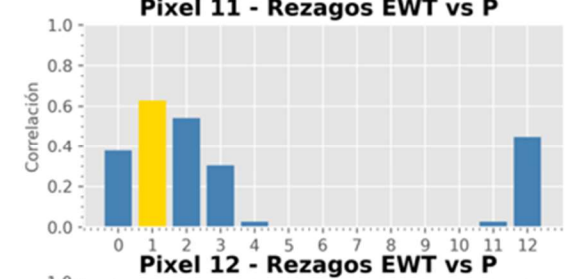
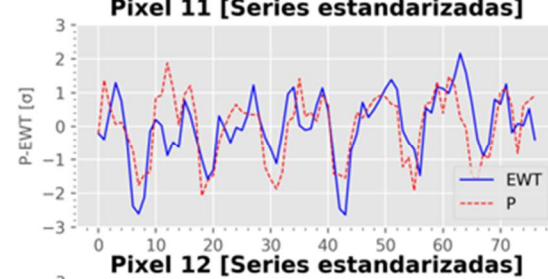
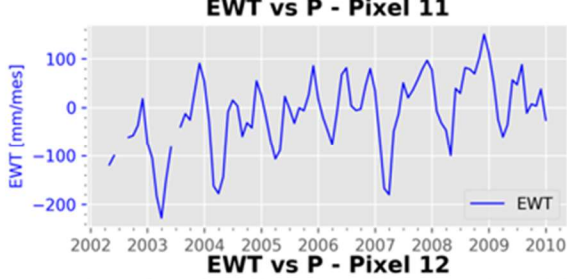
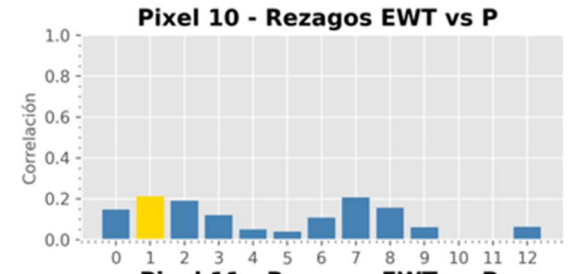
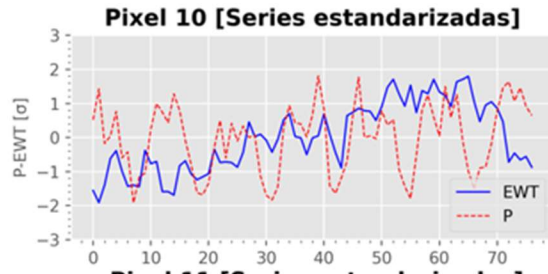
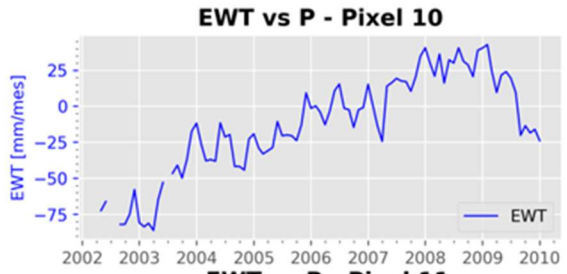
C. Anexo: Variabilidad del EWT y su relación con la precipitación mensual

Este anexo presenta la variabilidad mensual del espesor equivalente de agua en el suelo (EWT por sus siglas en inglés) observado por GRACE en los 13 píxeles empleados en la tesis, en contraste con la precipitación mensual registrada en las cuencas interceptadas por cada uno de los píxeles.

Las figuras también presentan el gráfico de barras con los diferentes niveles de correlación lineal entre la precipitación y el EWT para diferentes periodos de rezagos.







D. Variabilidad temporal del AAS en las 32 cuencas de la zona de estudio

En este anexo se presenta la variabilidad temporal del AAS en todas las cuencas de la zona de estudio. Las figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 presentan gráficos con la variabilidad mensual del AAS y su relación con la precipitación mensual, cada figura resume la variabilidad para cuatro cuencas, en donde para cada cuenca se presentan los gráficos A, B, C y D.

El gráfico (A) muestra la variabilidad mensual del AAS para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009, la zona azul del gráfico permite identificar los periodos en los cuales el AAS es positivo (recarga), mientras que el polígono rojo indica almacenamiento negativo (descarga). La connotación de AAS positivo y negativo hace referencia a la fluctuación de esta variable respecto al valor promedio de la serie, permitiendo así identificar los periodos en los cuales la corriente recibe aporte de caudal desde el AAS y los periodos en los cuales el balance de agua en la cuenca genera incrementos del almacenamiento.

El gráfico (B) compara la variabilidad del AAS y la precipitación a escala mensual para el periodo comprendido entre enero de 1990 y diciembre de 2009. En el eje izquierdo del gráfico se presenta el rango en el cual varía el AAS mientras que en el eje derecho el rango en el cual varía la precipitación. Este gráfico permite determinar de manera visual si el patrón de variabilidad del AAS se acopla con la variabilidad de la lluvia, e incluso la distinción de desfase temporal entre las series. El gráfico (B) analizado en conjunto con el gráfico (D) permite obtener para cada cuenca la respuesta del AAS frente al estímulo de la precipitación.

El gráfico (C) muestra el ciclo anual del AAS construido a partir de las series diarias del Anexo B, y, en un análisis conjunto con el gráfico (A) permite determinar en términos promedio los periodos en los que ocurre un aporte de agua desde el suelo hacia la corriente y los periodos en donde la recarga de agua en los almacenamientos subsuperficial y subterráneo es mayor que la escorrentía subsuperficial y subterránea.

Por su parte el gráfico (D) presenta el nivel de correlación entre el AAS y la precipitación, a partir del cálculo de coeficiente de correlación lineal para las series comparadas luego de generar rezagos de tiempo entre 0 y 12 meses, lo anterior con el objetivo de determinar el tiempo en el cual se genera la respuesta del AAS al estímulo de la precipitación. En este

gráfico las barras indican el valor de la correlación entre las series para un periodo de rezago determinado, en donde la barra de color amarillo indica el periodo para el cual se ha obtenido la mayor correlación positiva, y con ello, el tiempo promedio que lo toma al AAS responder a la precipitación.

Vale la pena mencionar que, el coeficiente de correlación lineal que indican las barras amarillas varía entre 0,48 (cuenca Paila La) y 0,86 (cuenca Las Camelias Aut). También es importante mencionar que en el caso de las cuencas en donde la correlación más alta ocurre para las series con rezago de cero meses, no significa que la variabilidad del AAS ocurre de manera inmediata con la precipitación, sino que el periodo de respuesta es inferior a los 30 días, como es el caso de las cuencas Área 4 Cauca, Área Sanjuán 2 y Chupaderos en donde la respuesta promedio del AAS ante la precipitación ocurre entre 7 y 10 días.

En la Figura 1 se muestran los gráficos con variabilidad mensual y ciclo anual de las cuencas Área 1 Cauca, Área 2 Cauca, Área 3 Cauca y Área 4 Cauca. En la cuenca Área 1 Cauca el AAS mensual fluctúa entre los -8,5 mm/mes y 3,1 mm/mes, con un ciclo anual de dos periodos de almacenamiento negativos y dos periodos de almacenamiento positivo. La cuenca Área 1 Cauca presenta almacenamiento promedio negativo en los meses de enero, febrero, marzo, agosto y septiembre. Lo anterior indicando que en dichos meses parte del caudal del río Cauca es provisto por el AAS.

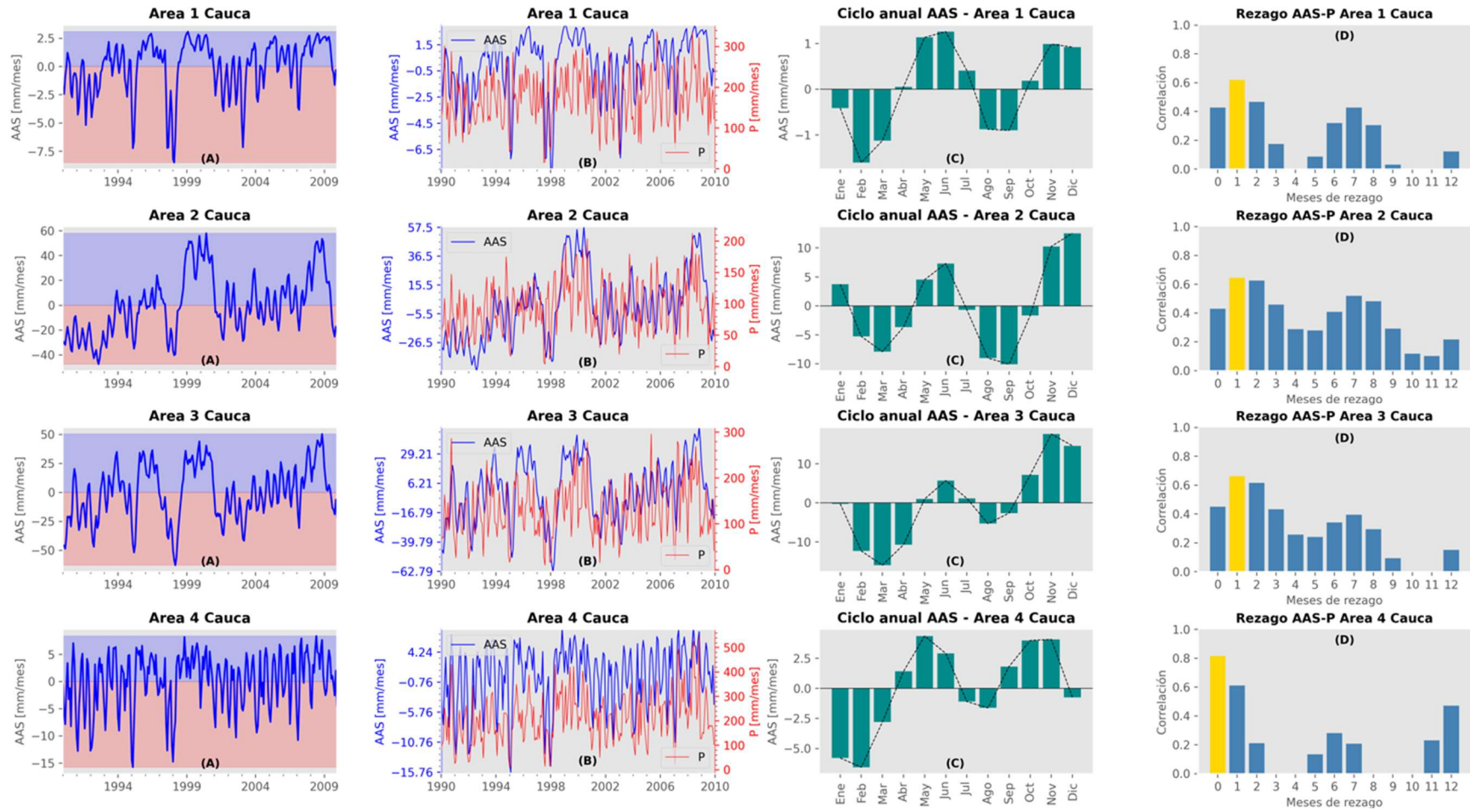
Esta cuenca se encuentra la región sur de la zona de estudio en donde los meses con menor precipitación son diciembre, enero, febrero, julio y agosto. En el gráfico D de la Figura 1 para la cuenca Área 1 Cauca es posible determinar que el AAS en la cuenca varía en función de la lluvia con 1 mes de rezago, lo que explica el desplazamiento del trimestre de almacenamientos negativos respecto al trimestre DEF seco en la cuenca.

En la cuenca Área 2 Cauca el AAS varía entre -47,5 mm/mes y 58,1 mm/mes siguiendo el patrón mensual de la lluvia con un rezago aproximado de 1 mes. Al igual que la cuenca anterior, Área 2 Cauca también se ubica en la región sur de la zona de estudio y presenta almacenamiento promedio negativo en los meses de enero, febrero, marzo, agosto y septiembre, indicando que durante dichos meses el AAS aporta flujo al río Cauca. Lo contrario ocurre en los meses de mayo y junio donde el almacenamiento se recarga debido a la lluvia de los meses de abril y mayo, y la recarga en los meses de noviembre y diciembre por las lluvias del trimestre SON.

En la cuenca Área 3 Cauca el AAS varía entre -62,7 mm/mes y 50,4 mm/mes siguiendo el patrón de variabilidad de la precipitación mensual con rezago de 1 mes. Durante el trimestre FMA la cuenca tiene un AAS promedio de -13 mm/mes, mientras que en el trimestre OND tiene almacenamiento promedio de 13,1 mm/mes. El agotamiento del AAS durante el trimestre FMA se produce por el desbalance entre la descarga de agua desde el suelo al río Cauca y la recarga del AAS. El caso contrario ocurre en el trimestre OND, donde el exceso de humedad hace que el AAS se recargue con tasas mayores que las de la descarga.

En la cuenca Área 4 Cauca el AAS varía entre -15,8 mm/mes y 8,5 mm/mes siguiendo el patrón de variabilidad de la precipitación mensual con rezago aproximado de 10 días. Debido a la rápida respuesta del AAS respecto a la lluvia, en el trimestre DEF (periodo más seco) el AAS se agota, mientras que en los trimestres AMJ y SON el almacenamiento refleja un superávit mostrando una transición fuerte entre los periodos secos y húmedos.

Figura 1 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 1 Cauca, Área 2 Cauca, Área 3 Cauca y Área 4 Cauca.



La Figura 2 presenta los gráficos con la variabilidad mensual y ciclo anual de las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Área 7 Cauca y Área 8 Cauca. En la cuenca Área 5 Cauca el AAS varía entre -18,6 mm/mes y 16,1 mm/mes, en la cuenca Área 6 Cauca el AAS varía entre -47,8 mm/mes y 67,7 mm/mes, en la cuenca Área 7 Cauca el AAS varía entre -74,5 mm/mes y 52,2 mm/mes, y en la cuenca Área 8 Cauca el AAS varía entre -72,7 mm/mes y 43,2 mm/mes.

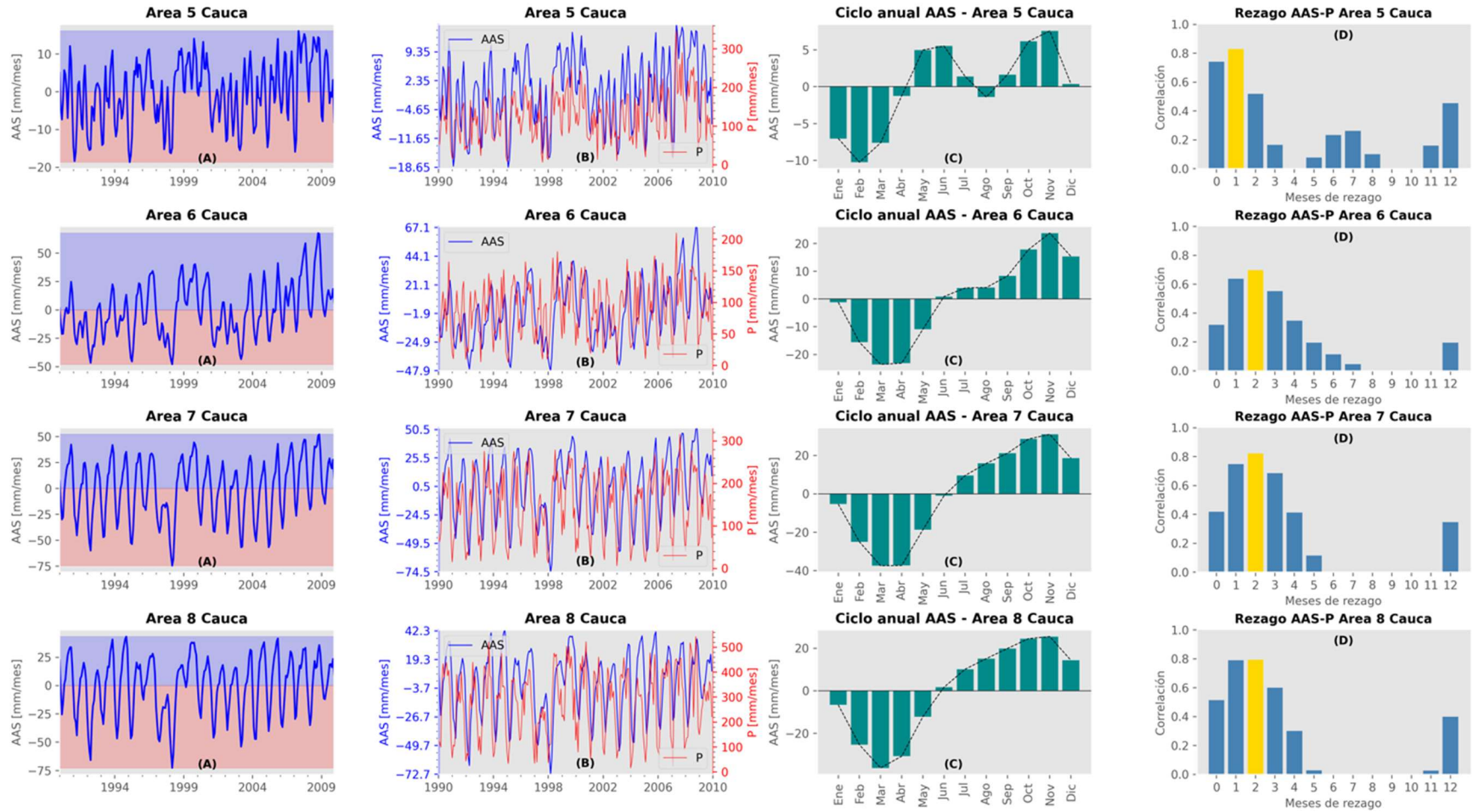
Las series de AAS presentadas en la figura muestran un patrón de variación similar al de la precipitación, con meses de recarga y descarga. En la cuenca Área 5 Cauca la variabilidad del AAS muestra rezago de un mes respecto a la ocurrencia de la lluvia, mientras que en las cuencas Área 6 Cauca, Área 7 Cauca y Área 8 Cauca el AAS tiene rezago de dos meses. Es importante mencionar el cambio gradual en el patrón de variación que se presenta entre las cuencas Área 6 Cauca y Área 8 Cauca, se pasa de una variabilidad media anual con presencia de dos periodos de almacenamiento negativo a una variabilidad anual en la que se marca un periodo con almacenamiento negativo y un periodo con valores positivos.

Este cambio en la variabilidad anual es explicado por la variación en el patrón de la precipitación en función de la posición latitudinal de las cuencas. La precipitación en la zona de estudio incrementa de sur a norte, pasando de un patrón bimodal en el costado sur a un patrón unimodal en la región del Bajo Cauca; lo anterior y el rezago entre las series de AAS y la precipitación explican la forma en la que varía el AAS en las cuencas.

En la cuenca Área 5 Cauca el trimestre EFM tiene un AAS promedio de -8,3 mm/mes, producto de la baja precipitación que ocurre en el trimestre DEF. En los meses de mayo y junio se presenta el primer periodo de AAS positivos debido al ingreso de agua en el suelo en los meses abril y mayo (los más húmedos en la cuenca). Durante el trimestre JAS el AAS muestra poca variabilidad y esto obedece a que el trimestre JJA representa la transición del primer trimestre húmedo al segundo, sin embargo, el trimestre JJA tiene precipitación media mayor que la del trimestre DEF y menor que los meses de abril y mayo, por lo que no se produce un agotamiento o recarga considerable del almacenamiento en relación con los primeros meses del año.

Durante los meses de octubre y noviembre ocurre la mayor recarga del AAS debido al exceso de humedad en los meses septiembre y octubre, exceso que genera valores positivos de AAS en diciembre a pesar de que este mes es uno de los más secos en la cuenca. El ciclo anual del AAS en las cuencas Área 6 Cauca, Área 7 Cauca y Área 8 Cauca, muestra que el AAS tiene valores negativos entre enero y abril, indicando que en dichos meses se genera el mayor aporte de agua desde el suelo hacia el río Cauca, siendo marzo el mes en el que se presenta el mayor agotamiento de los niveles en el almacenamiento. El caso contrario ocurre en los meses julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (especialmente en noviembre), en donde, debido al exceso de humedad en las cuencas se genera un desbalance en el ingreso de agua al suelo.

Figura 2 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Área 7 Cauca y Área 8 Cauca.



La Figura 3 presenta gráficos con la variabilidad mensual, ciclo anual y gráficos de rezagos entre las series de precipitación y AAS para las cuencas Área 9 Cauca, Área Sanjuán 2, Bananera La 6-909 y Bretana La. En la cuenca Área 9 Cauca el almacenamiento varía entre -88,7 mm/mes y 52,7 mm/mes, en la cuenca Área Sanjuán 2 el AAS varía entre -5,1 mm/mes y 4,1 mm/mes, en la cuenca Bananera La, el AAS varía entre -60,9 mm/mes y 61,3 mm/mes y en la cuenca Bretana La el AAS varía entre -59,7 mm/mes y 69,9 mm/mes.

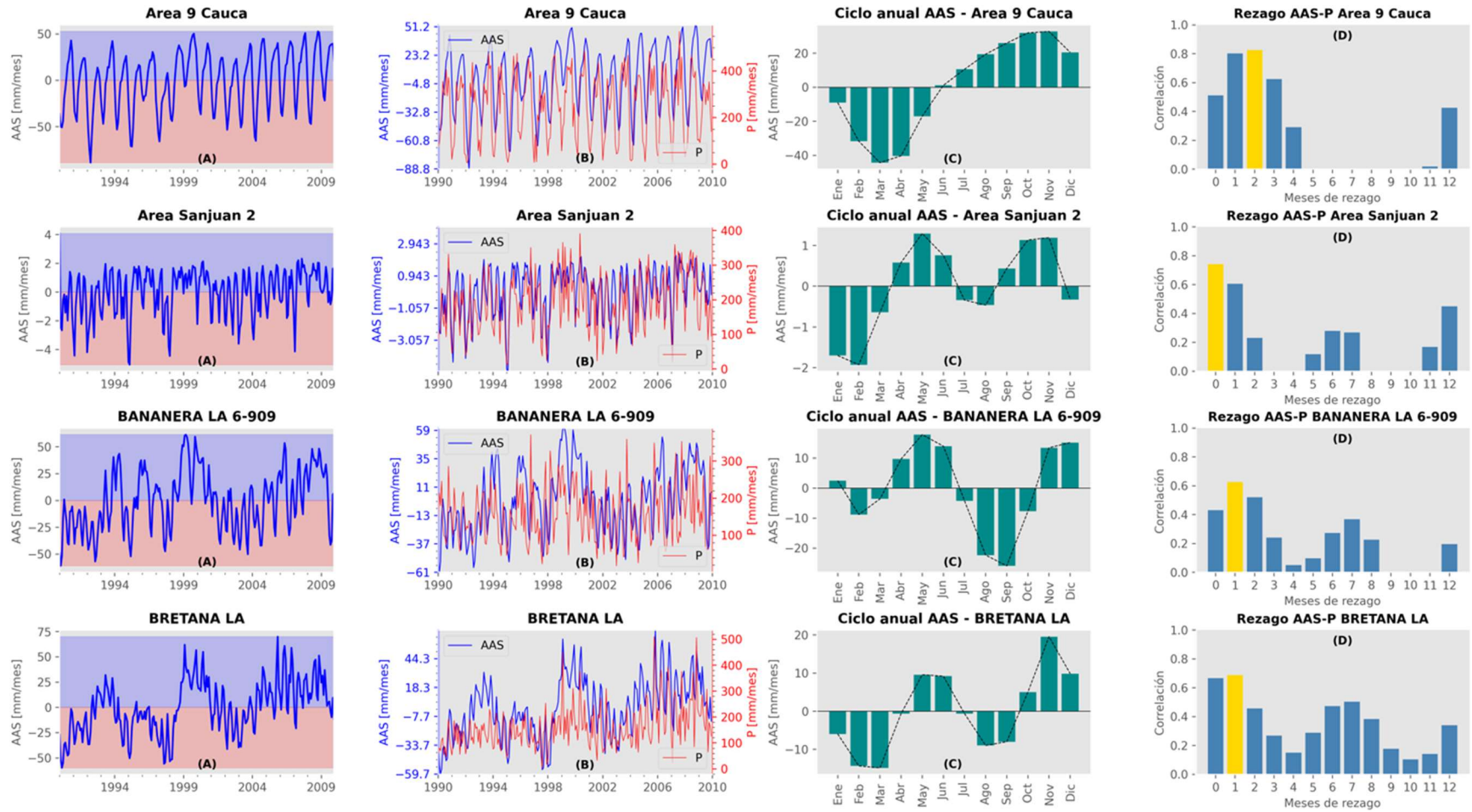
En la cuenca Área 9 Cauca el AAS muestra variabilidad similar a la precipitación mensual, con un patrón unimodal debido a su ubicación en la región del Bajo Cauca. En esta zona los meses con menor precipitación corresponden al trimestre DEF, lo cual, sumado al rezago de 2 meses en la respuesta del AAS ante el estímulo de la precipitación, explica que los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo muestren almacenamiento promedio negativo; en este periodo la cuenca realiza aporte de agua en forma de flujo base desde el acuífero al río Cauca. Entre los meses de julio y diciembre ocurren en la cuenca almacenamientos positivos debido a la humedad proveniente de la lluvia en el periodo comprendido entre los meses de mayo y octubre; el incremento significativo del AAS se ve reflejados a partir del mes de julio debido al rezago temporal.

En las cuencas Área Sanjuán 2, Bananera La 6-909 y Bretana La el AAS varía de manera similar a la precipitación con rezagos diferentes, en la cuenca Área Sanjuán 2 la variabilidad del AAS ocurre en promedio 10 días después de la ocurrencia de la lluvia, mientras que en las otras cuencas ocurre con rezago de 1 mes. La cuenca Área Sanjuán 2 muestra almacenamientos negativos en el trimestre EFM debido a la poca humedad que se presenta en dichos meses; en este periodo la salida de agua desde los almacenamientos subsuperficial y subterráneo mantienen el caudal de recesión de la red de drenaje y, por otro lado, la cantidad de agua que infiltra es inferior a la salida de los almacenamientos.

Durante los trimestres AMJ y SON el suelo aumenta su almacenamiento de agua debido al exceso de humedad en la cuenca que permite mantener el caudal de las corrientes y la recarga del AAS.

En la cuenca Bananera La 6-909 se presentan 2 periodos de AAS positivo y un periodo de AAS negativo. En el trimestre AMJ la cuenca muestra un almacenamiento promedio de 13,8 mm/mes, producto de las lluvias del trimestre MAM, mientras que en los meses de noviembre y diciembre el almacenamiento promedio de 14,2 mm/mes se asocia a la precipitación de los meses septiembre y octubre. Entre los meses junio y julio el almacenamiento promedio es de -24,1 mm/mes puesto que es el bimestre más seco de la cuenca. En la cuenca Bretana La el AAS presenta un comportamiento que puede ser semejable al de la cuenca Área Sanjuán 2, con la diferencia de que en los meses de abril y julio el almacenamiento no presenta cambios significativos.

Figura 3 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Área 9 Cauca, Área Sanjuan 2, Bananera La 6-909 y Bretana La.



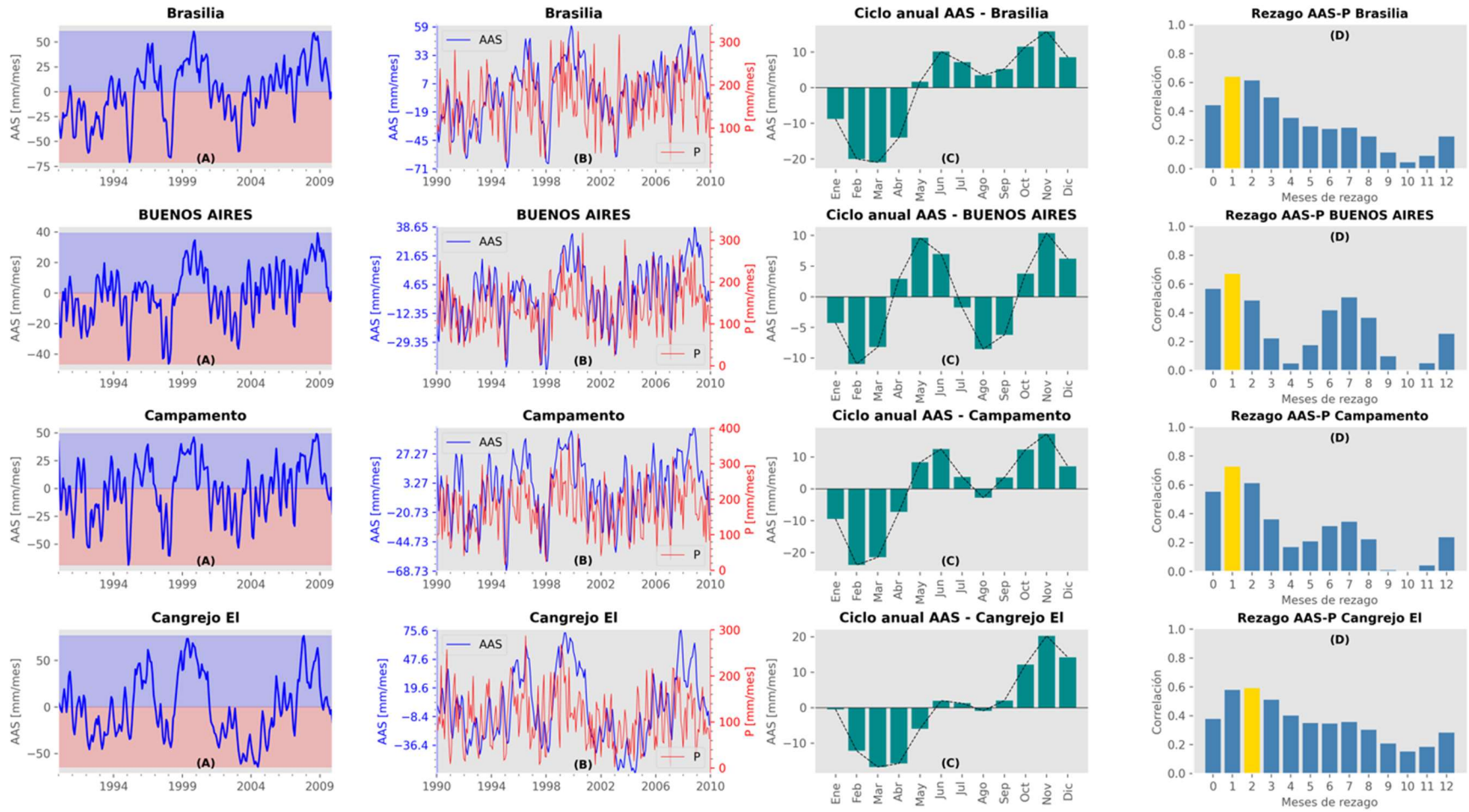
La Figura 4 presenta la variabilidad mensual y ciclo anual del AAS para las cuencas Brasilia, Buenos Aires, Campamento y Cangrejo El. La figura también muestra el nivel de correlación entre la serie de AAS y la precipitación mensual. En la cuenca Brasilia el AAS varía entre -70,9 mm/mes y 60,6 mm/mes, en la cuenca Buenos Aires varía entre -46,3 mm/mes y 39,3 mm/mes, en la cuenca Campamento varía entre -68,7 mm/mes y 49,2 mm/mes y en la cuenca Cangrejo El varía entre -64,4 mm/mes y 76,5 mm/mes.

Las cuencas Brasilia y Cangrejo se ubican en las subzonas 1 y 2, respectivamente, y muestran variabilidad del AAS similar al de la precipitación con rezago de 1 y 2 meses, respectivamente. Ambas cuencas tienen un periodo donde prima la recarga del AAS y otro donde la salida de agua desde el AAS es mayor que su recarga. En la cuenca Brasilia el AAS negativo ocurre entre los meses enero y abril, mientras que el periodo de AAS positivo ocurre entre los meses de junio y diciembre, siendo el mes de mayo una transición entre los periodos de descarga y recarga, y un mes en donde el AAS no sufre cambios significativos en comparación con meses como febrero, marzo, abril, octubre y noviembre. En la cuenca Cangrejo El el trimestre FMA tiene un AAS promedio de -14,9 mm/mes y el trimestre OND tiene un AAS promedio de 15,5 mm/mes.

La cuenca Buenos Aires muestra dos periodos de descarga y recarga en el AAS. En el trimestre EFM y en el bimestre agosto y septiembre, la cuenca tiene un AAS promedio de -7,8 mm/mes y -7,4 mm/mes, respectivamente. Por su parte, los trimestres AMJ y OND muestran un AAS promedio de 6,5 mm/mes y 6,8 mm/mes, respectivamente. En la cuenca Buenos Aires el AAS negativo en el trimestre EFM obedece a las bajas precipitaciones del trimestre DEF. El caso contrario ocurre en los trimestres AMJ y OND en los cuales se produce la recarga del AAS debido a la lluvia de los trimestres MAM y SON.

En la Cuenca Campamento el AAS tiene un periodo de valores negativos y 2 periodos de valores positivos. Entre enero y abril la cuenca tiene un AAS promedio de -15,5 mm/mes, en el trimestre MJJ un AAS promedio de 8,2 mm/mes y en el trimestre SON un promedio de 11,1 mm/mes. Durante el trimestre EFM el río San Juan debe parte de sus caudales de recesión al aporte de flujo desde el AAS, el cual muestra el mayor nivel de agotamiento en el mes de febrero. En los meses de junio y noviembre el AAS tiene los mayores niveles de recarga por las lluvias de los bimestres abril, mayo y septiembre octubre.

Figura 4 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Brasilia, Buenos Aires, Campamento y Cangrejo El.



La Figura 5 presenta la variabilidad mensual y ciclo anual del AAS de las cuencas Cedral El, Chupaderos, Costa Azul y Galera La; la figura también presenta el nivel de correlación entre la serie de AAS y la precipitación mensual. El AAS en la cuenca Cedral El varía entre -121,1 mm/mes y 144,3 mm/mes, en la cuenca Chupaderos varía entre -5,7 mm/mes y 4,9 mm/mes, en la cuenca Costa Azul varía entre -48,5 mm/mes y 52,5 mm/mes, y en la cuenca Galera La el AAS varía entre -60,8 mm/mes y 84,8 mm/mes.

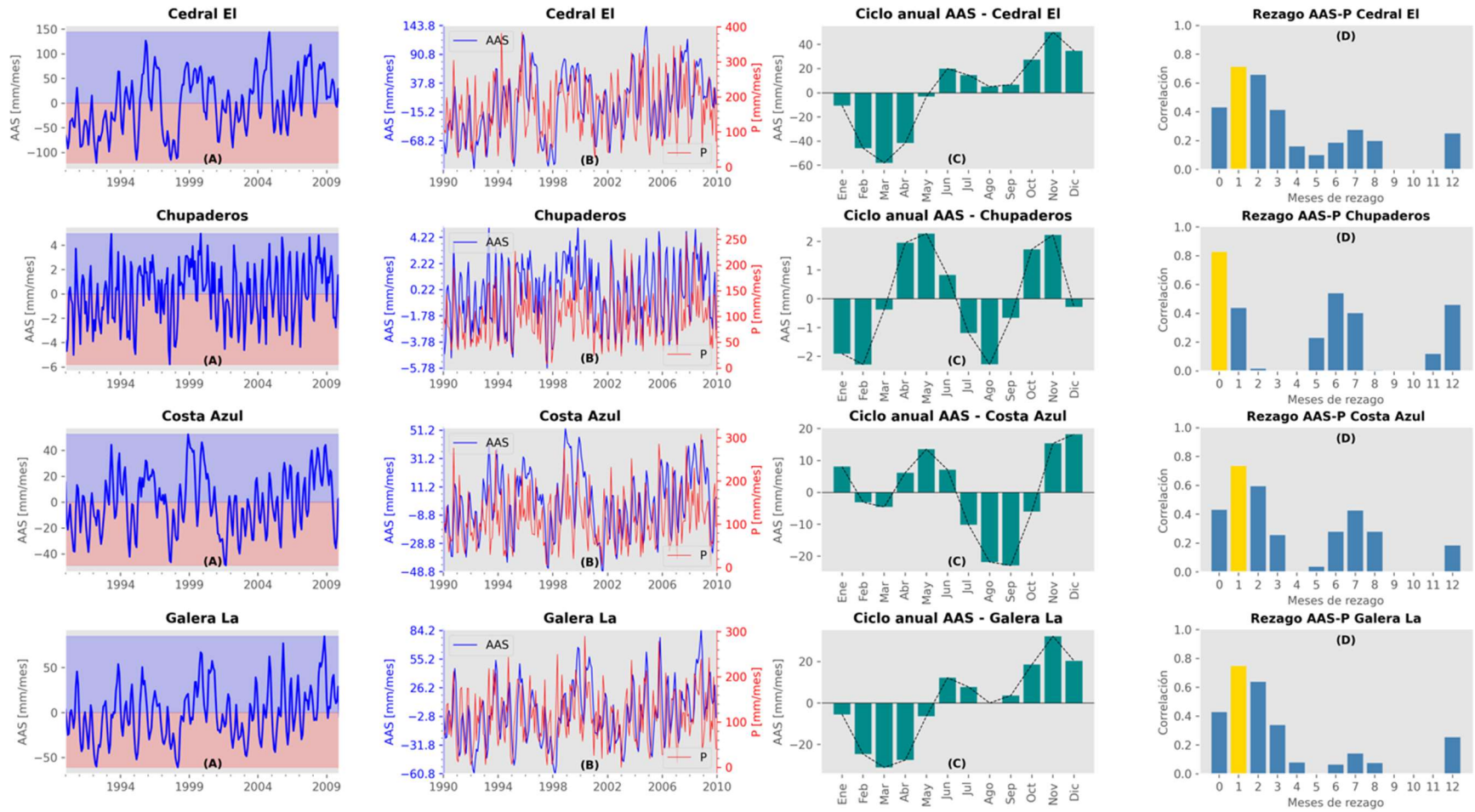
El ciclo anual del AAS en las cuencas Cedral y Galera muestra un periodo positivo y un periodo negativo. En el trimestre FMA las cuencas Cedral y Galera tienen un AAS promedio de -48,4 mm/mes y -27,6 mm/mes, respectivamente. En el trimestre OND la cuenca Cedral tiene un AAS promedio de 37,4 mm/mes y la cuenca Galera un promedio de 23,7 mm/mes. En ambas cuencas el AAS tiene un rezago temporal de un mes respecto a la lluvia mensual, es decir, en el caso del trimestre FMA, el almacenamiento negativo obedece al periodo seco del trimestre DEF y el almacenamiento positivo al periodo húmedo del trimestre SON.

En la cuenca Chupaderos el AAS tiene dos periodos negativos y dos periodos positivos. El trimestre AMJ y los meses de octubre y noviembre tienen un AAS promedio de 1,7 mm/mes y 2,0 mm/mes, respectivamente. En los meses de enero y febrero la cuenca tiene un almacenamiento promedio de -2,1 mm/mes y en el trimestre JAS un AAS promedio de -1,4 mm/mes. En esta cuenca el rezago entre el AAS y lluvia varía entre 1 y 2 semanas, por lo que, tanto el AAS positivo como el negativo, se deben a la lluvia que ocurre en cada mes, dando origen a flujos subsuperficiales y escorrentía directa. Vale la pena mencionar la presencia de humedales en esta cuenca, los cuales actúan como agente regulador del agua en el suelo y ayudan con la permanencia de caudal en el río Chinchiná durante los periodos de estiaje.

En la cuenca Costa Azul el AAS se recarga en los trimestres AMJ y NDE. En el trimestre AMJ el valor medio del AAS es de 9,0 mm/mes y en el trimestre NDE de 13,9 mm/mes. En la cuenca los meses de mayor AAS son mayo (13,5 mm/mes) y diciembre (18,2 mm/mes). El promedio de AAS de estos meses obedece a la recarga de agua en los meses abril y noviembre, respectivamente, meses más húmedos en la cuenca.

En la cuenca Costa Azul también se presenta un marcado trimestre con valores de almacenamiento negativo. En el trimestre JAS el AAS promedio es de -18,3 mm/mes con septiembre (-22,9 mm/mes) como el mes con mayor salida de agua desde el suelo hacia el río Chamberí. En este trimestre la salida de agua es estimulada por las pocas precipitaciones de los meses de junio y julio.

Figura 5 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Cedral EI, Chupaderos, Costa Azul y Galera La.



La Figura 6 presenta la variabilidad mensual y ciclo anual del AAS en las cuencas Las Camelias Aut, Paila La, Palmira Hda y la parte baja de la cuenca del río Risaralda (PBCR). La figura también presenta la correlación entre la precipitación y el AAS para diferentes periodos de rezago. Las cuencas Las Camelias Aut y Palmira Hda se encuentran ubicadas en la subzona 3, mostrando un periodo de AAS positivo, un periodo de AAS negativo y una transición corta entre ambos periodos. En la cuenca Las Camelias Aut el AAS mensual varía entre -94,9 mm/mes y 76,3 mm/mes mientras que en la cuenca Palmira Hda varía entre -114 mm/mes y 93,4 mm/mes.

Entre enero y abril las cuencas Las Camelias Aut y Palmira Hda tienen un almacenamiento medio de -44,3 mm/mes y -50 mm/mes, respectivamente, déficit de almacenamiento asociado al periodo seco comprendido entre diciembre y marzo. Durante los meses secos el almacenamiento subterráneo no recibe recarga significativa y aporta flujo base a los caudales de estiaje del río Tarazá en la cuenca Las Camelias Aut y el río Man en la cuenca Palmira Hda.

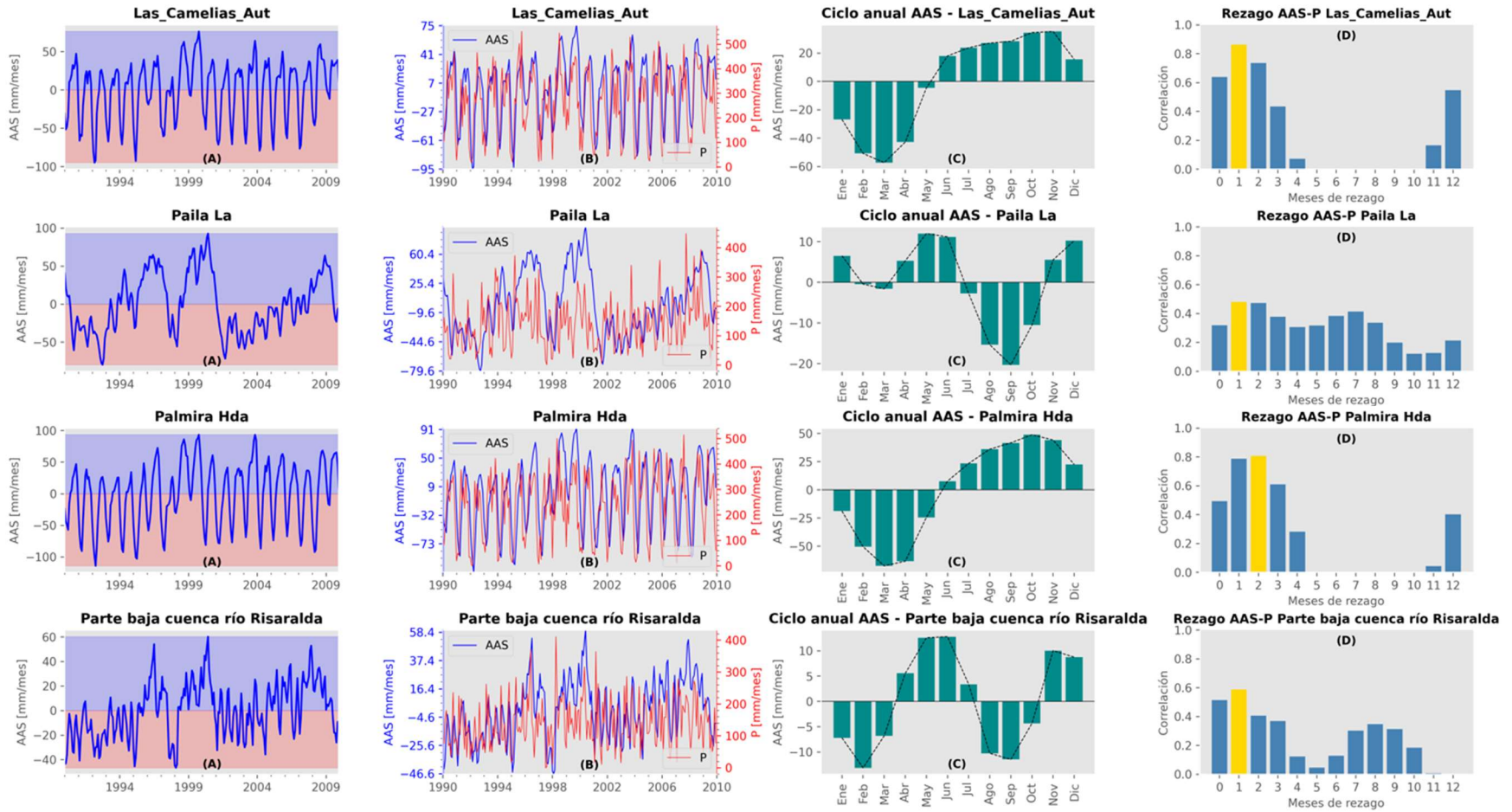
En términos de AAS el mes de mayo puede ser considerado como transición entre los periodos de AAS negativo y positivo. El comienzo del periodo húmedo a mediados del mes de abril y el rezago entre uno y dos meses entre la variabilidad del el AAS y la precipitación, hacen que el almacenamiento subterráneo empiece a mostrar recuperación en el mes de junio. Entre los meses de julio y noviembre la cuenca Las Camelias Aut tiene un AAS medio de 29,7 mm/mes y la cuenca Palmira Hda un AAS medio de 38,8 mm/mes.

La cuenca Paila La es el área de drenaje del río Tapias, en esta cuenca en el AAS mensual varía entre -79,6 mm/mes y 92,9 mm/mes. En el trimestre ASO la cuenca tiene AAS promedio de -15,4 mm/mes debido a las condiciones secas del trimestre JJA. Durante los meses de mayo y junio el AAS promedio es de 11,6 mm/mes, mientras que en trimestre NDE el AAS promedio es de 7,4 mm/mes; en ambos periodos el incremento del AAS se debe al exceso de humedad en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre.

En la cuenca PBCR el AAS varía entre -46,6 mm/mes y 60,3 mm/mes. La variabilidad del AAS tiene un rezago de un mes respecto a la precipitación. En el trimestre EFM la cuenca tiene un AAS promedio de -9 mm/mes y en el trimestre ASO de -8,7 mm/mes. En estos trimestres el aporte de flujo desde el AAS al río Risaralda es superior que la recarga de agua en el suelo.

El caso contrario ocurre en el trimestre AMJ y en los meses de noviembre y diciembre donde el AAS promedio es 10,3 mm/mes y 9,4 mm/mes, respectivamente. En estos periodos la salida de agua desde el suelo hacia el río Risaralda compensada y superada por la recarga de agua.

Figura 6 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Las Camelias Aut, Paila La, Palmira Hda y Parte baja cuenca río Risaralda (PBCR).



La Figura 7 presenta la variabilidad mensual y ciclo anual del AAS en las cuencas Penalta, Pte Carretera, PNBA y Quitasueño. La figura también compara la variabilidad del AAS y la precipitación, así como la correlación entre estas variables para diferentes periodos de rezago.

En la cuenca Penalta el AAS varía entre -58,6 mm/mes y 89,8 mm/mes, en la cuenca Pte Carretera el AAS varía entre -81,7 mm/mes y 83 mm/mes, en la cuenca PNBA el AAS varía entre -42,6 mm/mes y 38,1 mm/mes y en la cuenca Quitasueño el AAS varía entre -80,2 mm/mes y 63,3 mm/mes.

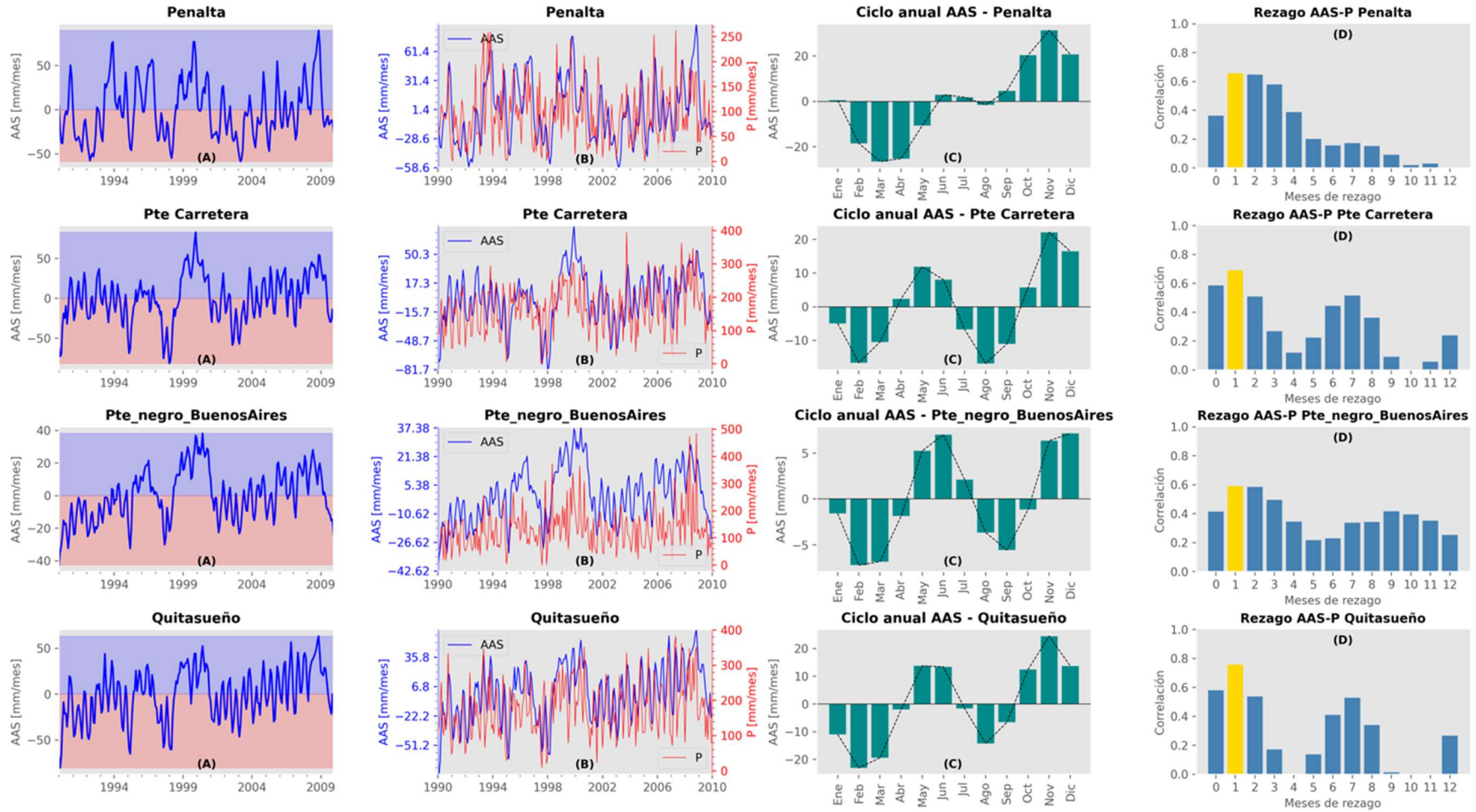
La cuenca Penalta tiene un periodo de AAS negativo, un periodo de AAS positivo y un periodo de transición. Entre los meses de febrero y mayo la cuenca tiene un AAS promedio de -20,2 mm/mes producto del trimestre seco DEF. Sin embargo, debido al rezago aproximado de 1 mes entre la precipitación y el AAS los efectos sobre el AAS se manifiestan a partir del mes de febrero. Entre los meses de octubre y diciembre el AAS promedio en la cuenca es de 24,1 mm/mes y se debe a la lluvia de septiembre y octubre que permite recargar el almacenamiento con cantidades de agua mayor que el aporte de flujo desde el suelo al río Aurrá.

El AAS en las cuencas Pte Carretera, PNBA y Quitasueño tiene dos periodos con promedio positivo y dos periodos con promedio negativo. En la cuenca Pte Carretera el AAS tiene un promedio de -10,6 mm/mes en el trimestre EFM y -11,5 mm/mes en el trimestre JAS. El caso contrario ocurre en los trimestres AMJ y OND en donde la cuenca tiene AAS promedio de 7,4 mm/mes y 14,8 mm/mes, respectivamente. En la cuenca PNBA los niveles más bajos de AAS se presentan en los bimestres de febrero, marzo y agosto, septiembre con valores de -7,1 mm/mes -4,6 mm/mes, respectivamente; mientras que los meses con mayor almacenamiento son el bimestre mayo, junio con 6,2 mm/mes y el bimestre noviembre, diciembre con 6,7 mm/mes.

En la cuenca Quitasueño se marcan 2 trimestres con AAS negativos y dos bimestres con AAS positivo, siendo los meses de abril y junio transición entre los periodos de descarga y recarga. En el trimestre EFM el AAS promedio es de -17,8 mm/mes y durante los meses de agosto y septiembre es de -10,4 mm/mes. Durante los meses de mayo y junio la cuenca tiene un AAS promedio 13,6 mm/mes y durante el trimestre OND de 16,9 mm/mes.

En la cuenca del río Arma la respuesta promedio del AAS frente a la precipitación es de un mes, lo que explica que siendo MAM y SON los trimestres más húmedos, la recarga del AAS ocurre en el mes de mayo y sus efectos se notan en el mes de junio que es un mes seco. Los efectos de la lluvia del trimestre SON sobre el AAS se notan a partir del mes de octubre y se extienden hasta diciembre. En los meses con AAS negativo la cuenca Quitasueño mantiene el caudal de recesión del río Arma.

Figura 7 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Penalta, Pte Carretera, PNBA y Quitasueño.



La Figura 8 presenta la variabilidad mensual y ciclo anual del AAS en las cuencas RCSG, San Gabriel, Sinifaná y VECE. En la cuenca RCSG el AAS varía entre -21,7 mm/mes y 26,2 mm/mes, en la cuenca San Gabriel el AAS varía entre -81,3 mm/mes y 79,2 mm/mes, en la cuenca Sinifaná el AAS varía entre -35,8 mm/mes y 42,8 mm/mes; por último, en la cuenca VECE el AAS varía entre -145,7 mm/mes y 129,8 mm/mes. En todas las cuencas la variabilidad el AAS muestra un rezago aproximado de un mes frente a la lluvia mensual.

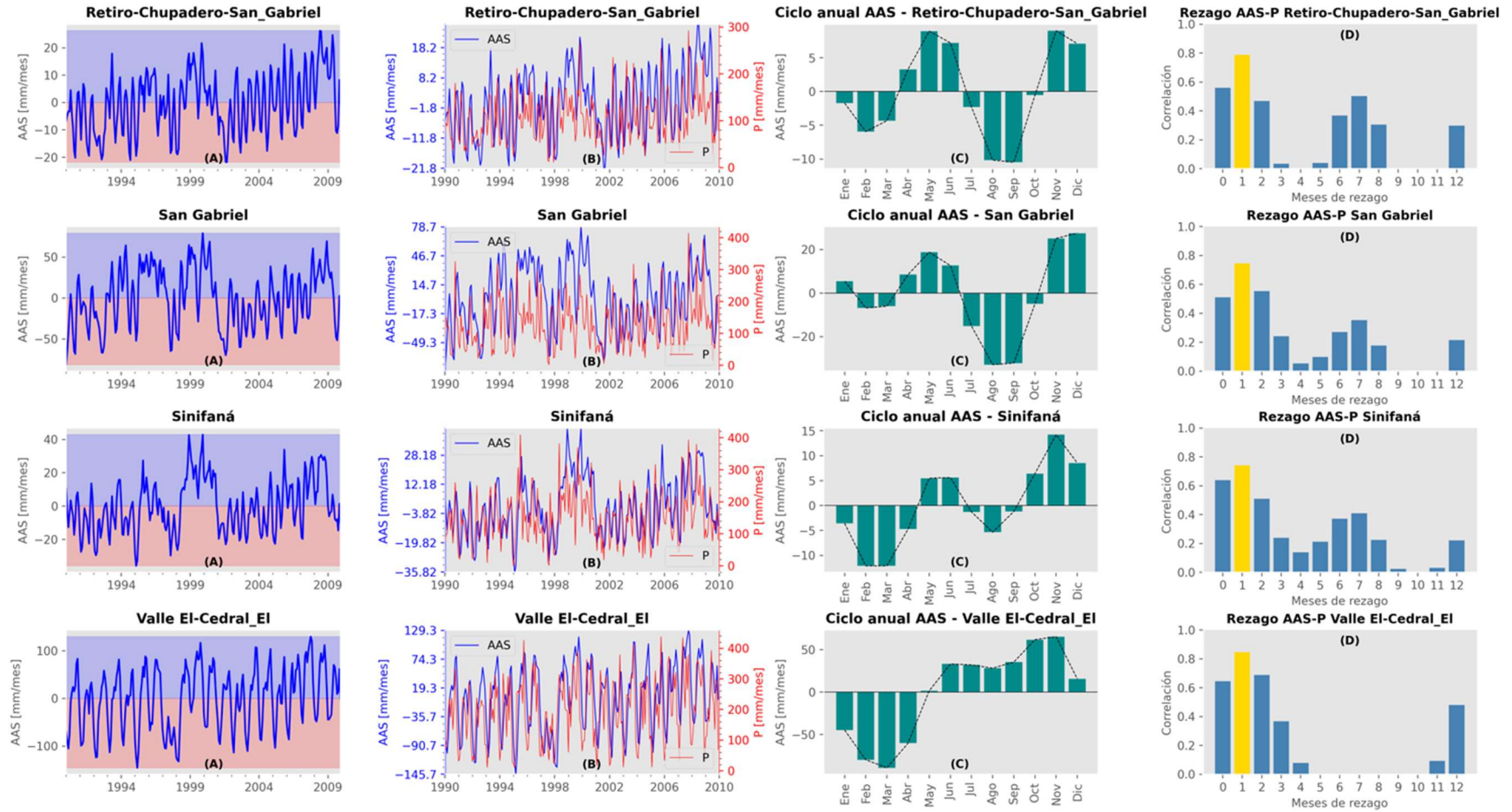
El AAS en las cuencas RCSG y San Gabriel muestra un comportamiento similar debido a que ambas cuencas pertenecen al río Chinchiná. En ambas cuencas el AAS tiene promedio positivo en el trimestre AMJ y en los meses de noviembre y diciembre. La cuenca San Gabriel tiene promedio negativo en los trimestres EFM y JAS, mientras que la cuenca RCSG en el trimestre EFM.

En la cuenca RCSG el AAS promedio durante los trimestres EFM y JAS es de -4 mm/mes y -7,6 mm/mes, respectivamente. Durante el trimestre AMJ el AAS medio es de 6,5 mm/mes y durante los meses de noviembre y diciembre es de 8 mm/mes. En la cuenca San Gabriel el AAS tiene los niveles más bajos entre los meses de julio y septiembre con un AAS promedio de -26,7 mm/mes; el agotamiento del AAS ocurre porque la salida de agua desde suelo hacia la corriente no es compensada por la poca y casi nula recarga durante el trimestre JJA. El caso contrario ocurre durante los meses de noviembre y diciembre en donde la cuenca tiene un AAS promedio de 26,3 mm/mes, AAS asociado a la recarga de agua en el suelo por la lluvia del trimestre SON.

En la cuenca Sinifaná los meses con menor AAS son febrero y marzo con un promedio de -12,1 mm/mes y se debe al trimestre seco DEF, periodo en el que el AAS mantiene el caudal mínimo mensual de la quebrada Sinifaná. El caso contrario ocurre trimestre OND donde el AAS promedio es de 9,7 mm/mes debido a la recarga durante el trimestre SON.

En la cuenca VECE el AAS tiene un promedio de -68,3 mm/mes en los primeros cuatro meses del año debido al aporte de flujo desde el suelo hacia el río San Andrés. Entre los meses de junio y noviembre el AAS incrementa hasta llegar a un valor promedio de 42,7 mm/mes. Nótese que en el mes de mayo el AAS promedio es cercano a 0 mm/mes representando el periodo de recuperación del AAS. El caso contrario ocurre durante el mes de diciembre en donde el AAS no muestra valores significativos de recarga en contraste con el aporte de flujo desde el AAS hacia el río San Andrés produciendo el agotamiento gradual del almacenamiento.

Figura 8 Variabilidad mensual y ciclo anual del AAS y su relación con la precipitación. Resultados de los MHA implementados en las cuencas Retiro-Chupadero-San_Gabriel, San Gabriel, Sinifaná y Valle El-Cedral_EI.



E. Participación del AAS en la dinámica hidrológica de las cuencas de la zona estudio

En este anexo se describe la participación del AAS en el funcionamiento hidrológico de todas las cuencas de la zona de estudio. Esta participación es descrita y determinada desde la producción de escorrentía subsuperficial, subterránea y posterior afloramiento del flujo del AAS en las corrientes superficiales, así como y el porcentaje que representa dicho flujo tanto en la magnitud de los caudales de recesión como en la magnitud de los caudales medios mensuales.

Para explicar la participación del AAS en la variabilidad de los caudales y la relación del AAS con la precipitación, evaporación y la escorrentía se emplean la Tabla 1 y las figuras 9, 10, 11 y 12. La Tabla 1 presenta para cada una de las cuencas de la zona de estudio campos con información sobre la relación del AAS con la precipitación, el caudal medio y el caudal mínimo mensual de las cuencas. Cabe anotar que las relaciones presentadas en la tabla son calculadas a partir de los resultados de los BHCP y los MHA.

En la Tabla 1 el campo %E/P contiene el porcentaje de la precipitación mensual que se convierte en evaporación mensual, el campo %R/P representa el porcentaje de la precipitación mensual que se convierte en escorrentía promedio mensual y el campo %AAS/P indica el porcentaje que representa el AAS respecto a la magnitud de la precipitación mensual. El campo %fb/Q_{min} indica la cantidad de agua que aporta el AAS al caudal mínimo mensual. Por último, el campo %fb/Q_{med} indica la cantidad de agua que aporta el AAS al caudal medio mensual de la corriente.

Vale la pena mencionar que, los caudales mínimos mensuales, en adelante caudal mínimo mensual o caudal de recesión, es una serie de tiempo conformada al seleccionar para cada mes entre los años 1990 y 2009 el caudal mínimo registrado en las estaciones hidrológicas de las cuencas de la zona de estudio.

De acuerdo con la información de la tabla en las cuencas de la zona de estudio el porcentaje de la precipitación que alcanza los almacenamientos subsuperficial y subterráneo generando cambios en el AAS varía entre el 0,5% y el 38,9% con un promedio del 13,4%. En materia de caudales mínimos mensuales el AAS aporta entre el 44,5% y el 99,1% con un aporte promedio del 82%. En cuanto al aporte al caudal medio mensual de

las corrientes, el AAS sufre entre el 11,5% y el 93,8% de la magnitud del caudal con un aporte promedio del 57,2%.

Tabla 1 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Porcentaje de la precipitación que se convierte en evaporación (**%E/P**), porcentaje de la precipitación que se convierte en escorrentía (**%R/P**), porcentaje de la precipitación que genera AAS (**%AAS/P**), porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal de recesión o mínimo mensual (**%fb/Q_{min}**) y porcentaje de caudal aportado desde el AAS al caudal medio mensual (**fb/Q_{med}**). Elaboración propia.

Cuencas	%E/P	%R/P	%AAS/P	%fb/Q_{min}	% fb/Q_{med}
Area 1 Cauca	21,3	77,2	0,8	44,5	11,5
Area 2 Cauca	61,2	18,4	19,7	94,3	84,3
Area 3 Cauca	54,4	31,0	13,6	87,0	64,9
Area 4 Cauca	19,5	78,8	1,3	79,9	40,8
Area 5 Cauca	49,9	44,6	4,0	88,3	60,9
Area 6 Cauca	57,7	16,7	24,5	97,5	93,8
Area 7 Cauca	47,1	37,6	14,5	89,6	76,2
Area 8 Cauca	33,0	58,1	6,0	73,4	49,3
Area 9 Cauca	32,3	55,7	8,9	59,1	38,2
Area Sanjuan 2	19,2	77,3	0,5	65,3	16,4
BANANERA LA 6-909	32,4	51,3	13,2	80,0	52,2
BRETANA LA	34,5	52,4	11,2	74,6	47,8
Brasilia	47,6	37,7	12,7	82,6	55,7
BUENOS AIRES	26,2	62,9	7,7	68,3	37,2
Campamento	21,5	65,9	9,4	83,8	49,9
Cangrejo El	55,4	14,5	29,3	85,9	70,2
Cedral El	36,7	35,1	27,3	94,7	77,2
Chupaderos	41,0	56,8	1,4	88,7	57,8
Costa Azul	49,8	34,3	15,1	90,8	70,1
Galera La	55,0	23,9	20,3	99,1	89,2
Las_Camalias_Aut	21,4	66,8	8,8	86,6	56,7
Paila La	48,0	24,0	27,3	84,4	53,1
Palmira Hda	37,5	46,2	14,8	84,7	54,4
Parte baja cuenca río Risaralda	33,0	54,2	11,3	67,5	36,6
Penalta	54,9	6,1	38,9	94,8	85,7
Pte Carretera	21,7	63,2	12,1	57,4	32,7
Pte_negro_BuenosAires	51,2	36,6	9,2	93,0	47,0
Quitassueño	41,8	44,6	10,6	77,7	54,3
Retiro-Chupadero-San_Gabriel	56,5	33,1	7,4	97,4	74,1
San Gabriel	30,5	46,6	19,8	92,9	73,0
Sinifaná	49,8	39,9	7,3	80,2	51,2
Valle El-Cedral_El	25,3	51,0	20,7	80,3	68,5

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se presenta para cada una de las cuencas de la zona de estudio un gráfico de Balance y un gráfico de Caudales. El gráfico de Balance muestra la variabilidad mensual de la precipitación, la evaporación, la escorrentía, la precipitación y la proporción de las tres últimas variables respecto a la precipitación; esto con el objetivo de analizar (en conjunto con la información de la Tabla 1) el papel de cada variable (especialmente del AAS) en la producción de caudal en la cuenca. El gráfico de caudal presenta de manera conjunta la variabilidad mensual del caudal mínimo mensual, el caudal medio mensual y el flujo base, este gráfico junto con la información de los campos

%fb/Qmin y fb/Qmed de la Tabla 1 permiten describir la participación del AAS en los caudales de la cuenca.

La Figura 9 presenta los gráficos de Balance y Caudales para las cuencas Área 1 Cauca, Área 2 Cauca, Área 3 Cauca, Área 4 Cauca, Área 5 Cauca, Área 6 Cauca, Área 7 Cauca y Área 8 Cauca.

En la cuenca Área 1 Cauca el AAS representa en promedio el 0,8% de la precipitación, la evaporación representa el 21,3% y la escorrentía representa el 77%. En esta cuenca predomina la producción de escorrentía superficial directa y el retorno de agua hacia la atmósfera mediante la evaporación. Sin embargo, a pesar de la poca cantidad de agua que ingresa al suelo, el AAS aporta el 44,5% del caudal mínimo mensual y el 11,5% del caudal medio mensual.

En la cuenca Área 2 Cauca el AAS representa el 19,7% de la precipitación mensual, la escorrentía representa el 18,4% y la mayor parte (61,2%) de la lluvia se evapora. En esta cuenca la precipitación media anual es de 1.138 mm/mes mientras que la evaporación anual es de 738 mm/mes lo que explica la baja producción de escorrentía directa. Los caudales mínimos mensuales reciben el 94,3% de su magnitud desde el AAS, y en el caso del caudal medio mensual el AAS aporta el 84,3%. Vale la pena mencionar que, el mayor impacto del AAS sobre los caudales medios se da en los trimestres DEF y JJA cuando la magnitud del flujo descargado por el AAS es semejante a la de los caudales medios.

En la cuenca Área 3 Cauca el AAS representa el 13,6% de la precipitación mensual mientras que la evaporación y la escorrentía representan el 54,4% y el 31%, respectivamente. En esta cuenca el 87% del caudal mínimo mensual y el 64,9% del caudal medio mensual se debe al aporte de agua desde el suelo. Al igual que en la cuenca Área 2 Cauca, el mayor impacto del AAS sobre los caudales medios se da en terminos estacionales, ya que durante los meses secos el flujo del AAS representa el 90% de la magnitud del caudal medio mensual y el 100% del caudal mínimo mensual.

En la cuenca Área 4 Cauca el AAS representa el 1,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 19,5% y la escorrentía directa el 78,8%. En esta cuenca el AAS aporta aproximadamente 79,9% de la magnitud del caudal mínimo mensual y cerca del 40,8% del caudal medio mensual. Estos porcentajes son principalmente representativos de los periodos secos.

En la cuenca Área 5 Cauca el AAS el AAS representa el 4% de la precipitación mensual mientras que la evaporación y la escorrentía representan el 49,9% y el 44,6%, respectivamente. Los caudales medios mensuales son controlados en mayor medida por la escorrentía directa, sin embargo, el aporte del AAS al caudal medio se ve reflejado en los periodos secos en donde el flujo del AAS representa aproximadamente el 60,9% caudal medio. En cuanto a los caudales mínimos mensuales el AAS aporta en promedio el 88,3%.

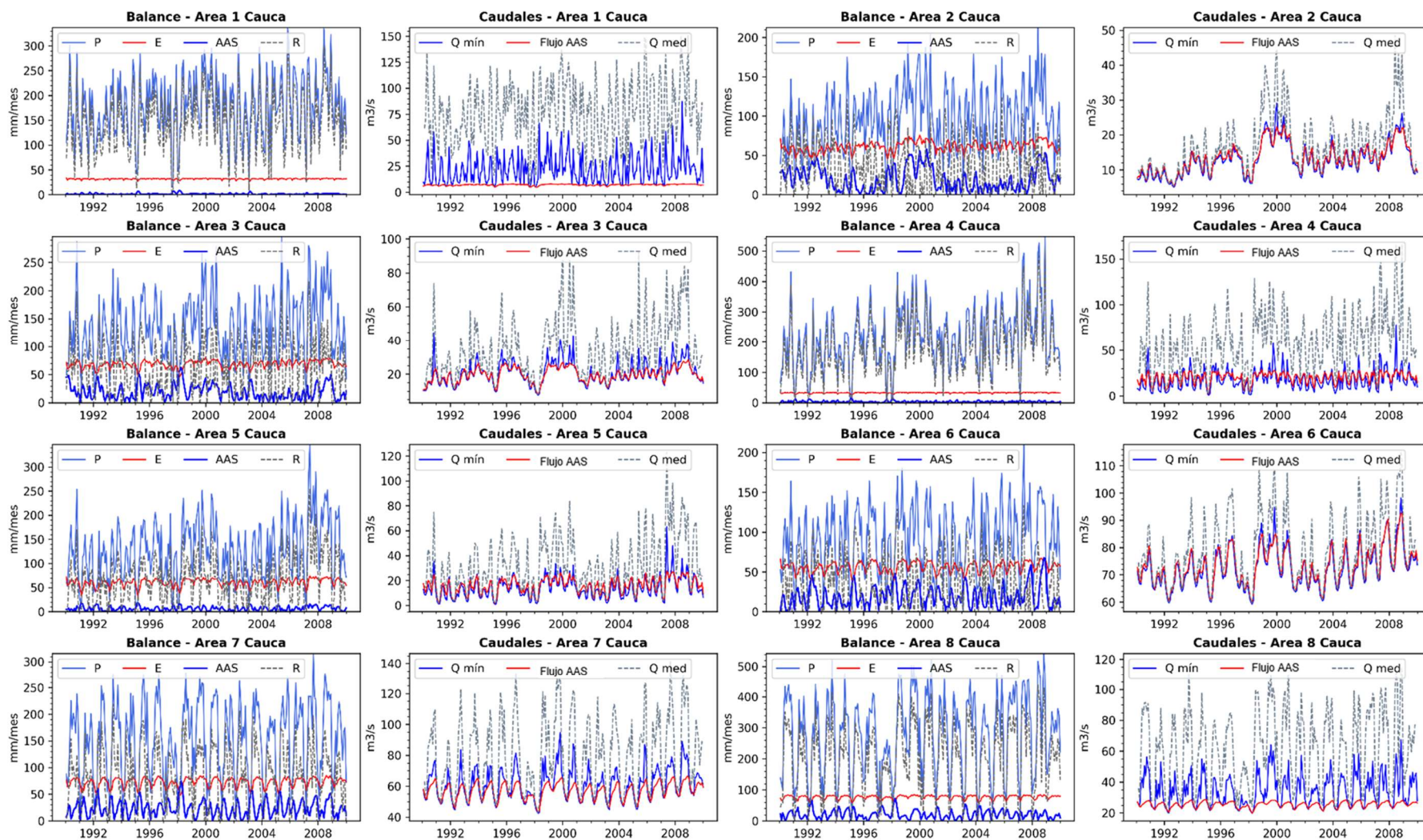
En la cuenca Área 6 Cauca el AAS representa el 24,5% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 54,7% y la escorrentía representa el 16,7%. En esta cuenca el

AAS aportado el 97,5% de la magnitud del caudal mínimo mensual y el 93,8% del caudal medio mensual. La poca producción de escorrentía directa en comparación con la evaporación y el ingreso de agua hacia el suelo hace que los caudales medios aportados por esta cuenca al canal del río solo sean controlados por la escorrentía directa en los periodos húmedos con las precipitaciones más altas.

En la cuenca Área 7 Cauca el AAS representa el 14,5% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 47,1% y la escorrentía representa el 37,6%. En esta cuenca los caudales mínimos mensuales reciben en promedio el 89,6% desde el AAS. En el caso del caudal medio mensual el aporte del AAS representa el 76,2%, sin embargo puede considerarse que este aporte se ve reflejado mayormente durante los periodos de estiaje, debido a que durante los periodos húmedos la producción de escorrentía directa en la cuenca mantiene el caudal medio aportado al río Cauca.

En la cuenca Área 8 Cauca el AAS representa solo el 8% de la precipitación mensual mientras que la escorrentía y la evaporación representan el 58,1% y el 33%, respectivamente. En esta cuenca el caudal medio depende mayormente de la escorrentía directa debido a la disponibilidad hídrica de la cuenca. El caudal medio mensual recibe aportes cercanos al 49,3% de su magnitud desde el AAS mayormente durante los periodos de estiajes, mientras que los caudales mínimos mensuales reciben el 73,4%.

Figura 9 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Comparación entre la precipitación, evaporación, escorrentía y el AAS. Proporción de la magnitud del flujo de AAS respecto al caudal mínimo mensual y el caudal medio mensual de la cuenca. Elaboración propia.



La Figura 10 presenta los gráficos de Balance y Caudales para las cuencas Área 9 Cauca, Área Sanjuan 2, Bananera La 6-909, Bretana La, Brasilia, Buenos Aires, Campamento y Cangrejo El.

En la cuenca Área 9 Cauca el AAS representa el 8,9% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 32,3% y la escorrentía directa representa el 55,7%. Tal como se aprecia en los gráficos de caudales y en la magnitud de la escorrentía directa respecto al AAS, en esta cuenca el caudal medio mensual depende en mayor medida de la escorrentía directa, el aporte del AAS al caudal medio representa el 38,2% y dicha contribución se debe mayormente a los periodos de estiaje. En cuanto a los caudales mínimos mensuales, el AAS aporta mediante flujo base del acuífero el 59,1%.

En la cuenca Área 2 Sanjuán el AAS representa el 0,5% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 19,2% y la escorrentía representa el 77,3% de la precipitación mensual. Tanto la participación porcentual mencionada anteriormente como la magnitud de los caudales medio y mínimo mensual junto con el flujo desde el suelo, muestran que el AAS tiene una baja repercusión en la producción de la escorrentía que mantiene el caudal medio aportado por esta cuenca al canal del río San Juan. El caudal medio solo recibe el 16,4% de su magnitud desde el AAS. Sin embargo, el AAS aporta el 65,3% del caudal mínimo mensual.

Al igual que en la cuenca anterior, la cuenca Bananera La muestra una alta producción de escorrentía superficial directa (51,3% de la precipitación mensual). El AAS representa el 13,2% de la precipitación y la evaporación representa el 32,4%. A pesar de la buena generación de escorrentía directa, el rápido escurrimiento en la cuenca hace que gran parte del tiempo el caudal medio mensual reciba aportes cercanos al 52,2% desde el AAS. El aporte del AAS a los caudales mínimos mensuales es del orden del 80%.

En la cuenca Bretana La el AAS representa el 11,2% de la precipitación mensual mientras que la evaporación y la escorrentía representan el 34,5% y el 52,4%, respectivamente. En esta cuenca el 74,6% del caudal mínimo mensual es aportado por el AAS mientras que al caudal medio mensual recibe aproximadamente el 47,8% del flujo.

En la cuenca Brasilia el AAS representa el 12,7% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 47,6% y la escorrentía el 37,7%. La importancia del AAS en la hidrología de esta cuenca se ve reflejada en mayor medida en el aporte del 82,6% del flujo del caudal mínimo mensual y el 55,7% del flujo del caudal medio mensual.

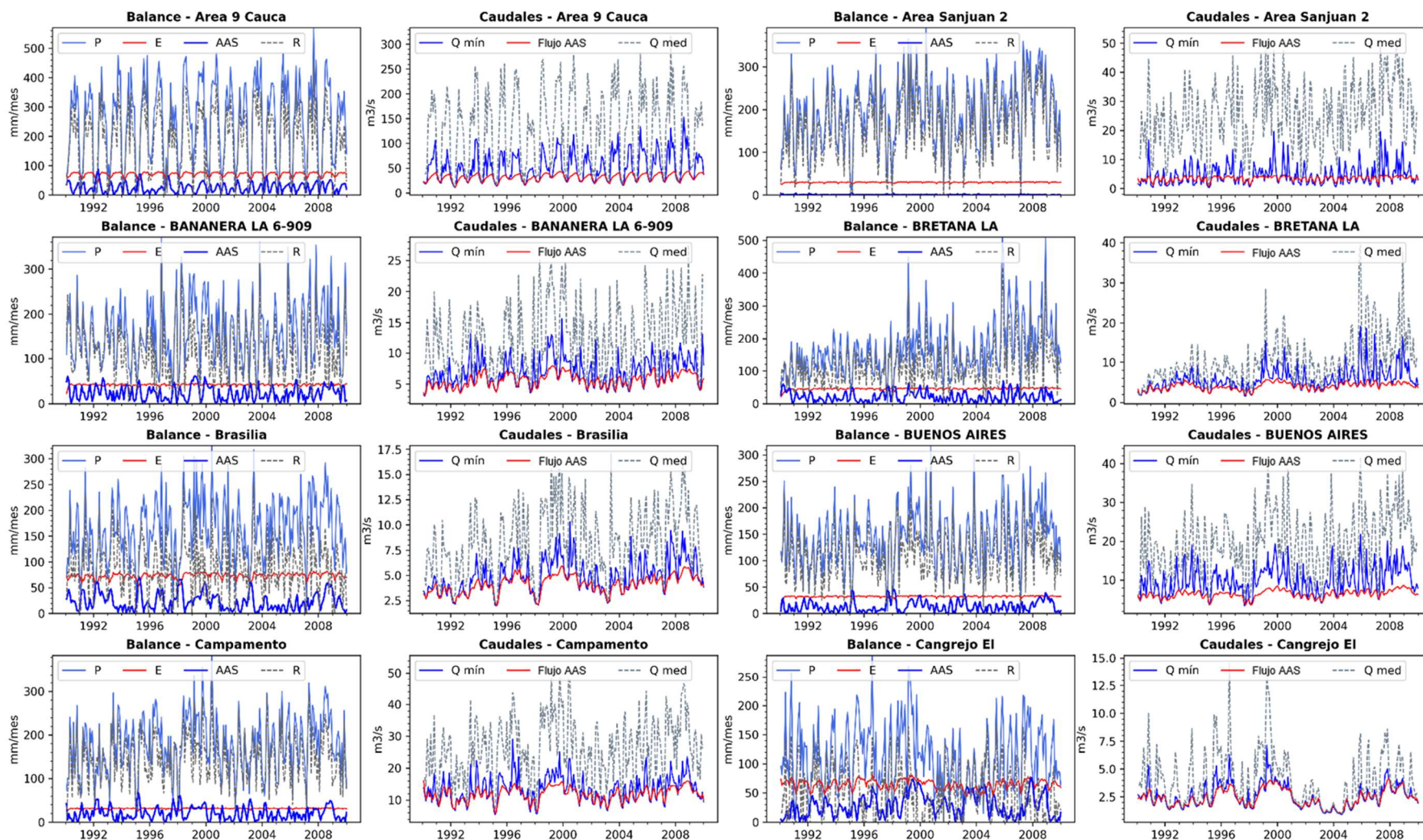
Las cuencas Buenos Aires y Campamento muestran un comportamiento hidrológico promedio similar. En la cuenca Buenos Aires el AAS representa el 7,7% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 26,2% y la escorrentía aproximadamente el 62,9%. En la cuenca Campamento el AAS representa el 9,4% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 21,5% y la escorrentía representa el 65,9%. Esta similitud en las condiciones hidrológicas de las cuencas obedece a la cercanía (contiguas) y el rango de alturas similar.

Sin embargo, a pesar de la similitud entre las cuencas el AAS tiene mayor incidencia sobre la producción de caudales mínimos mensuales de la cuenca Campamento, en esta última el AAS aporta el 83,8%, mientras que en la cuenca Buenos Aires el AAS aporta el 68,3%. En cuanto a los caudales medios mensuales, en la cuenca Campamento el AAS aporta el 37,2% y en la cuenca Buenos Aires aporta el 49,9%.

En la cuenca Cangrejo el AAS representa el 29,3% de la precipitación mensual, la escorrentía representa el 14,5% y el 55,4% de la lluvia se evapora. La precipitación media anual de la cuenca es de 1.321 mm/mes y la evaporación anual es de 776 mm/mes, lo que explica la baja producción de escorrentía directa. En esta cuenca se presenta una fuerte dependencia de los caudales mínimos mensuales al AAS puesto que este último aporta el 85,9% del flujo.

En cuanto al caudal medio mensual el AAS aporta el 70,2% del flujo, sin embargo, el mayor impacto del AAS sobre los caudales medios se da en terminos estacionales. En los periodos secos como los trimestres DEF y JJA la magnitud del flujo del AAS es semejante a la de los caudales medios.

Figura 10 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Comparación entre la precipitación, evaporación, escorrentía y el AAS. Proporción de la magnitud del flujo de AAS respecto al caudal mínimo mensual y el caudal medio mensual de la cuenca. Elaboración propia.



La Figura 11 presenta los gráficos de Balance y Caudales para las cuencas Cedral El, Chupaderos, Costa Azul, Galera La, Las Camelias Aut, Paila La, Palmira Hda y PBCR.

En la cuenca Cedral el AAS representa el 27,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 36,7% y la escorrentía representa el 35,1%. De la figura de caudales se puede apreciar que tanto la variabilidad mensual como la estacionalidad de los caudales mínimos mensuales es controlado por el flujo del AAS, este último representa el 94,7% de la magnitud del caudal mínimo mensual. Adicionalmente cerca del 77,2% del caudal medio mensual es aportado por el AAS.

El balance hidrológico en la cuenca Chupaderos indica que la mayor parte de la precipitación se convierte en escorrentía directa (56,8%), la cual mantiene en mayor medida el caudal medio mensual durante los periodos húmedos. La evaporación representa el 41% de la precipitación mensual y solo el 1,4% de la precipitación ingresa al suelo para generar cambios en el AAS. En esta cuenca el AAS tiene gran importancia dado aporta cerca del 88,7% del caudal mínimo mensual y el 57,8% de la magnitud del caudal medio mensual.

La cuenca Chupaderos es una de las más pequeñas de la zona de estudio (180,7 km²), tiene una de las precipitaciones más bajas (1.217,6 mm/año) y presenta un escurrimiento superficial rápido debido al relieve escarpado de la región. A pesar de que la mayor parte de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, esta solo aporta en promedio el 42% de la magnitud del caudal medio mientras que el AAS regula el porcentaje restante. Parte de esta regulación es explicada por la presencia de humedales alto andinos en la parte alta de la cuenca (Álvarez-Villa et al., 2023). Los humedales son ecosistemas y agentes ambientales que dentro de la dinámica hídrica de la cuenca del río Chinchiná cumplen funciones como la regulación hídrica, recarga, entre otros (Hernandez Henao, 2019).

En la cuenca Costa Azul el AAS representa el 15,1% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 49,8% y la escorrentía directa representa el 34,3%. En esta cuenca hay un aporte significativo de flujo desde el suelo hacia el canal del río Chamberí. El 90,8% del flujo de caudal mínimo mensual es aportado por el AAS y cerca del 70% del caudal medio mensual corresponde a los aportes del AAS. La cuenca muestra una marcada dependencia del flujo desde el AAS en el trimestre JAS debido al periodo seco que se da en el trimestre JJA. El caso contrario ocurre en el trimestre MAM y en los meses de octubre y noviembre donde incrementan los promedios mensuales de precipitación y con ello el caudal medio mensual por la escorrentía directa.

En la cuenca Galera La el AAS juega un papel importante en la permanencia de los caudales mínimos y medios mensuales. En la cuenca aproximadamente el 99% del caudal mínimo mensual es aportado desde el suelo al canal del río Tonusco como flujo base y cerca del 89,2 de la magnitud del caudal medio mensual se debe al aporte de agua desde el suelo. En la cuenca del río Tonusco domina el proceso de evaporación respecto a la generación de escorrentía superficial directa. El AAS representa el 20,3% de la

precipitación mensual, la evaporación representa el 55% y la escorrentía representa el 23,9%.

En la cuenca Las Camelias Aut el AAS representa el 8,8% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 21,4% y la escorrentía superficial representa el 66,8%. En esta cuenca domina la escorrentía superficial y ello se ve refleja en la magnitud del caudal medio mensual respecto al flujo base y el caudal mínimo mensual de la cuenca. Si bien en términos promedio el AAS aporta cerca del 56% del flujo del caudal medio mensual, este aporte es realmente importante entre los meses de diciembre y febrero, periodo en el que el promedio mensual de la precipitación reduce por ser la temporada seca en la cuenca.

La participación del AAS en la dinámica hidrológica de la cuenca Las Camelias Aut toma mayor importancia en el mantenimiento de los caudales mínimos mensuales del río Tarazá, cerca del 86,6% de la magnitud del caudal mínimo mensual del río es aportado por el AAS mediante flujo base de los acuíferos presentes en la región del Bajo Cauca. Este aporte se mantiene relativamente constante a lo largo del año, sin embargo, su efecto tiene mayor relevancia entre los meses de la temporada seca cuando la escorrentía superficial directa reduce y el flujo base proporciona el 56% del caudal medio mensual del río.

En la cuenca Paila La el AAS representa el 27,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 48% y la escorrentía superficial representa el 24%. En esta cuenca los aportes desde el AAS hacia el cauce principal del río Tapias representan aproximadamente el 84,4% del caudal mínimo mensual y cerca del 53% del caudal medio.

El gráfico de caudales para la cuenca Paila La en la Figura 11 muestra que, si bien los caudales mínimos mensuales dependen del aporte de flujo desde el AAS durante todo el año, el aporte más significativo del AAS se da durante los periodos de estiaje, es estos periodos el caudal mínimo mensual y el medio mensual del río Tapias es semejante a la magnitud del flujo del AAS. Sin embargo, durante el trimestre MAM y los meses de octubre y noviembre el caudal medio del río Tapias se debe en mayor medida al aporte de la escorrentía directa.

En la cuenca Palmira Hda el río Man recibe importantes aportes del AAS, tanto para la permanencia del caudal mínimo mensual como para el caudal medio mensual. En esta cuenca el AAS representa el 14,8% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 37,5% y la escorrentía representa el 46,2%.

Al igual que en las cuencas restantes de la región del Bajo Cauca, la importancia del AAS dentro de la hidrología del río Man se ve reflejada en la regulación del caudal mínimo mensual, el AAS aporta en promedio mediante flujo base 84,7% de la magnitud del caudal mínimo, y aproximadamente el 54,4% del caudal medio mensual, siendo mayor este aporte entre los meses de diciembre y febrero cuando la escorrentía superficial muestra sus niveles más bajos.

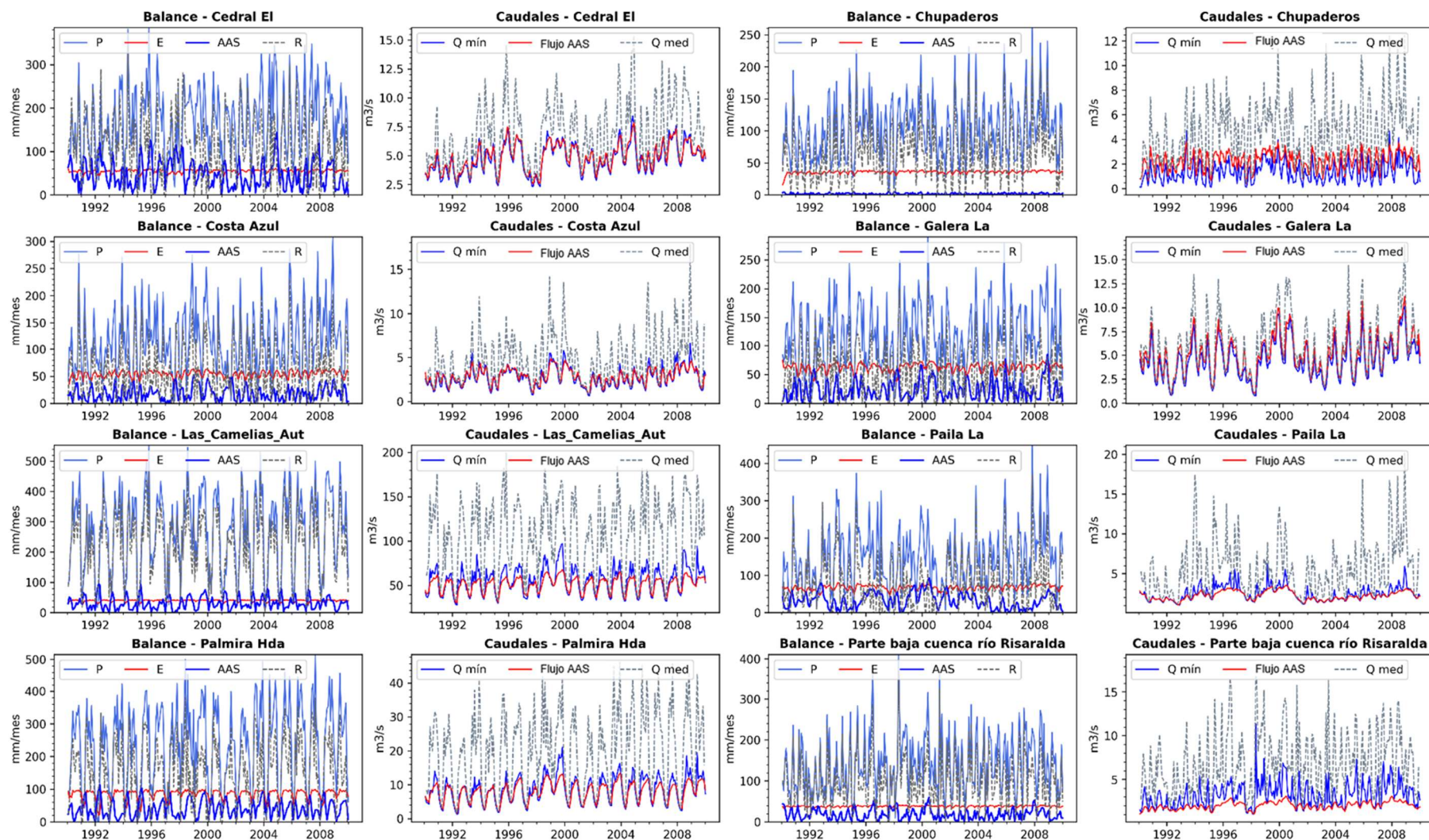
En la cuenca PBCR el AAS representa el 11,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 33% y la escorrentía superficial representa el 54,2%. Esta es

una cuenca en donde la permanencia del caudal medio es controlada por la generación de escorrentía superficial y el aporte del AAS sobre los caudales del río Risaralda en su parte baja se ve mayormente reflejado sobre los caudales mínimos mensuales en los periodos secos.

En condiciones promedio el AAS de la cuenca PBCR aporta el 67,5% del caudal mínimo mensual del río Risaralda en su parte baja, sin embargo, este aporte varía estacionalmente. Durante los trimestres DEF y JJA, el aporte de flujo desde el suelo a los caudales mínimos mensuales varía entre el 70% y el 90%, mientras que durante los periodos húmedos el aporte de flujo desde AAS representa aproximadamente el 50% del caudal mínimo mensual.

Respecto a los caudales medios mensuales de la cuenca PBCR, el aporte promedio del AAS es del 36,6%, esta participación incrementa hasta un 52% en periodos secos, pero durante periodos húmedos el aporte del AAS a los caudales medios mensuales solo representa el 25%.

Figura 11 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Comparación entre la precipitación, evaporación, escorrentía y el AAS. Proporción de la magnitud del flujo de AAS respecto al caudal mínimo mensual y el caudal medio mensual de la cuenca. Elaboración propia.



La Figura 12 presenta los gráficos de Balance y Caudales para las cuencas Penalta, Pte Carretera, PNBA, Quitasueño, San Gabriel, Sinifaná y VECE.

En la cuenca Penalta el AAS representa el 38,9% de la precipitación mensual, la escorrentía representa el 6,1% y el 54,9% de la lluvia se evapora. En esta cuenca la precipitación media anual es de 1.132 mm/mes mientras que la evaporación anual es de 650 mm/mes, lo que explica la baja producción de escorrentía directa. El AAS aporta el 94,8% del flujo de los caudales mínimos mensuales y el 85,7% del caudal medio mensual.

En el gráfico de caudales de la Figura 12 para la cuenca Penalta se puede apreciar que el aporte del AAS al caudal medio mensual es significativo, no solo durante los periodos de estiaje sino también en los periodos húmedos. Solo durante periodos húmedos con precipitación mensual superior al ciclo anual, la magnitud del flujo aportado desde el suelo al río es inferior al 50% del caudal medio mensual.

En la cuenca Pte Carretera predomina la generación de escorrentía superficial y el aporte de esta última sobre la permanencia de los caudales medios del río Supía. Muestra de lo anterior es el hecho de que el 63,2% de la precipitación mensual se convierte en escorrentía directa. En esta cuenca el AAS representa el 12,1% de la precipitación mensual y la evaporación representa el 21,7%. El AAS aporta en promedio el 57,4% del flujo del caudal mínimo mensual y cerca del 33% del caudal medio.

En la cuenca PNBA el AAS representa el 9,2% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 51,2% y la escorrentía representa el 36,6%. La importancia del AAS se ve reflejada sobre los caudales mínimos mensuales en el aporte de aproximadamente el 93% de la magnitud del caudal. Respecto al caudal medio mensual el AAS aporta el 47%, sin embargo, este valor es representativo de los periodos secos donde la escorrentía reduce. En los periodos húmedos el exceso de humedad se convierte de manera directa en escorrentía superficial generando un incremento sustancial del caudal medio respecto a los mínimos mensuales y el flujo del AAS.

En la cuenca Quitasueño aproximadamente el 10,6% de la precipitación mensual ingresa al suelo y genera cambios en el AAS, el 41,8% de la precipitación mensual se convierte en evaporación y el 44,6% de la precipitación genera escorrentía directa. El AAS en esta cuenca regula la variabilidad de los caudales mínimos mensuales aportando en promedio el 77,7% del flujo, y en el caso del caudal medio mensual el AAS aporta el 54,3%. Durante los periodos de estiaje el aporte de agua desde el AAS al río Arma puede representar el 90% del caudal mientras que en periodos húmedos hasta el 40%.

Esta variación porcentual no se debe a una reducción significativa de la disponibilidad del agua en el suelo respecto a las variables restantes sino al aporte de la escorrentía superficial. Ejemplo de ello es que entre junio de 1997 y junio 1998 la precipitación media anual de la cuenca se redujo aproximadamente en un 30% y con ello la escorrentía superficial, en cuyo caso los caudales medio y mínimo mensual pasaron a depender de la escorrentía subsuperficial y subterránea. El caso contrario ocurrió entre los años 1999 y 2000 con la ocurrencia de La Niña, en este periodo la precipitación media anual tuvo un

incremento del 25% haciendo que los caudales mínimo y medio de la cuenca incrementaran respecto a los años restantes, manteniéndose el mismo nivel de aporte de flujo por parte del AAS.

Las cuencas RCSG y San Gabriel forman parte de la cuenca de drenaje del río Chinchiná hasta su descarga en el río Cauca. La cuenca RCSG drena el costado sur de la cuenca del río Chinchiná y la cuenca San Gabriel está asociada al río Guacaica, río tributario del Chinchiná. A pesar de drenar al río Chinchiná, las cuencas RCSG y San Gabriel muestran diferencia en el balance hídrico. Esta diferencia obedece a la posición latitudinal y extensión de las cuencas. La cuenca San Gabriel cuenta con una precipitación media anual de 1.563 mm/año mientras que la cuenca RCSG tiene una precipitación de 1.257 mm/año.

En la cuenca RCSG el AAS representa aproximadamente el 7,4% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 56,5% y la escorrentía representa el 33,1%. En la cuenca San Gabriel el AAS representa el 19,8% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 30,5% y la escorrentía el 46,6%.

A pesar de las diferencias en la precipitación, evaporación y escorrentía debido a su posición dentro de la cuenca general del río Chinchiná, las cuencas RCSG y San Gabriel tienen un aporte similar de agua desde el suelo al cauce principal del río Chinchiná. En la cuenca RCSG el aporte promedio de flujo desde el AAS al caudal mínimo mensual es de aproximadamente 97,4% mientras que en la cuenca San Gabriel el aporte es de 92,9%. En cuanto a caudal medio mensual el aporte promedio de flujo desde el AAS en la cuenca RCSG es de 74,1% y en la cuenca San Gabriel es de 73%.

En ambas cuencas el AAS tiene un papel importante en la hidrología del río Chinchiná, puesto que aporta casi la totalidad del caudal mínimo mensual y un porcentaje importante del caudal medio mensual, no solo durante los periodos de estiaje sino también durante los periodos húmedos en donde el flujo del AAS puede representar en promedio entre el 40% y el 50% del caudal.

En la cuenca Sinifaná el AAS representa el 7,3% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 49,8% y la escorrentía el 39,9%. En esta cuenca la importancia del AAS se ve reflejada sobre los caudales mínimos mensuales puesto que el AAS aporta aproximadamente 80% de la magnitud del caudal. Respecto a los caudales medios el AAS aporta aproximadamente el 51,2%, porcentaje representativo principalmente de los periodos secos en donde el flujo del AAS representa en promedio entre el 40% y el 70% de la magnitud del caudal medio mensual, sin embargo, durante periodos húmedos dicha participación varía entre el 17% y el 40%.

En la cuenca VECE el AAS representa el 20,7% de la precipitación mensual, la evaporación representa el 25,3% y la escorrentía el 51%. En esta cuenca predomina la ocurrencia de escorrentía superficial, sin embargo, a partir de la variabilidad de los caudales medios y mínimos mensuales que se muestra en la Figura 12 se ha podido determinar que el caudal mínimo mensual representa el 74% del caudal medio mensual. Esto puede ser explicado por un rápido escurrimiento en la cuenca.

En la cuenca VECE el AAS aporta cerca del 80% del caudal mínimo mensual y el 68,5% del caudal medio mensual, con lo cual, el AAS juega un papel preponderante en la permanencia de los caudales en la cuenca.

Figura 12 Participación del AAS en la dinámica hídrica de la zona de estudio. Comparación entre la precipitación, evaporación, escorrentía y el AAS. Proporción de la magnitud del flujo de AAS respecto al caudal mínimo mensual y el caudal medio mensual de la cuenca. Elaboración propia.

