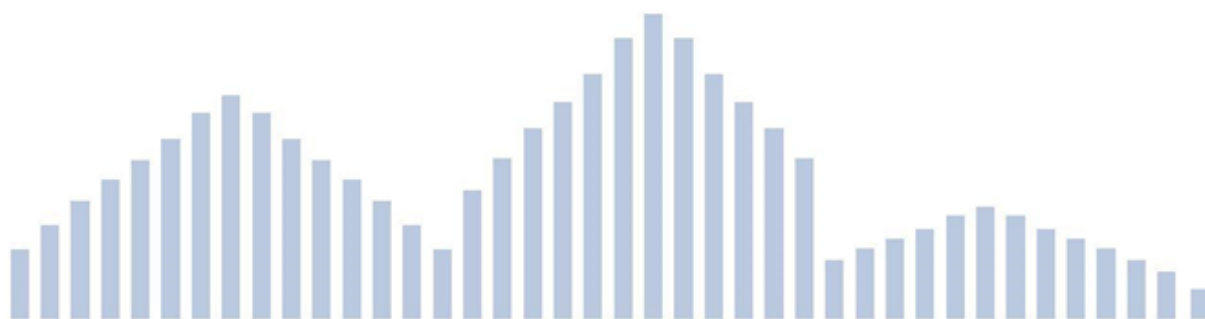




Profil climatique local de la Commune d'Oristano



Juillet 2019

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

Sommaire

Introduction	3
La situation climatique de la région d'Oristano pour la période 1961-2010	4
Analyse des précipitations	12
Considérations sur la situation climatique, 1961-2010	25
Analyse des scénarios climatiques futurs	26
Analyse des extrêmes climatiques et des indices de changement climatique	31
Analyse des scénarios de précipitations	40
Considérations finales	59

Ce document a été édité par le Département Météo-climatique de l'Agence Régionale pour l'Environnement.

Groupe de travail:

- Andrea Vallebona, [Rete Gaia Srl](#), coordination générale
- Andrea Motroni, Arpa Sardegna, [Dipartimento idrometeorologico](#), profil climatique



SardegnaArpa



DIPARTIMENTO SPECIALISTICO REGIONALE IDROMETEOROLOGICO

La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

Introduction

L'analyse des données climatiques relatives au territoire de la commune d'Oristano, indispensables pour définir les caractéristiques climatiques de la zone et les vulnérabilités de son territoire aux événements climatiques, sont utiles à la définition des actions du plan d'adaptation au changement climatique du projet ADAPT.

Pour la définition des caractéristiques climatiques de la zone, plusieurs séries de données historiques ont été prises en compte qui peuvent aider à définir la présence de signes de variabilité climatique et de variations climatiques dans le passé récent et dans les prochaines décennies.

En particulier, pour la définition du climat du territoire de la commune d'Oristano ont été analysées les données climatiques de deux stations météorologiques du Réseau Historique Régional, situées dans la zone de Santa Giusta et dans la zone de Santa Lucia. Les deux stations ont été choisies pour l'exhaustivité des séries chronologiques des données de température et de précipitation, pour la position géographique et la proximité du centre habité d'Oristano. L'homogénéité orographique et morphologique du territoire de la commune d'Oristano permet de limiter l'analyse climatique à quelques stations, surtout pour la description de l'évolution des valeurs maximales, minimales et moyennes de température, qui peuvent, à la limite, être affectés par la distance plus ou moins longue de la mer. La période choisie pour l'analyse climatique est 1961-2010, avec 50 ans de données presque complètes pour les deux stations. La période considérée a été subdivisée ultérieurement en deux périodes, 1961-1990 et 1981-2010, afin de pouvoir comparer les deux périodes, notamment dans les vingt années de non-chevauchement (la décennie 1981-1990 est clairement commune aux deux périodes d'analyse).

En ce qui concerne les seules valeurs de précipitation, les données de trois autres stations assez proches de l'aire d'enquête, localisées à Simaxis, à Riola Sardo et à Uras, ont été prises en considération. Là encore, les données journalières de précipitations font référence à la période 1961-2010. On a voulu élargir l'analyse à une zone légèrement plus vaste, avec l'intention, étant donné le comportement absolument erratique des précipitations d'un point de vue spatial et leur grande variabilité interannuelle, de saisir des tendances significatives pour certains des indices calculés.

Une autre enquête a porté sur l'analyse des données horaires de précipitation relatives à trois stations du Réseau fiduciaire de la protection civile situées à Oristano, à San Vero Milis et à Bauladu. Dans ce cas, le choix des stations a été conditionné par le type de données recherché (valeurs horaires et non journalières de précipitations), tandis que la période d'analyse (2006-2019) a été limitée par la disponibilité de stations avec des données horaires de précipitation. Les objectifs du projet ADAPT, qui vise principalement à identifier la vulnérabilité du territoire de la commune d'Oristano aux risques d'intenses précipitations et d'inondations, suggère également d'analyser la fréquence des événements avec de fortes intensités horaires.

Enfin, en ce qui concerne l'analyse des scénarios climatiques futurs prévus pour le territoire d'Oristano, il a été fait référence à la base de données du projet EuroCodex, qui rend disponible des données quotidiennes pour l'ensemble de l'Europe, avec résolution spatiale soit à environ 11 km soit à environ 44 kilomètres jusqu'en 2100. On a choisi les modèles *bias-adjusted* qui considéraient les

forces radiatives à la fois à 4,5 et 8,5 W/m². Sur les données quotidiennes, les données pour la zone d'Oristano ont été extrapolées, et les indices qui décrivent le mieux les impacts possibles du changement climatique ont été calculés.

La situation climatique de la région d'Oristano pour la période 1961-2010

Le climat d'Oristano présente des conditions communes à de nombreuses régions de la Sardaigne, caractérisées par un climat méditerranéen intérieur, avec des températures assez élevées pendant la période estivale, des hivers doux et des précipitations réparties principalement entre les mois d'octobre et de mars à avril. Du point de vue bioclimatique, en appliquant la classification bioclimatique de Rivas-Martinez (Rivas-Martinez, 1999), qui prend en considération les caractéristiques lithographiques, morphologiques, climatiques et de couverture végétale du territoire, le climat de la commune d'Oristano peut être classé par un isobioclimat Thermoméditerranéen supérieur, sec inférieur et euocéanique accentué ou atténué, en fonction de la distance par rapport à la mer du territoire.

De l'analyse des données de la station de Santa Giusta pour la période 1961-2010, la température moyenne annuelle de la zone objet de l'enquête est de 16,8°C, la moyenne annuelle des températures maximales est de 22,3°C, alors que la moyenne annuelle des températures minimales est de 11,3°C. Le mois le plus chaud est août (moyenne climatique des valeurs mensuelles de température maximale 31,5°C) alors que le mois le plus froid est janvier présentant une moyenne climatique des valeurs de température minimale du mois de 5,4°C. En ce qui concerne les précipitations, la moyenne annuelle pour la période 1961-2010 considérée est de 565 mm, avec les précipitations concentrées surtout en novembre (environ 98 mm de pluie moyenne mensuelle) et décembre (80 mm de moyenne).

La distribution saisonnière des précipitations prévoit la concentration maximale en automne avec environ 212 mm, environ 37,8% du total, et en hiver (196 mm, environ 34,8%). Le reste des précipitations (moins de 30% du total) est concentré au printemps (23% du total), tandis que durant la saison estivale il ne tombe en moyenne que 23 mm de pluie.

Analyse des températures

La figure 1 montre l'évolution des valeurs climatiques journalières moyennes de la température maximale et minimale pour la période considérée 1961-2010; En ce qui concerne l'année 2010, il est clair que les valeurs les plus basses ont été atteintes en janvier, tant pour les valeurs minimales que pour les valeurs maximales, tandis qu'en août, les valeurs les plus élevées ont été atteintes.

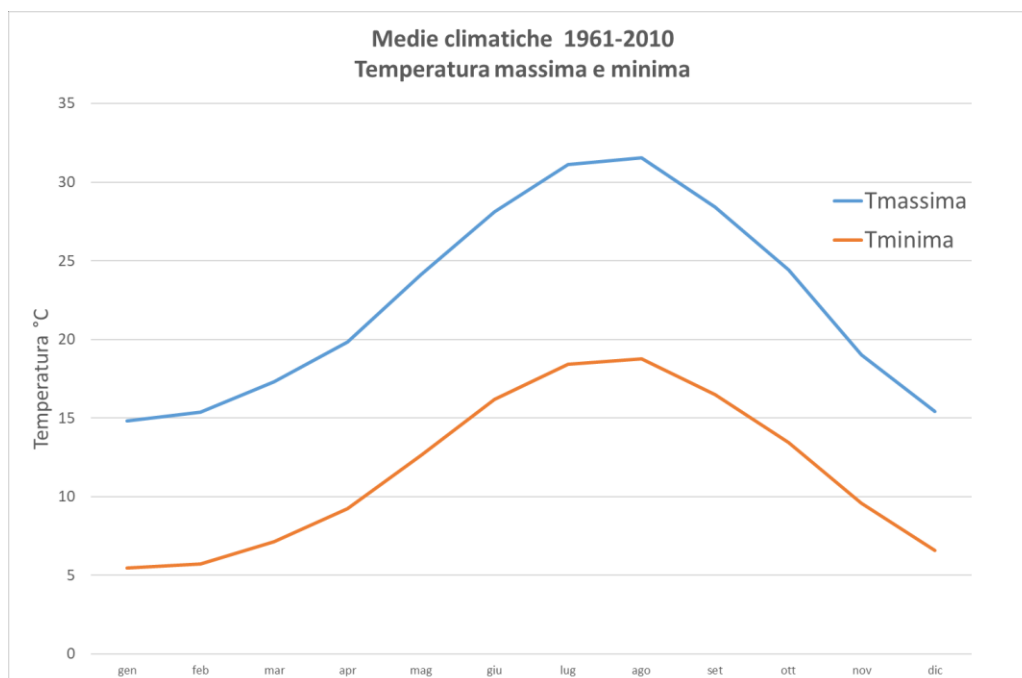
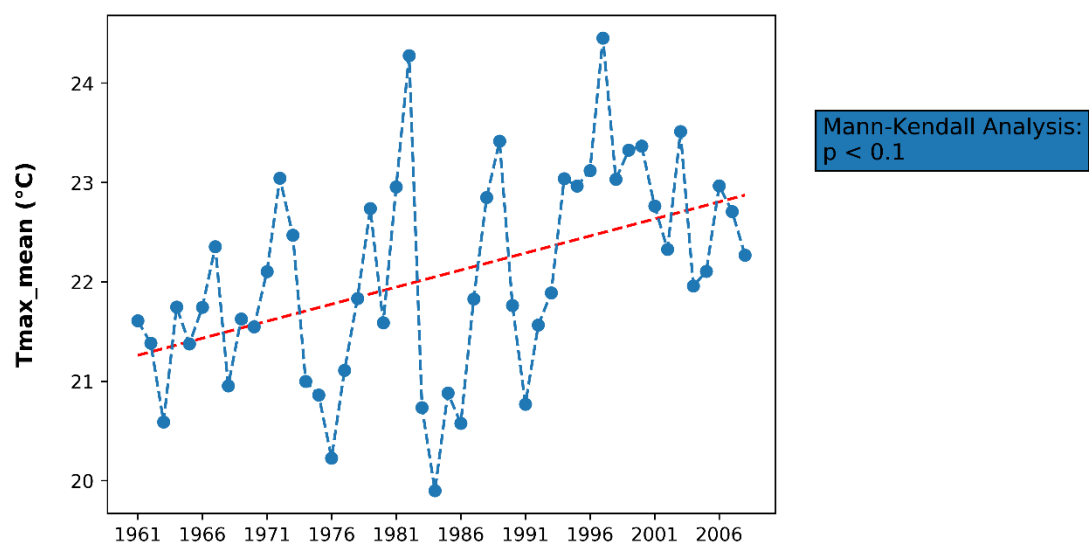


Figure 1

L'analyse des tendances des températures tant maximales que minimales pour les stations de Santa Lucia et Santa Giusta a confirmé l'augmentation des valeurs moyennes annuelles pour les deux grandeurs, telle que décrite dans le dernier rapport de l'IPPC pour le bassin méditerranéen. La figure 2a montre l'évolution des températures maximales et minimales pour la période considérée 1961-2010 pour la station de Santa Lucia, tandis que la figure 2b montre les mêmes tendances pour la station de Santa Giusta.

Comme on peut le voir sur les graphiques, l'augmentation est plus marquée dans les valeurs maximales pour la station de Santa Lucia, alors qu'elle est plus élevée dans les valeurs minimales pour la station de Santa Giusta. Les deux valeurs, les températures maximales moyennes pour la station de Santa Lucia et les températures minimales moyennes pour la station de Santa Giusta, ont passé avec succès les tests de signification de Mann-Kendall que nous avons appliqué à toutes les séries de données historiques disponibles. La figure 3 montre l'évolution des températures moyennes pour les deux stations, où la tendance positive des températures est clairement confirmée.

Santa Lucia: Temperatura massima media annua 1961-2010



Santa Lucia: Temperatura minima media annua 1961-2010

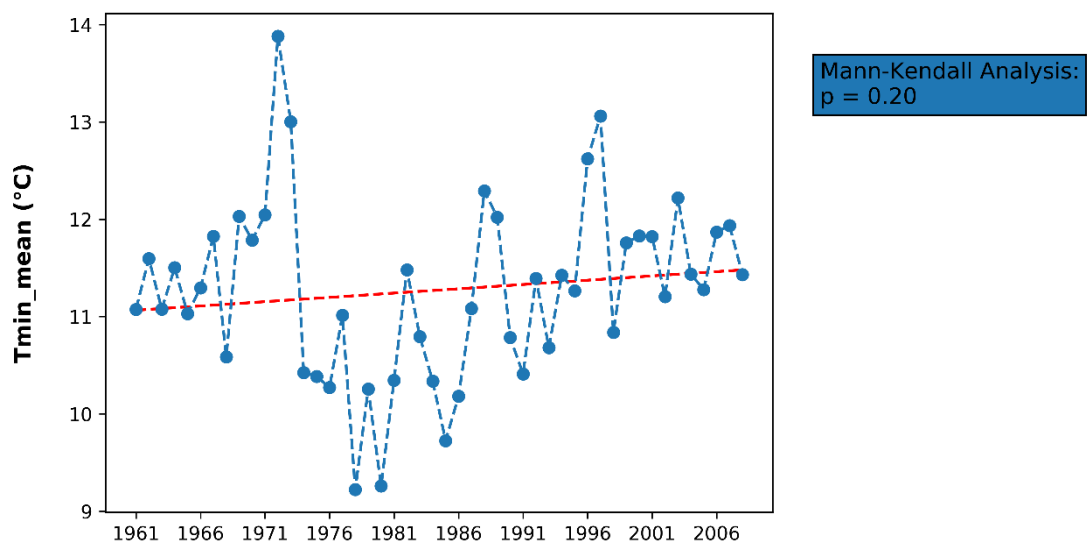
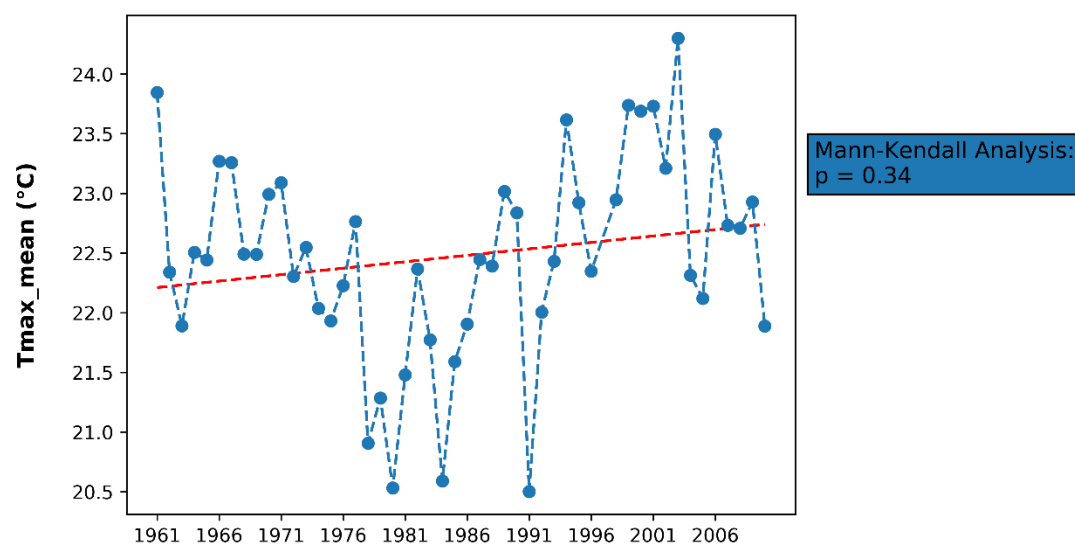


Figura 2a

Santa Giusta : Temperatura massima media annua 1961-2010



Santa Giusta : Temperatura minima media annua 1961-2010

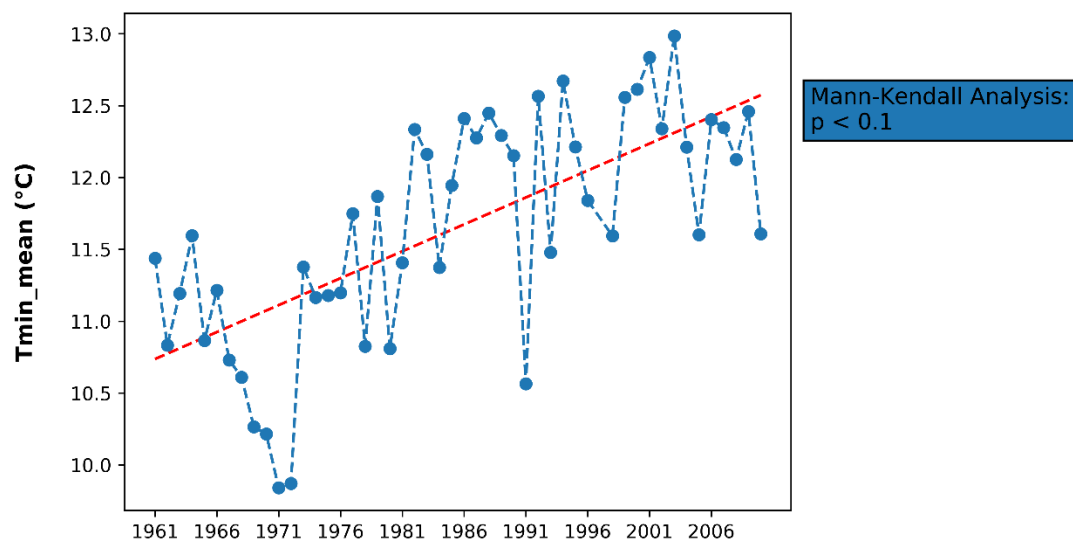
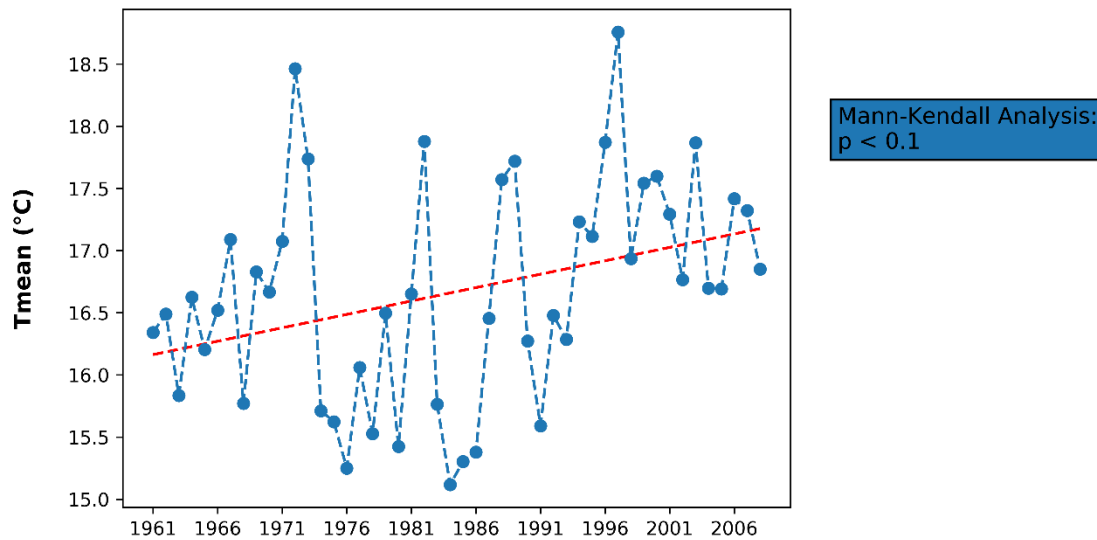


Figure 2b

Santa Lucia: Temperatura media annua 1961-2010



Santa Giusta : Temperatura media annua 1961-2010

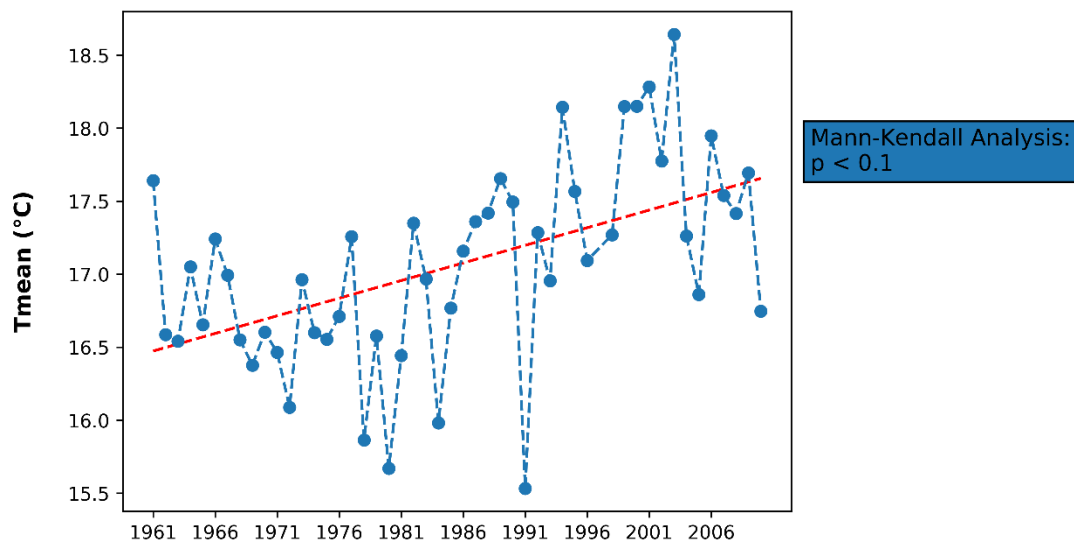
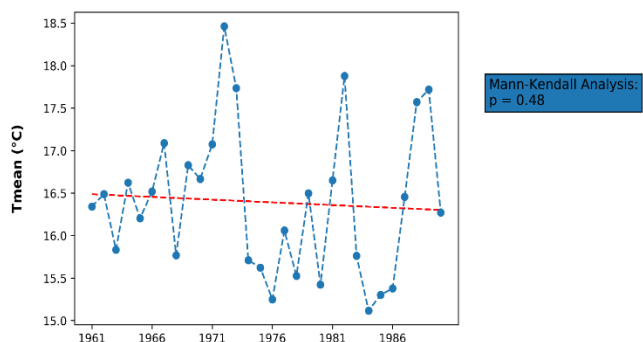


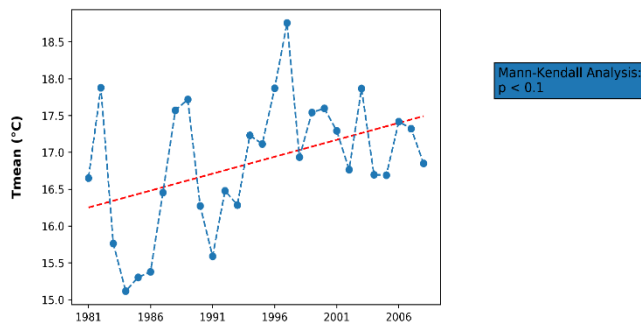
Figure 3

La même analyse, rapportée aux deux périodes en partie superposées 1961-1990 et 1981-2010 (figure 4), montre que l'augmentation des températures s'est produite surtout au cours des trente dernières années, où l'augmentation des valeurs minimales (le plus marqué pour Santa Giusta) et des valeurs maximales (le plus évident pour Santa Lucia) a conduit dans la période 1981-2010 à une augmentation significative de la température moyenne pour les deux stations

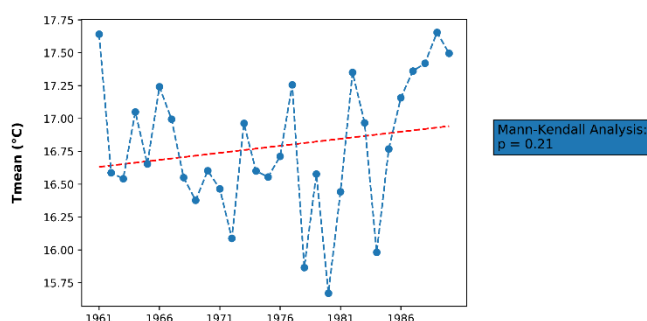
Santa Lucia: Temperatura media annua (Tmean) 1961-1990



Santa Lucia: Temperatura media annua (Tmean) 1981-2010



Santa Giusta : Temperatura media annua (Tmean) 1961-1990



Santa Giusta : Temperatura media annua (Tmean) 1981-2010

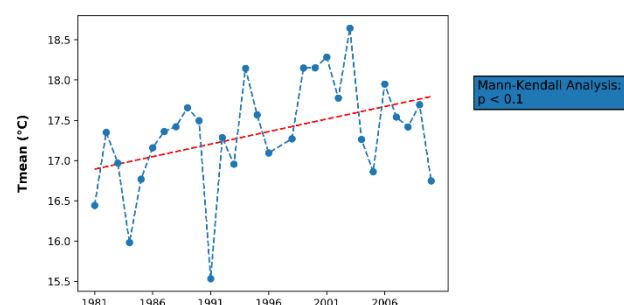
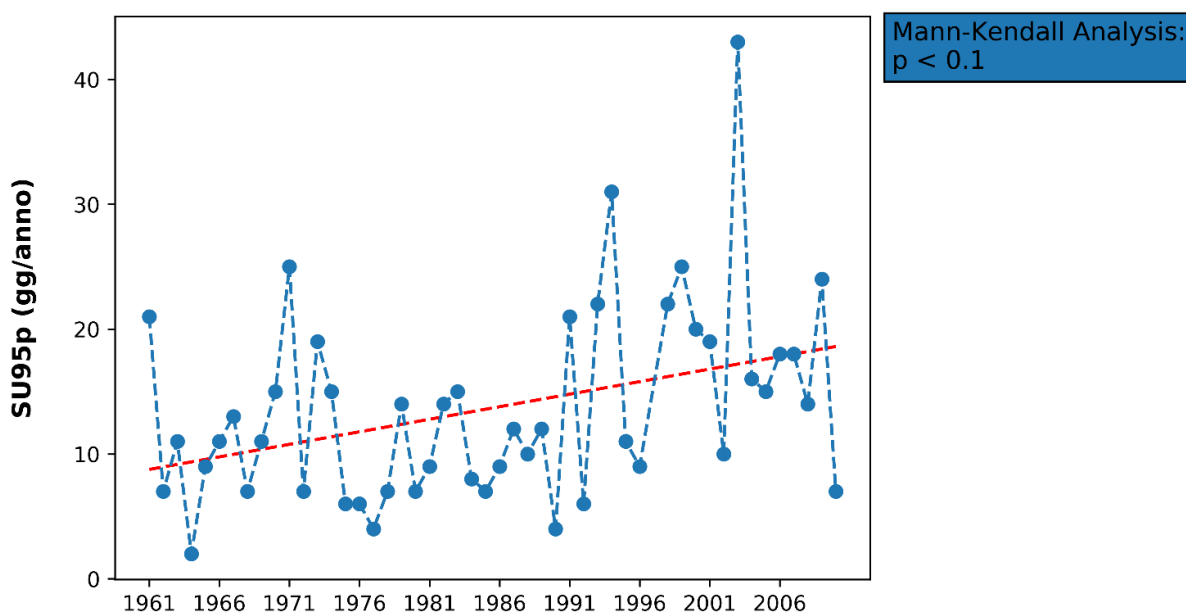


figure 4

L'augmentation des températures tant dans les valeurs maximales que dans les valeurs minimales a des impacts négatifs sur la santé des personnes, sur les écosystèmes agricoles et naturels, et en général sur les équilibres qui règlent le "système climat" dans son ensemble. Un des aspects les plus surveillés, lié à l'augmentation des températures, est constitué par les vagues de chaleur ("heat waves"), c'est-à-dire le nombre de jours consécutifs où la température maximale est égale ou supérieure à 35°C, qui, dans ce cas, représente aussi 95 percentile de la distribution des données de température maximale. Les vagues de chaleur ont surtout des effets négatifs sur la population la plus exposée (en particulier les personnes âgées), ce qui conduit à une gêne croissante à cause de la chaleur excessive, qui peut même être mortelle dans certains cas. Les conditions décrites ci-dessus sont résumées dans l'indice HW (SU95P) dont l'évolution pour les stations de Santa Lucia et Santa Giusta est présentée à la figure 5.

Santa Giusta : Numero di giorni con $T \geq 35^{\circ}\text{C}$ 1961-2010



Santa Lucia: Numero di giorni con $T \geq 35^{\circ}\text{C}$ 1961-2010

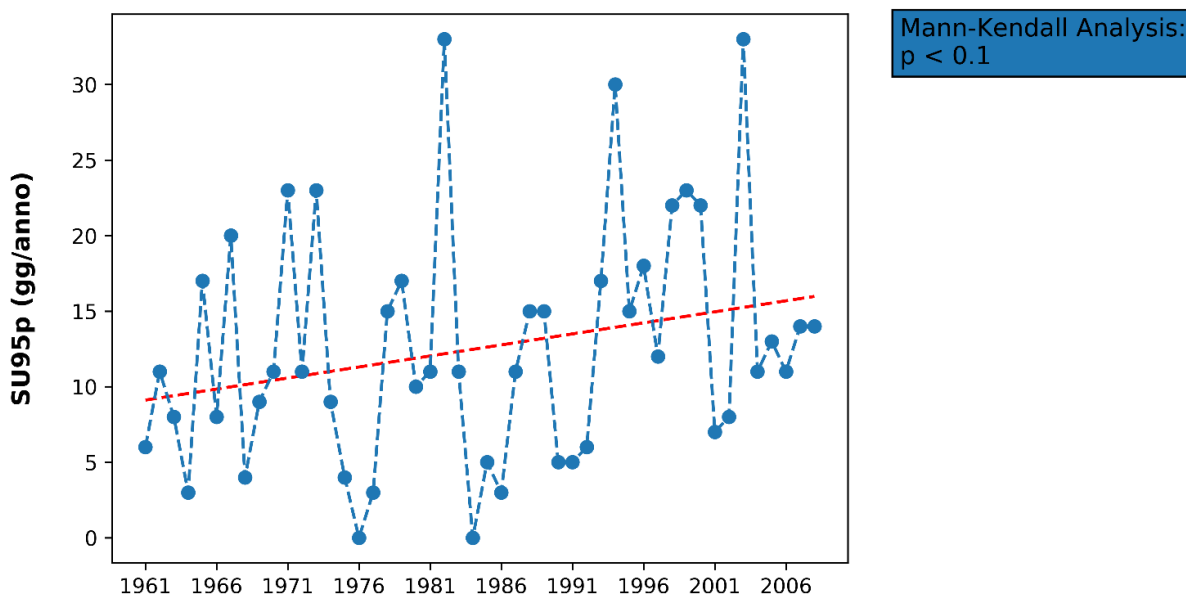
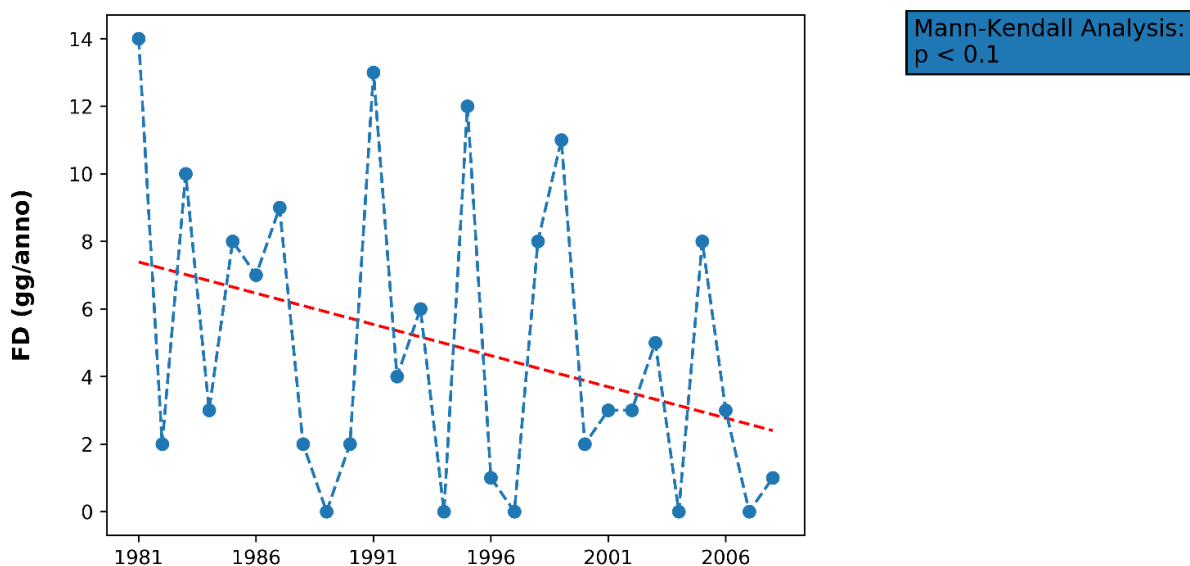


Figure 5

Comme on peut le voir, le nombre de jours/an caractérisé par des valeurs des températures maximales supérieures ou égales à 35°C , tout en affichant une variabilité interannuelle élevée, présente sur la période considérée une évolution globalement croissante, qui exprime un malaise potentiel croissant dû aux vagues de chaleur. En outre, dans les deux cas, au cours des 10 dernières années, la valeur de l'indice a été supérieure à la moyenne des 50 dernières années (12,5 jours/an pour Santa Lucia et 13,6 jours/an pour Santa Giusta) en 7 et 8 ans sur les 10 dernières années disponibles, respectivement.

Un autre indice qui est généralement pris en compte pour définir les changements climatiques est ce qui concerne les jours de gel ou FD (Frost Days), calculé sur la base du nombre de jours/an pendant lesquels les températures minimales journalières sont égales à 0°C ou sont inférieures à ce seuil. Comme on pouvait s'y attendre, malgré la grande variabilité inter-annuelle, compte tenu de l'évolution de la moyenne des valeurs minimales de température tant pour la station de Santa Lucia que pour la station de Santa Giusta, les valeurs de l'indice FD présentent une tendance à la baisse, comme le montrent les graphiques de la figure 6, qui présentent les données relatives à la trentaine 1981-2010.

Santa Lucia: Numero di giorni con $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ (FD) 1981-2010



Santa Giusta : Numero di giorni con $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ (FD) 1981-2010

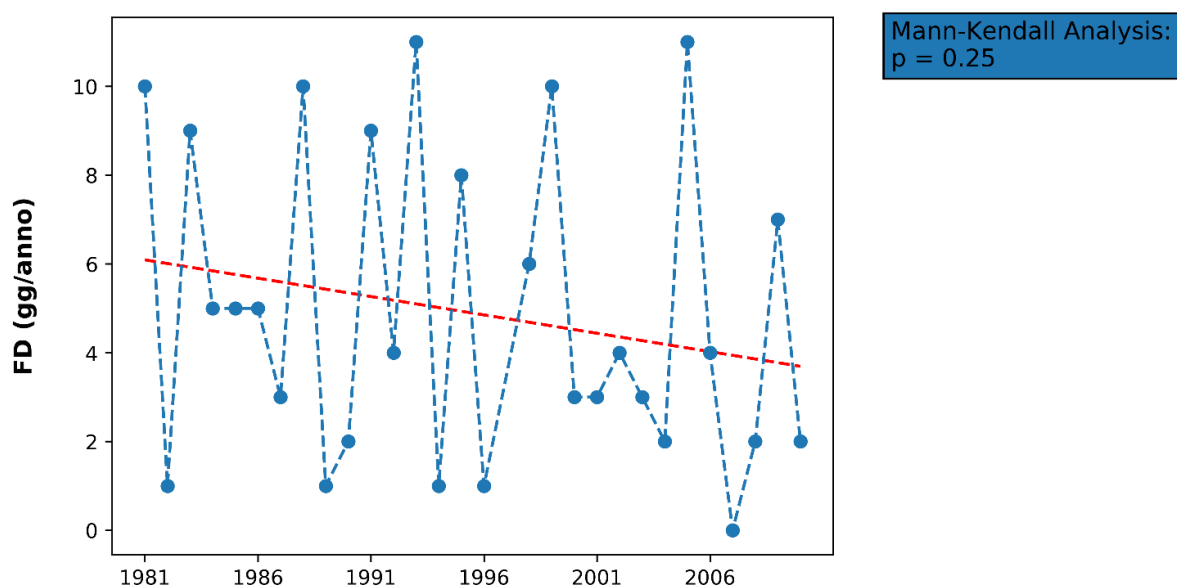


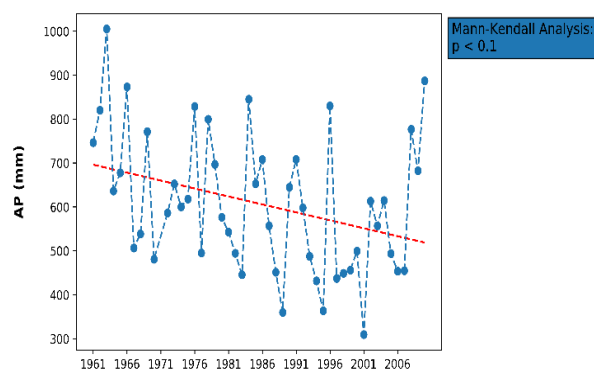
Figure 6

Analyse des précipitations

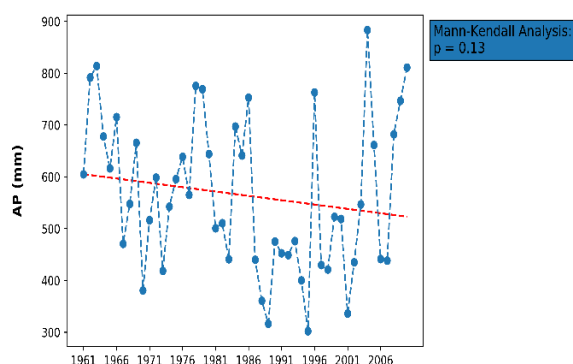
Pour l'analyse des précipitations, comme prévu dans l'introduction, on a eu recours à un plus grand nombre de stations localisées dans la région d'Oristano, donc dans d'autres communes, dans une zone élargie de quelques kilomètres, et avec des caractéristiques climatiques assez semblables à celles de la capitale. En particulier, les séries historiques de cinq stations météorologiques ont été prises en considération (Simaxis, Riola Sardo, Uras, au-delà des déjà mentionnées Santa Lucia et Santa Giusta), et les analyses de tendances et le calcul des indices climatiques ont été effectués.

Compte tenu des données annuelles moyennes de précipitations (exprimées par l'indice AP, annual Precipitation, figure 7), les précipitations annuelles cumulées ont diminué dans toutes les stations considérées, bien que la variabilité interannuelle soit assez élevée et la signification de la faible tendance dans la plupart des cas. Riola Sardo et Simaxis ont enregistré les décrets les plus importants, mais en tout cas à l'intérieur des gammes typiques d'autres aires de la région Méditerranéenne, avec des réductions du cumul annuel de précipitations comprises entre 5 et 10%, avec des pointes de 15% pour la station de Riola Sardo.

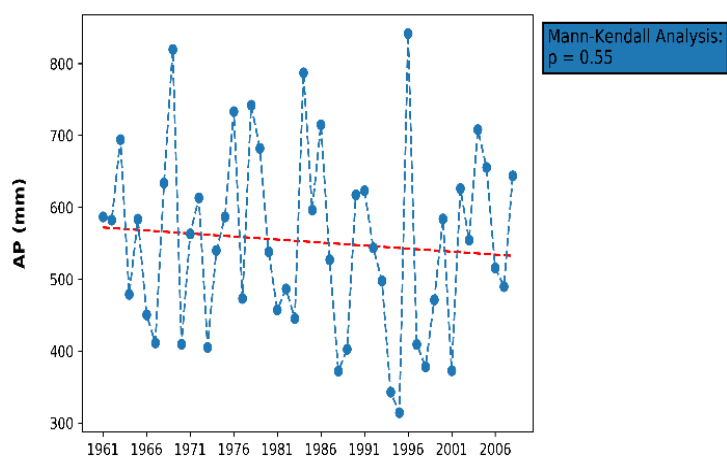
Riola Sardo: Cumulato annuale di precipitazione (AP) 1961-2010



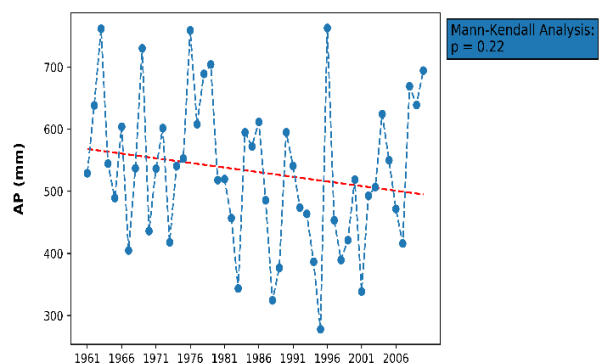
Santa Giusta : Cumulato annuale di precipitazione (AP) 1961-2010



Santa Lucia: Cumulato annuale di precipitazione (AP) 1961-2008



Simaxis: Cumulato annuale di precipitazione (AP) 1961-2010



Uras: Cumulato annuale di precipitazione (AP) 1961-2010

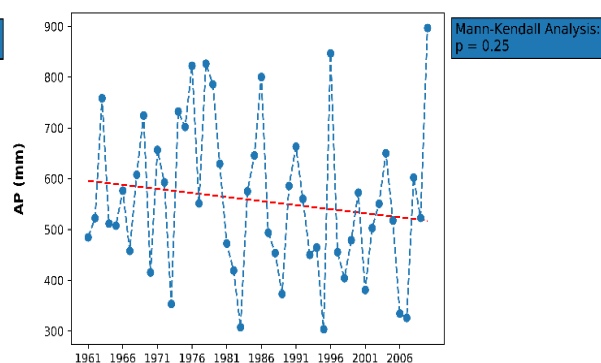
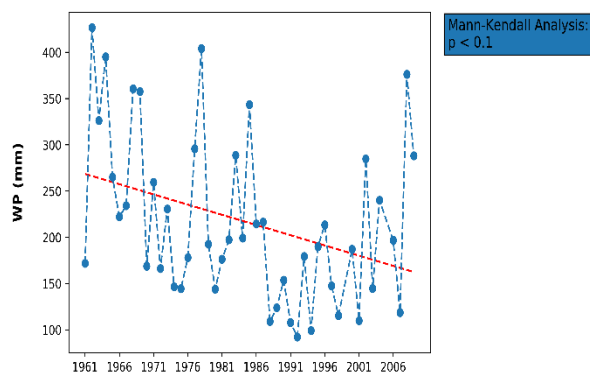


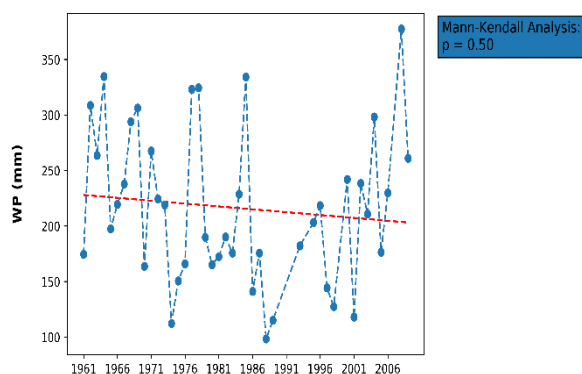
Figure 7

Pour décrire l'évolution des précipitations sur une période donnée, il est nécessaire de décrire, outre le cumul des précipitations, la répartition des précipitations sur l'année. Les deux indices WP (Winter Precipitation) et SP (Summer Precipitation) décrivent l'évolution du cumul moyen des précipitations en hiver et en été. Dans la figure 8, l'évolution des précipitations hivernales est partout décroissante, avec des tendances significatives à l'exception de la seule station de Santa Giusta. Cela signifie que la réduction des précipitations dans la région d'Oristano au cours de la période 1961-2010 s'explique principalement par la réduction des précipitations à la période hivernale, c'est-à-dire la plus pluvieuse après l'automne. La figure 9 montre en effet l'évolution des précipitations des mois de juin, juillet et août, qui n'ont diminué qu'à Santa Giusta et à Simaxis, et non de manière significative.

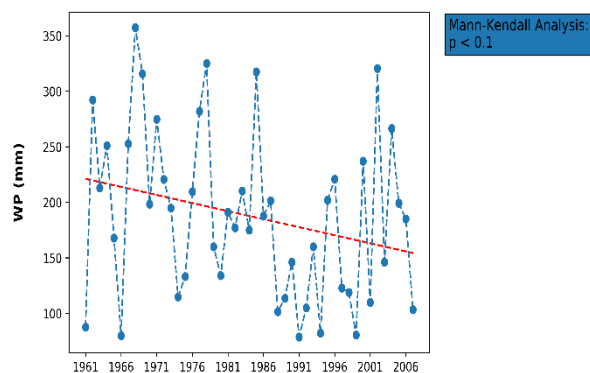
Riola Sardo: Cumulato invernale di precipitazione (WP) 1961-2010



Santa Giusta : Cumulato invernale di precipitazione (WP) 1961-2010



Santa Lucia: Cumulato invernale di precipitazione (WP) 1961-2008



Simaxis: Cumulato invernale di precipitazione (WP) 1961-2010

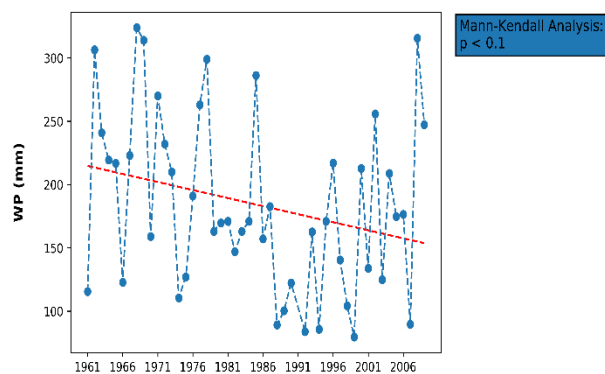
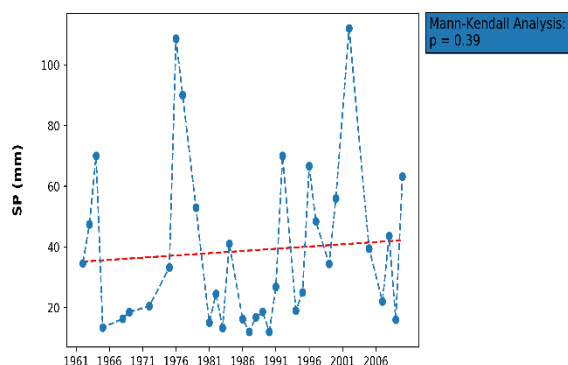
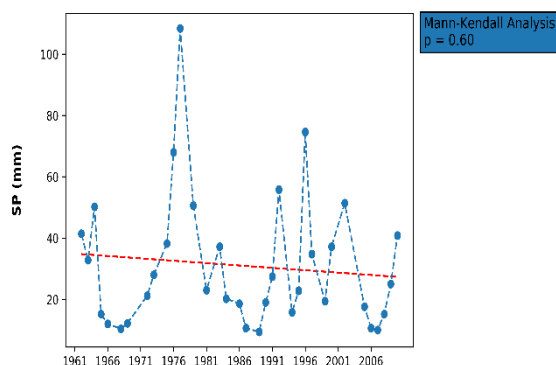


Figure 8

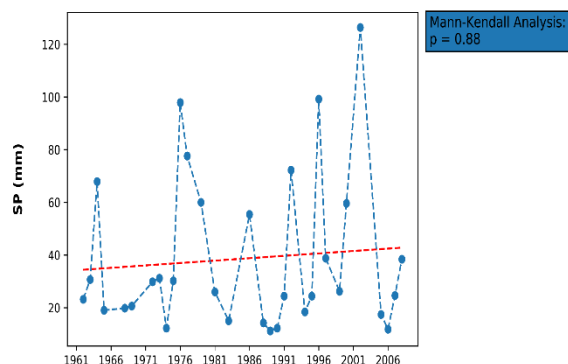
Riola Sardo: Cumulato estivo di precipitazione (SP) 1961-2010



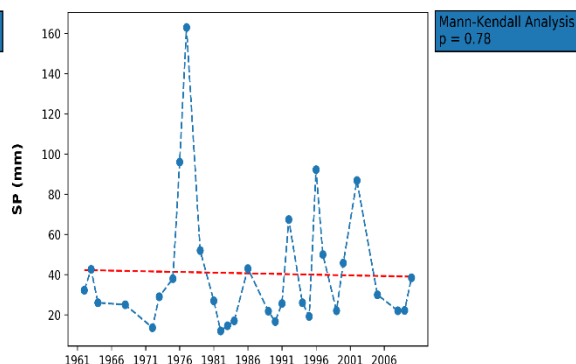
Santa Giusta : Cumulato estivo di precipitazione (SP) 1961-2010



Santa Lucia: Cumulato estivo di precipitazione (SP) 1961-2008



Simaxis: Cumulato estivo di precipitazione (SP) 1961-2010



Uras: Cumulato estivo di precipitazione (SP) 1961-2010

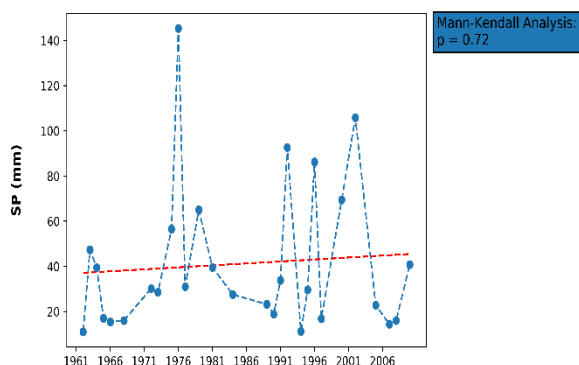
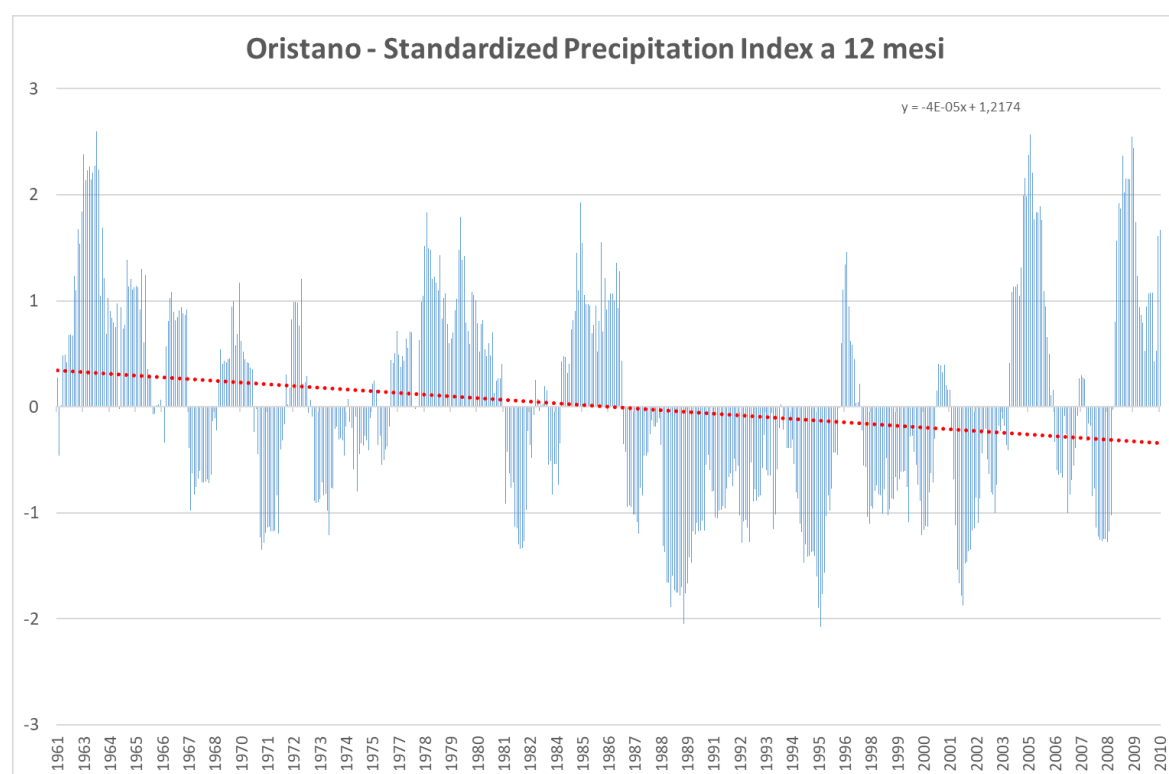


Figure 9

Un des aspects les plus intéressants pour évaluer l'absence de pluie et donc la sécheresse dite "atmosphérique", qui ne prend donc pas en considération les caractéristiques physico-chimiques, morphologiques et d'exposition des sols, concerne l'analyse des périodes de manque de pluie. Un indice reconnu internationalement et calculé sur différentes échelles temporelles est le SPI (Standardized Precipitation Index).

L'Indice de Précipitation Standardisé (McKee et al., 1993) est un indice permettant de quantifier le déficit de précipitations sur différentes échelles de temps, en tenant compte de l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des ressources en eau. Les conditions d'humidité du sol dépendent d'anomalies de précipitations sur une échelle de temps relativement courte; par contre, le sous-sol, les rivières, les bassins, reflètent des anomalies de précipitations à long terme. Pour cette raison, l'IPS est calculé sur des échelles de temps de 3, 6, 12, 24 et 48 mois. Le calcul de l'indice ne nécessite que des données pluviométriques et est effectué en considérant l'anomalie de précipitation par rapport à la valeur moyenne pour une échelle temporelle donnée divisée par son écart type.

Comme la précipitation n'a pas de distribution normale, au moins pour des échelles de temps inférieures à un an, la variable est "ajustée" à volonté de telle sorte que le SPI ait une distribution gaussienne moyenne égale à zéro et un écart type égal à un. Les valeurs de l'indice vont de valeurs positives >2 (conditions de haute ou extrême humidité) à des valeurs négatives <-2 , indiquant des conditions extrêmes de sécheresse).



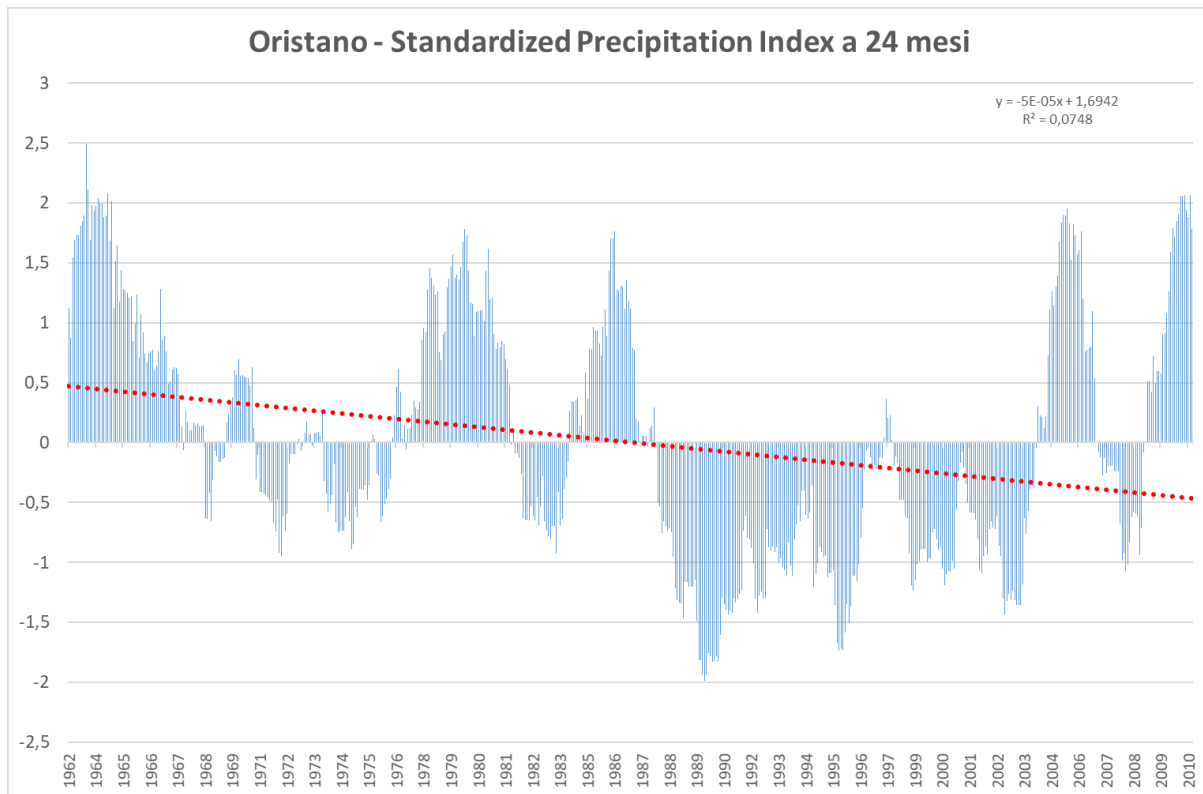


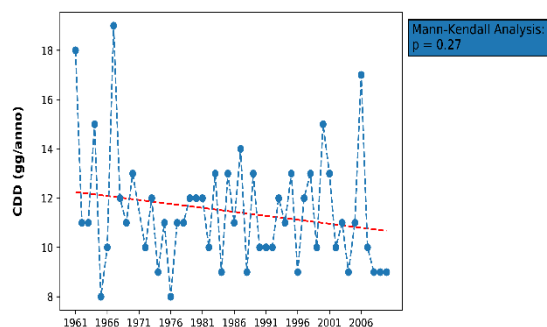
Figure 10

L'analyse des valeurs de l'indice calculé avec des périodes minimales comprises entre un an et 24 et 48 mois (figure 10) pour la station météorologique de Santa Lucia montre une tendance négative pour la période considérée 1961-2010.

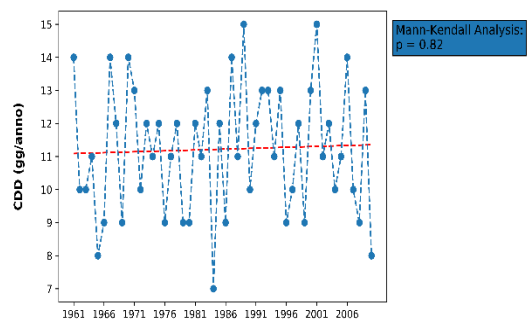
Par souci d'homogénéité dans la description des phénomènes inhérents au projet Adapt et également utilisés pour l'étude des caractéristiques climatiques des villes d'Alghero et de Sassari, l'indice CDD (Consécutif Dry Days) également utile pour détecter les périodes exemptes de précipitations.

L'indice est calculé par comptage du nombre de jours consécutifs de précipitations d'au moins 1 mm/jour (seuil fixé par convention), dont la valeur maximale est prise en considération pour chaque année. La figure 11 montre l'évolution de l'indice CDD pour les cinq stations analysées, exprimée en nombre de jours/an.

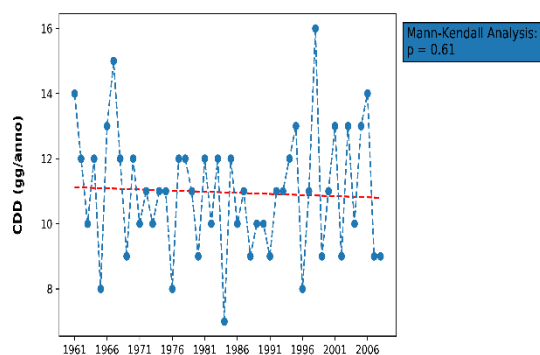
Riola Sardo: Media annuale del numero di giorni non piovosi consecutivi 1961-2010



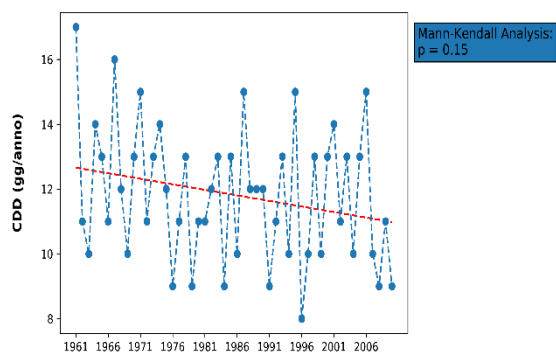
Santa Giusta : Media annuale del numero di giorni non piovosi consecutivi 1961-2010



Santa Lucia: Media annuale del numero di giorni non piovosi consecutivi 1961-2008



Simaxis: Media annuale del numero di giorni non piovosi consecutivi 1961-2010



Uras: Media annuale del numero di giorni non piovosi consecutivi 1961-2010

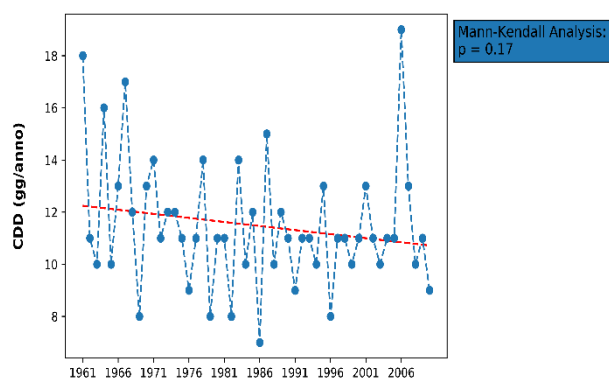
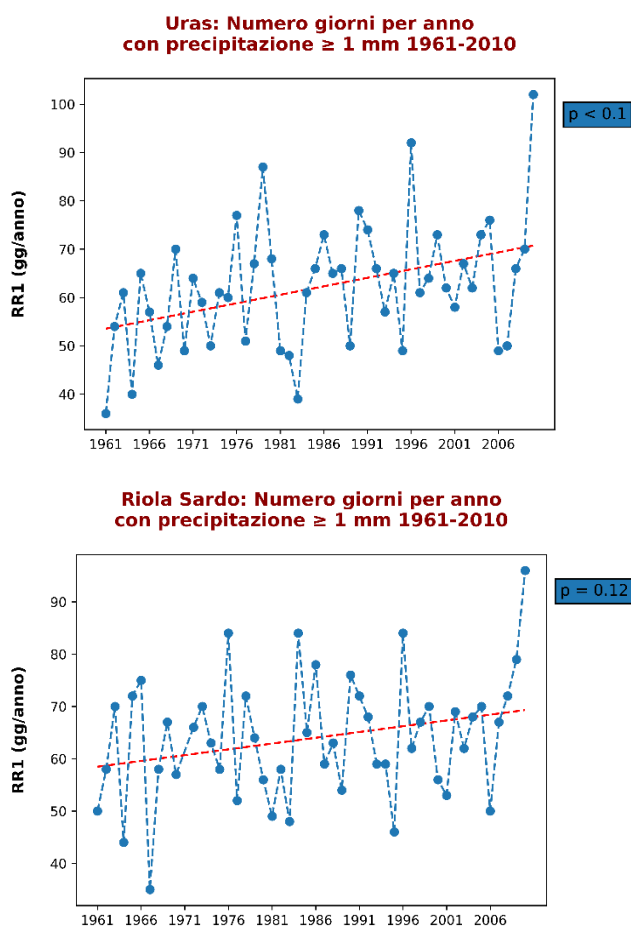


Figure 11

L'indice présente des valeurs avec une grande variabilité interannuelle et peu significative du point de vue de la tendance possible, comme le démontrent les valeurs de l'indice p du test de Man-Kendall. On peut conclure qu'à des années plus sèches (c'est-à-dire à des périodes sèches plus fréquentes), on alterne des années avec des intervalles beaucoup plus courts entre un événement pluvieux et le suivant, avec une grande variabilité entre les minimums et les maximums.

Plus intéressante est l'analyse des extrêmes de précipitations et des indices qui en décrivent les caractéristiques. En particulier, l'évolution du nombre de jours de pluie (c'est-à-dire le nombre de jours/an avec des précipitations supérieures ou égales à 1 mm), décrite par l'indice RR1, montre comment le nombre de jours de pluie, malgré la diminution du cumul annuel moyen de précipitations (indice AP, figure 7), il présente une tendance non univoque dans l'aire d'Oristano, parfois croissante (Uras, Riola Sardo, Simaxis), tandis que dans les cas de Santa Giusta et de Santa Lucia décroissante. Notez que l'évolution n'est statistiquement significative que pour les données calculées pour la station d'Uras.



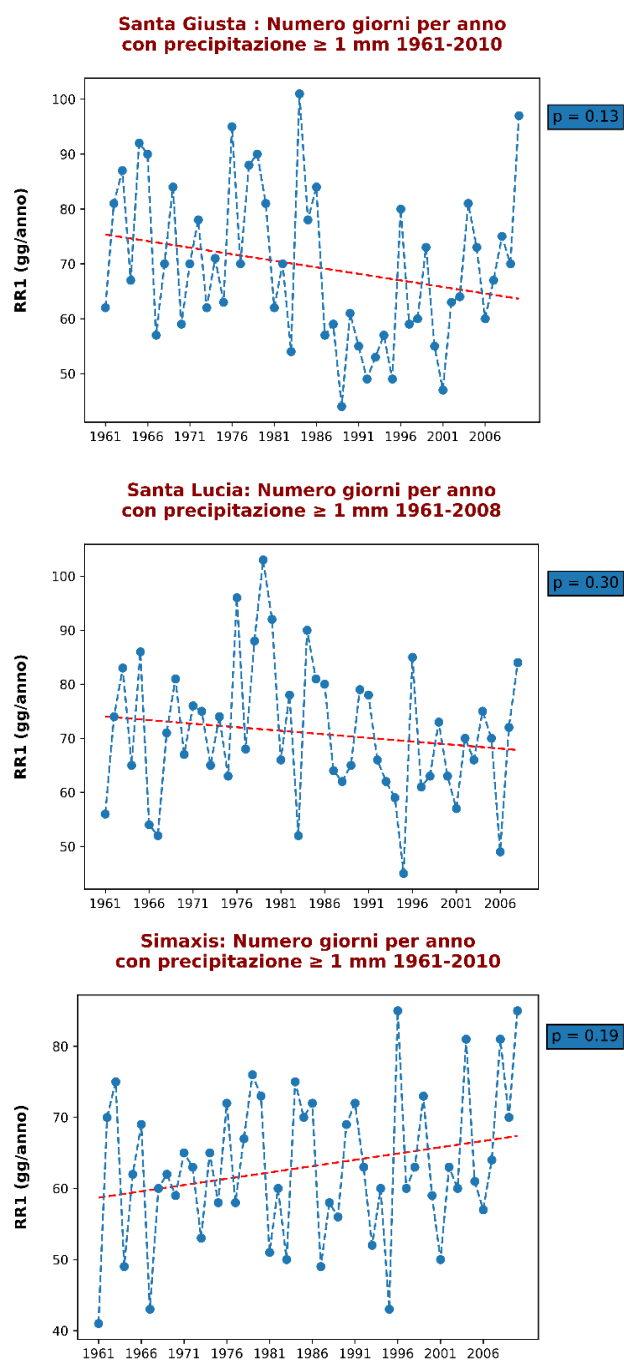
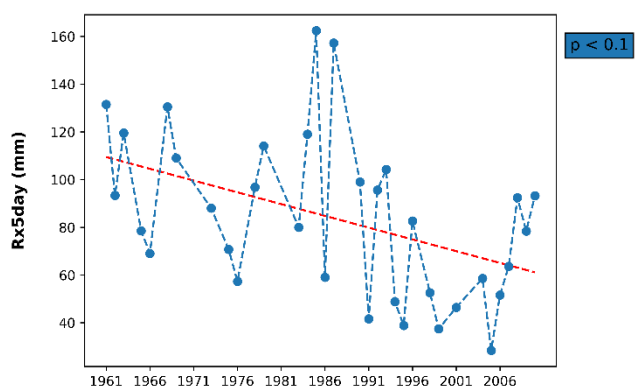


Figure 12

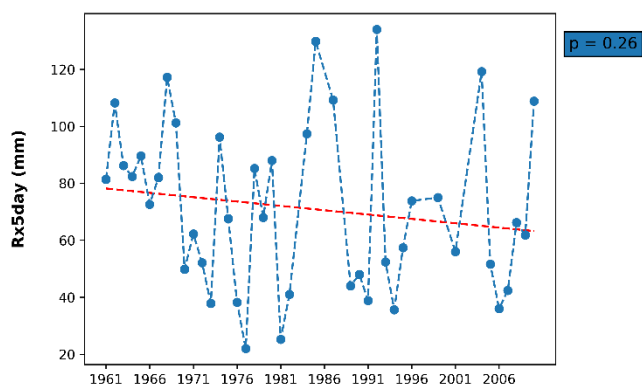
Même le nombre d'épisodes en une année avec au moins 5 jours consécutifs de pluie (indice RX5day) a une tendance décroissante, soit comme nombre d'épisodes, soit comme cumulé de pluie de précipitations en jours consécutifs, comme le montre la figure 13.

Ceci peut être observé pour toutes les stations étudiées pour décrire l'évolution des précipitations dans la zone d'Oristano.

**Riola Sardo: Massimo annuale
di precipitazione su almeno 5 giorni consecutivi 1961-2010**



**Santa Giusta : Massimo annuale
di precipitazione su almeno 5 giorni consecutivi 1961-2010**



**Uras: Massimo annuale
di precipitazione su almeno 5 giorni consecutivi 1961-2010**

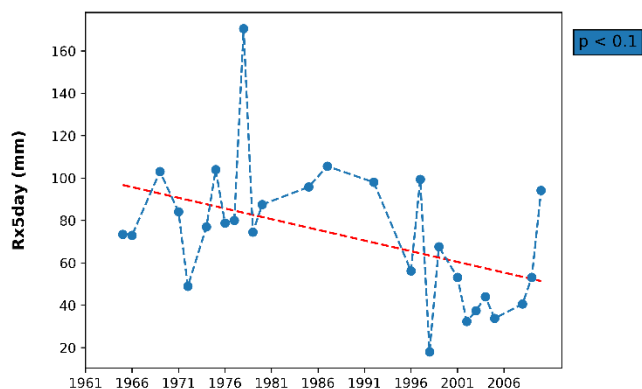


Figure 13

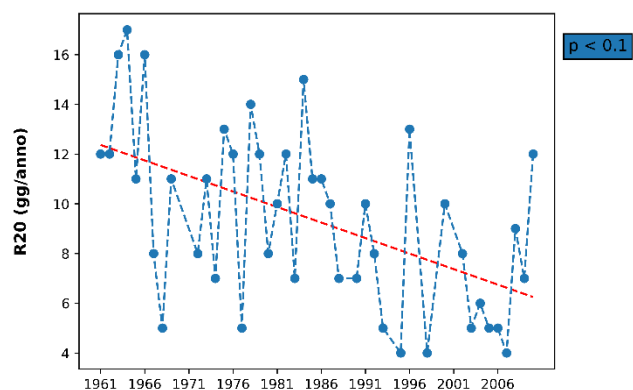
Une évaluation supplémentaire a été effectuée à travers l'indice R20 de l'ETCCDI utilisé pour déterminer le nombre de jours/an caractérisés par des événements de précipitations d'au moins 20 mm sur une période de 24 heures.

Comme on peut le voir à la figure 14, d'après les données enregistrées dans les stations de Santa Giusta et Santa Lucia, le nombre de journées pluvieuses diminue ou reste plus ou moins constant,

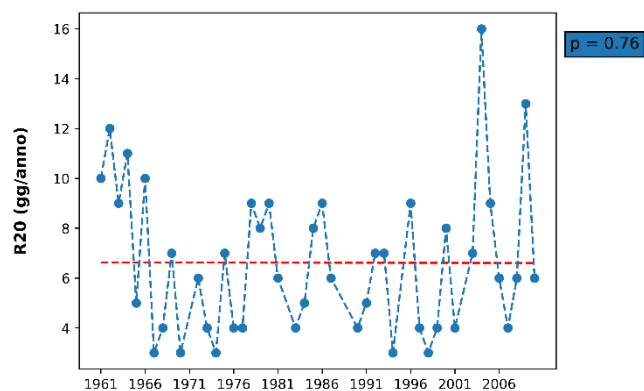
tandis que pour les stations de Riola Sardo, Simaxis et Uras l'évolution est dégressive, avec une significativité suffisante pour la station de Riola Sardo.

Ainsi, même en ce qui concerne les jours de pluies abondantes, l'évolution dans les années des stations prises en considération n'est pas univoque.

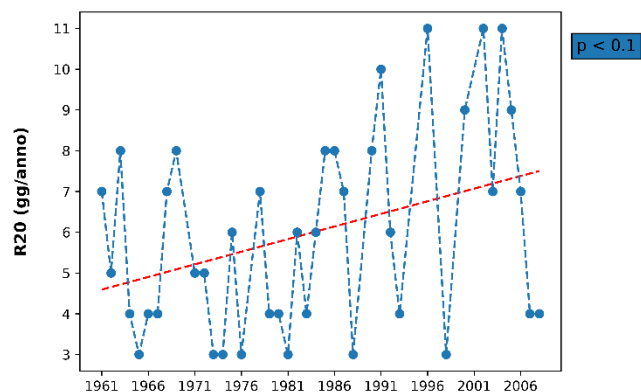
Riola Sardo: Numero giorni piovosi per anno 1961-2010



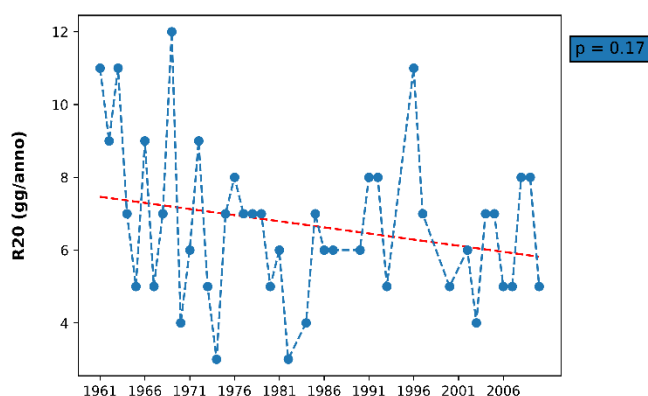
Santa Giusta : Numero giorni piovosi per anno 1961-2010



Santa Lucia: Numero giorni piovosi per anno 1961-2008



Simaxis: Numero giorni piovosi per anno 1961-2010



Uras: Numero giorni piovosi per anno 1961-2010

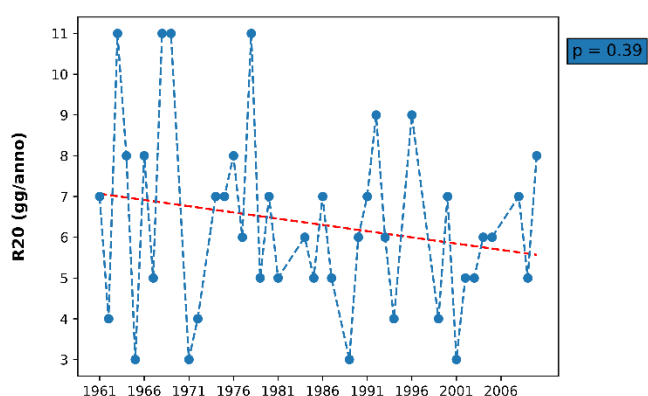
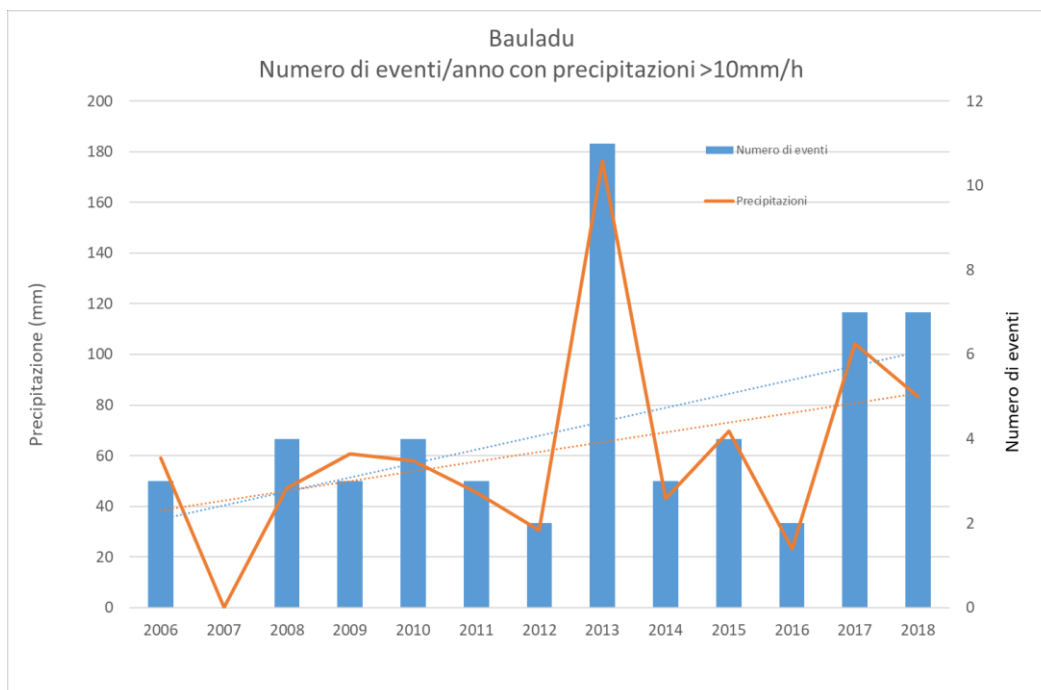
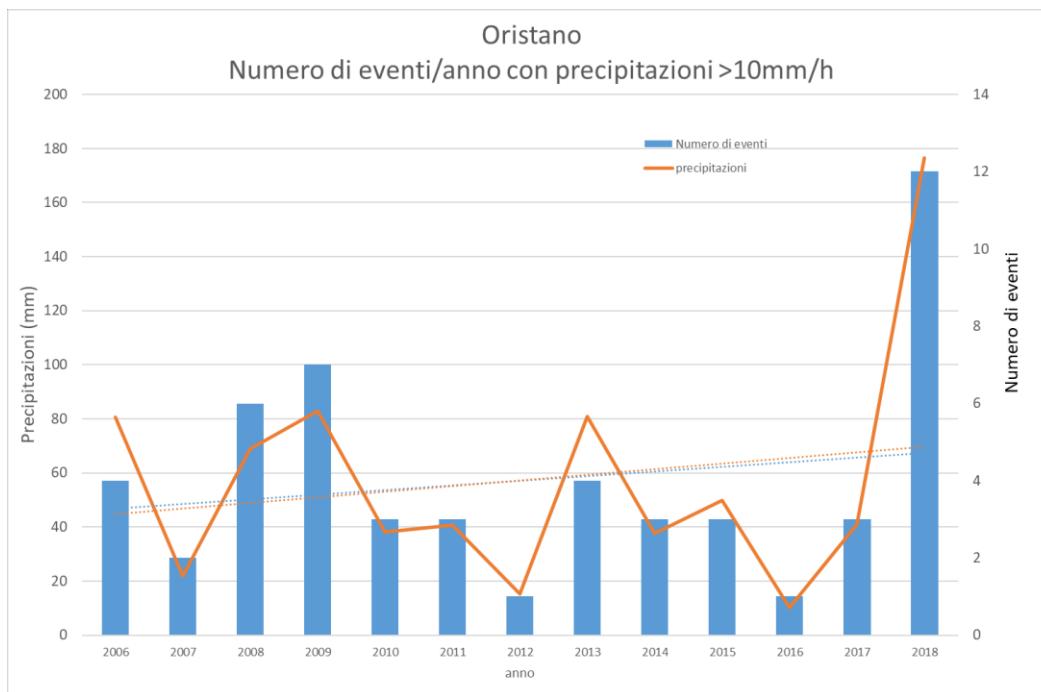


Figure 14

Une étude plus approfondie de l'évolution des précipitations prévoit l'analyse des données horaires et permet d'évaluer l'évolution des épisodes intenses de pluie. Pour ce faire, les données horaires de précipitation de trois stations météorologiques de l'aire d'étude ont été prises en compte, une qui se trouve dans la commune d'Oristano, une située dans la commune d'Uras et une dans la commune de Bauladu. En particulier, les événements ayant des intensités de précipitations supérieures à 10 mm/h ont été identifiés et considérés comme une précipitation moyenne/élevée dans la bibliographie.

L'analyse des données horaires des précipitations des trois stations considérées, comme le montre la figure 15, montre que le nombre d'événements intenses a augmenté en 2006-2018 (histogrammes bleus) soit la quantité de pluie tombée sous forme de précipitation intense (ligne orange).

Malheureusement, l'absence de séries de données à l'échelle horaire suffisamment longue ne permet pas une analyse plus significative du point de vue climatique. Toutefois, il est intéressant de noter que le nombre de précipitations intenses a augmenté au cours des 13 dernières années et que le cumul des précipitations représente une part plus importante des précipitations annuelles totales.



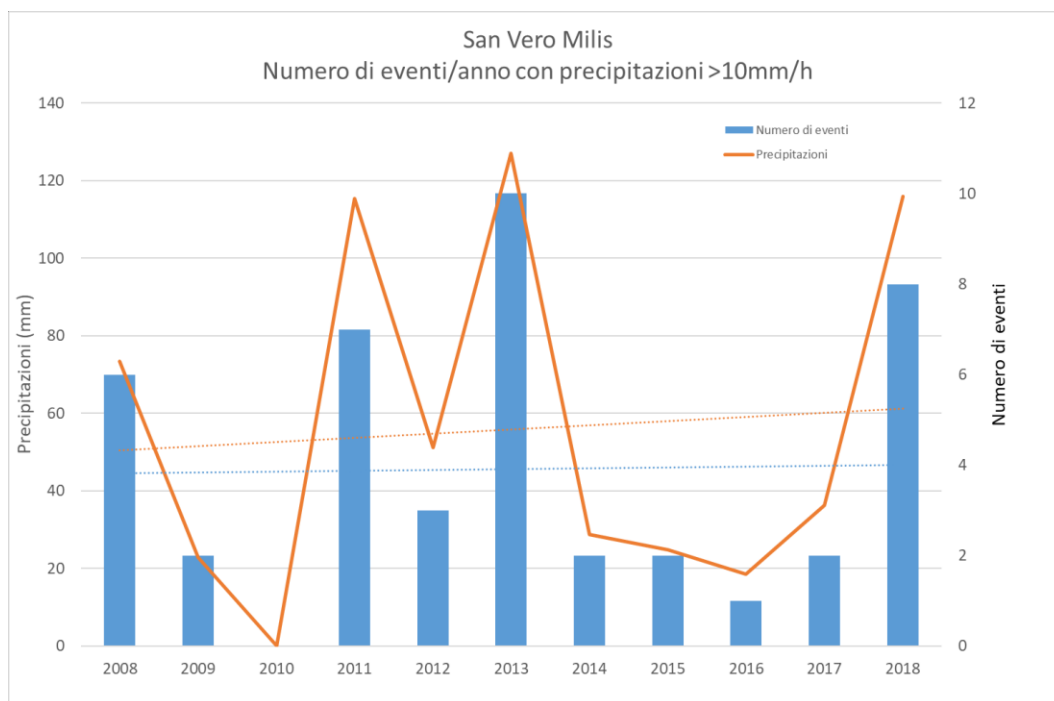


Figure 15

Considérations sur la situation climatique, 1961-2010

En résumé, on constate que:

- L'analyse des données de la période 1961-2010 fait apparaître une réduction des précipitations annuelles, cela s'accompagne d'une augmentation des températures maximales et minimales ainsi que de l'augmentation des vagues de chaleur et des nuits tropicales. C'est vrai pour pratiquement toutes les données relatives aux stations considérées.
- En ce qui concerne les précipitations, s'il est vrai que le cumul annuel diminue dans l'ordre de grandeur de la région méditerranéenne, il est vrai aussi que les précipitations caractérisées par des quantités journalières élevées (indicateur R20) présentent des tendances inégales, tandis que le nombre d'événements avec au moins 5 jours consécutifs de pluie (Rx5day) affichent la même tendance décroissante pour toutes les stations. Il n'est donc pas simple de donner une signification statistique univoque à la distribution des précipitations pour la région d'Oristano, de sorte que des événements avec des cumuls élevés ne s'accompagnent pas toujours d'événements de précipitations intenses
- L'analyse des données horaires des trois zones météorologiques considérées montre comment les précipitations d'une intensité > 10 mm/h augmentent en nombre et en quantité de pluie.

Analyse des scénarios climatiques futurs

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur le territoire de la municipalité d'Oristano, parmi les différentes solutions qui pouvaient être adoptées, on a eu recours aux données des modèles climatiques mis à disposition par la plate-forme Euro-Cordex, créée par la Task Force for Regional Climate Downscaling du World Climate Research Programme (www.eurocordex.net).

L'interface créée par CORDEX fournit un accès facile aux données climatiques à ceux qui souhaitent utiliser les simulations climatiques pour des études d'impact, d'adaptation et d'atténuation. Les ensembles de simulations de différents modèles sont calculés sur une grille avec une résolution d'environ 12 km (0,11 degré), en prenant en considération différents scénarios caractérisés par des valeurs différentes de *Representative Concentration Pathways*, c'est-à-dire des concentrations croissantes d'émissions de gaz climato-alterants et donc d'énergie radiative (typiquement 2.6, 4.5, 6.5 et 8.5 W/m²).

Dans notre étude sur le climat d'Oristano, en particulier, ont été choisis deux modèles et deux scénarios pour chaque modèle, les modèles ont été choisis en fonction de l'exhaustivité des scénarios disponibles (tous les modèles d'EUROCORDEX ne présentent pas tous les scénarios et les RCP possibles) ni les périodes de projection (certains modèles n'arrivent qu'en 2050, par exemple).

Le premier modèle a été mis au point par l'Institut Pierre Simone Laplace français (ci-après dénommé ISPLA_CM5A ou CM5A) et le deuxième modèle a été réalisé par l'Institut Météorologique National du Danemark, connu sous l'acronyme DIM_HIRHAM ou Hirham.

Deux scénarios de RCP différents de 4,5 W/m² et 8,5 W/m² ont été choisis pour les deux modèles. Les modèles ont été initialisés à partir des données de la base climatique 1986-2018 et ont été *bias corrected* pour homogénéiser le résultat relatif à la Région Euro-méditerranéenne avant leur insertion à l'intérieur de la plate-forme Euro-Cordex. Par rapport aux données originales, on a procédé à un downscaling statique pour la zone de la commune d'Oristano, en prenant en considération les données relatives à 6 pixels sur lesquelles on peut inscrire le territoire de la commune. Les données provenant des six pixels ont ensuite été transformés en moyenne pour la facilité de calcul. **Les scénarios climatiques futurs couvrent la période 2020-2070, mais on a considéré comme deux sous-périodes différentes, l'une couvrant la période 2020-2040 et l'autre la période 2041-2070.** Les grandeurs considérées sont la température dans les valeurs maximales et minimales journalières et les précipitations journalières.

La figure 16 présente la comparaison entre la base climatique 1986-2018 utilisée pour les scénarios climatiques futurs, et enfin les résultats de l'élaboration du modèle IPSL_CM5A à 2020-2040 et à 2041-2070 pour les deux scénarios RCP 4,5 et 8,5. Comme on peut le voir, il y a dans les deux scénarios une augmentation des températures aussi bien dans les valeurs minimales que maximales, avec des conditions plus strictes pour la période 2041-2070 et le RCP 8,5. Les différences de température par rapport au climat de référence 1986-2018, comme le montre le tableau 1, atteignent des valeurs de + 0,7 et + 0,6 degrés pour les valeurs minimales et maximales 2040, et de +2,4 et + 2,6°C pour les valeurs 2070. Cette tendance est également confirmée par les valeurs du scénario RCP 8,5 avec une

augmentation attendue de la température des valeurs minimales et maximales à 2070 de +3,3 et +3,5 °C, respectivement.

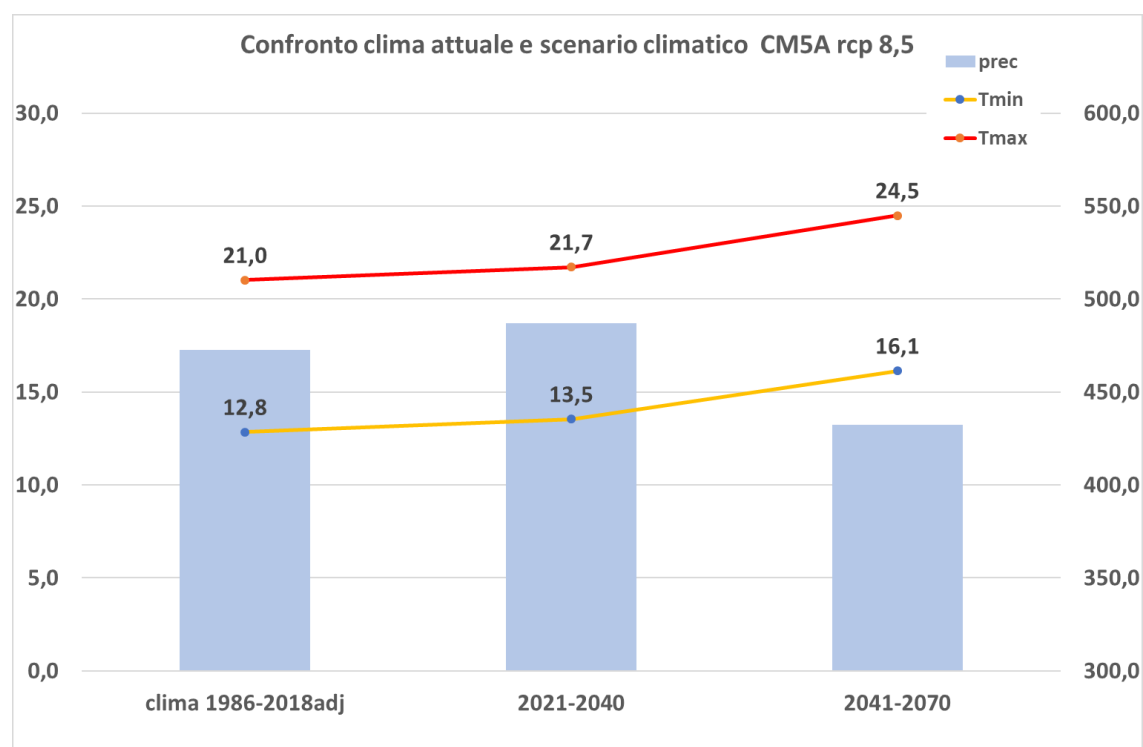
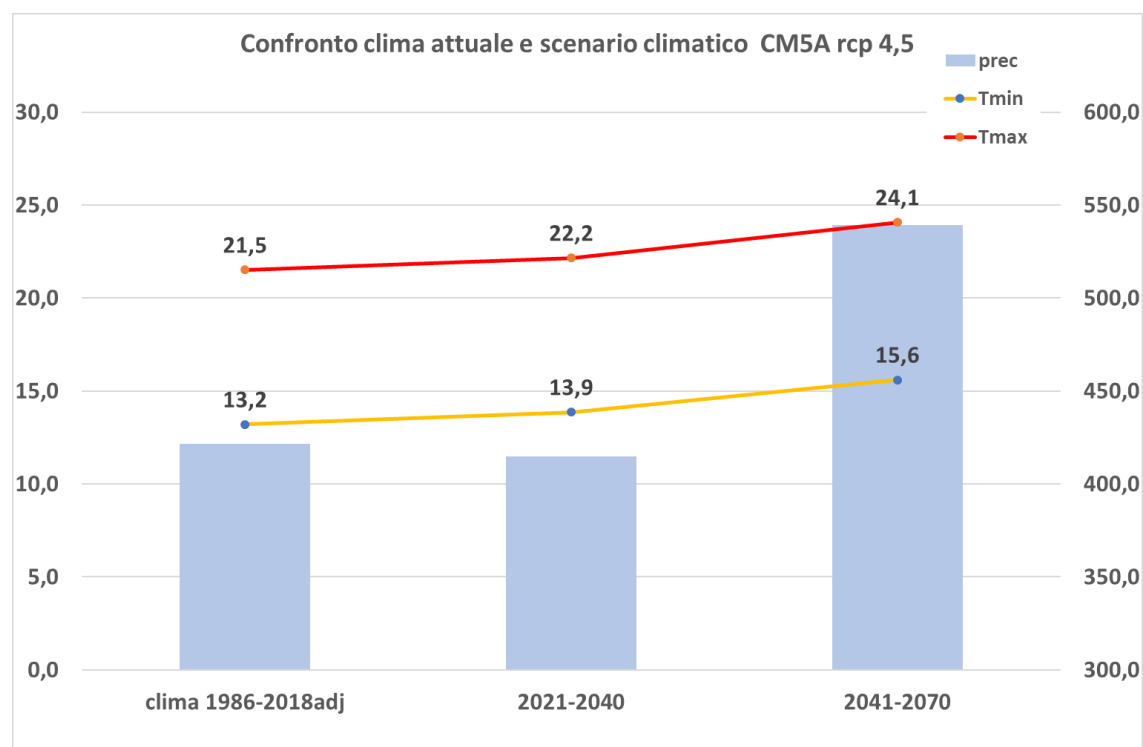


Figure 16 – Scénario climatique de l’Institut Pierre Simon Laplace CM5A pour la période 2020-40 et 2041-70 pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 W/m2.

	CM5A rcp 4,5			CM5A rcp 8,5		
	0,7	0,6	-6,9	0,7	0,7	14,2
	2,4	2,6	117,4	3,3	3,5	-40,3

Tableau 1. Valeurs de température minimale et maximale, et précipitations prévues en 2040 et 2070 pour les scénarios RCP 4,5 et 8,5 pour la zone d'Oristano par rapport à la base climatique 1986-2018 selon le modèle CM5A.

Les prévisions de précipitations semblent plus controversées, tant en ce qui concerne l'ampleur que le signal des variations. En effet, le modèle CM5A ne prévoit pas de changement pour le scénario RCP 4,5 à 2040, tandis qu'une augmentation de 117 mm est indiquée en 2070 par rapport au scénario cumulatif moyen annuel de la période climatique de départ. Le scénario RCP 8,5 montre un comportement exactement opposé pour les précipitations, avec une légère augmentation à 2040, et une réduction d'environ - 8,5%.

Le modèle Hirham (voir fig. 17) montre dans les deux scénarios RCP 4,5 et 8,5 une augmentation des températures tant dans les valeurs minimales que dans les maximales, mais pas aussi sévère que les scénarios proposés par le modèle CM5A, alors que ce dernier modèle prévoyait pour le scénario force radiative majeur RCP 8,5 une augmentation de 3,2 et 3,5 °C pour les températures minimales et maximales, respectivement, le modèle Hirham (cf. tableau 2) en 2070 montre une différence avec la base climatique *bias adjusted* 1986-2018 de 2,7°C pour les températures minimales et de 2,1 °C pour les températures maximales dans le scénario le plus extrême RCP 8,5. De même, les variations des précipitations cumulées sont inférieures à 10%, avec un maximum d'environ 30 mm par rapport aux valeurs de la période 1986-2018.

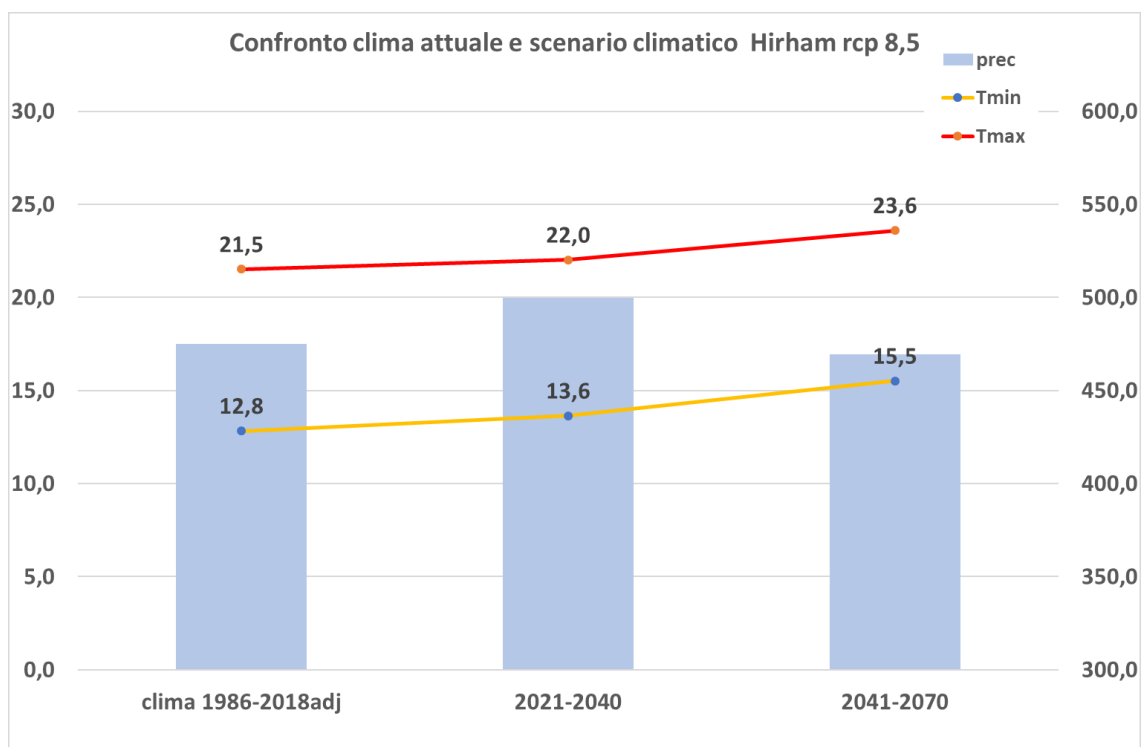
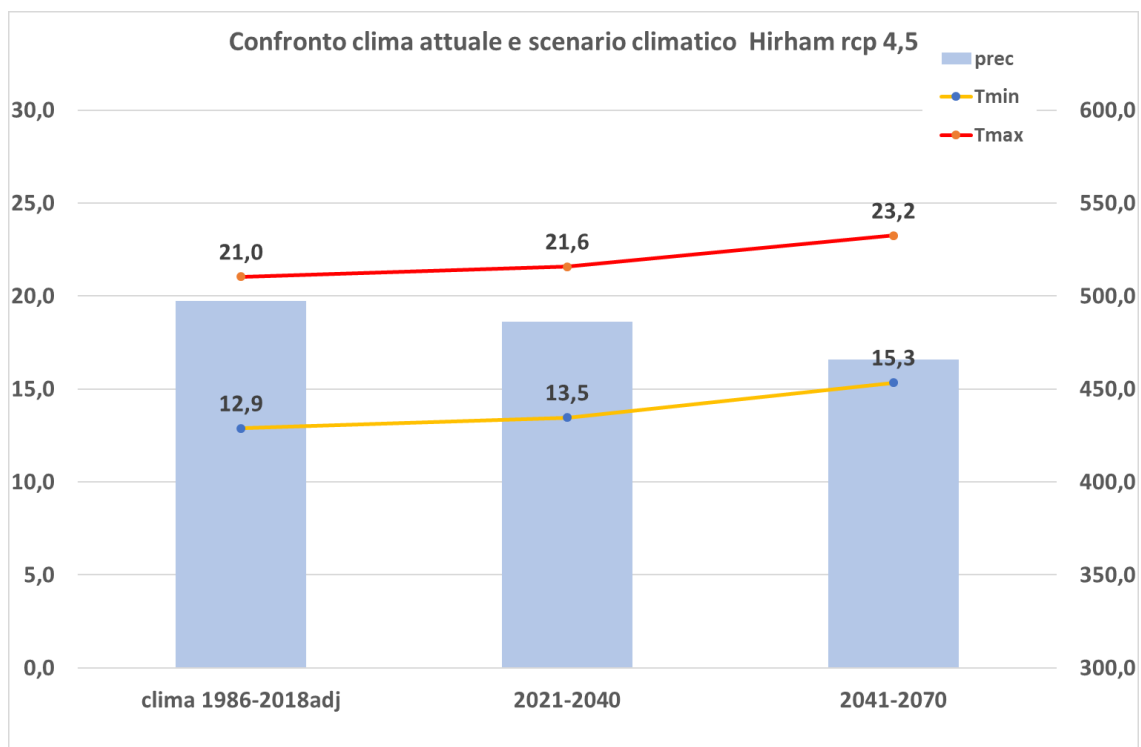


Figure 17 – Scénario climatique du Denmark Institute for Meteorology Hirham pour les périodes 2020-40 et 2041-70 pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 W/m².

	Hirham-4,5			Hirham-8,5		
	0,6	0,6	-10,8	0,8	0,5	24,9
	2,5	2,2	-31,4	2,7	2,1	-5,7

Tableau 1. Valeurs des températures minimum et maximum, et précipitations prévues de 2040 à 2070 per les scénarios RCP 4,5 et 8,5 pour la zone d’Oristano par rapport à la baseline climatique 1986-2018 selon le modèle Hirham.

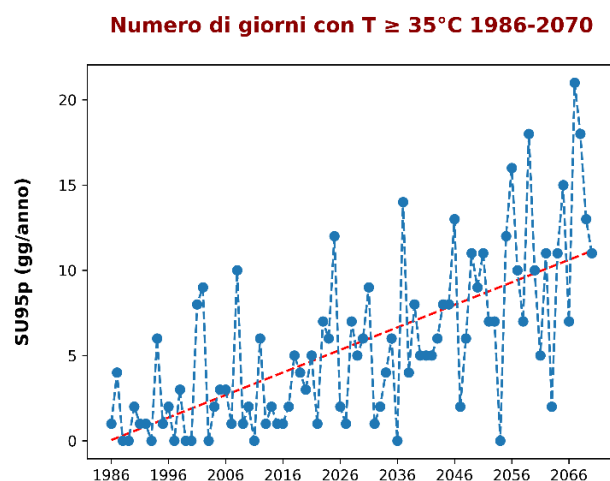
Analyse des extrêmes climatiques et des indices de changement climatique

Analyse des scénarios des températures

L'analyse des scénarios climatiques futurs, outre l'analyse de l'évolution des températures maximales, minimales et des précipitations déjà vues, peut se faire à travers le calcul et l'analyse de quelques indices qui permettent de détecter des extrêmes climatiques avec des impacts de différentes significations.

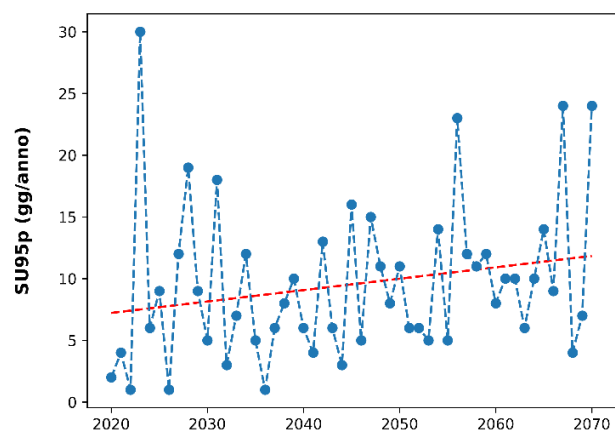
En ce qui concerne les températures maximales, l'un des indicateurs les plus utilisés prend en considération le nombre de jours/an avec des températures de $\geq 35^{\circ}\text{C}$, qui identifient les dénommées "vagues de chaleur". Comme le montre la figure 18, il y a une augmentation générale du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35° très marquée surtout pour la tranche 2041-2070. La même tendance peut être observée dans le scénario le plus sévère du RCP 8,5, comme le montre la figure 19, où l'on passe au total de 7 à 10 jours/an à des températures supérieures à 35°C , avec des pics de 13 jours/an pour la tranche 2040/2070. La même tendance montre les simulations du modèle Hirham du Denmark Institute for Meteorology, bien que l'augmentation des températures attendues soit certainement moins évidente et que le nombre de jours/an avec des températures de $\geq 35^{\circ}\text{C}$. pour ce modèle aussi la variabilité interannuelle est confirmée et la plus grande évidence des phénomènes extrêmes de température sont confirmée pour le scénario RCP 8,5 avec force radiative supérieure.

temp_climaCM5A_1986-2018_rcp4,5



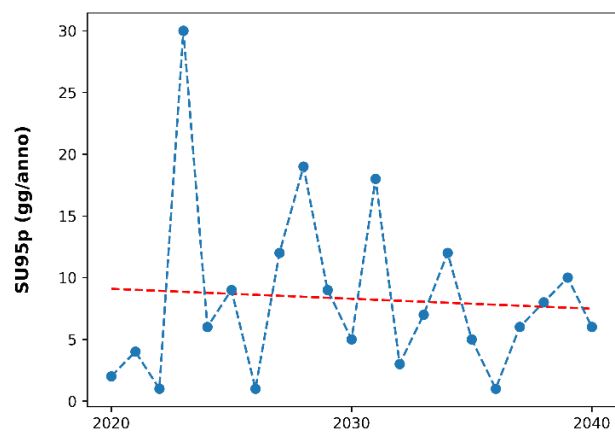
Temp_scenarioCM5A_2020-2070_rcp 4,5

Numero di giorni con $T \geq 35^{\circ}\text{C}$ 2020-2070



Temp_scenarioCM5A_2020-2040_rcp 4,5

Numero di giorni con $T \geq 35^{\circ}\text{C}$ 2020-2040



Temp_scenarioCM5A_2041-2070_rcp 4,5

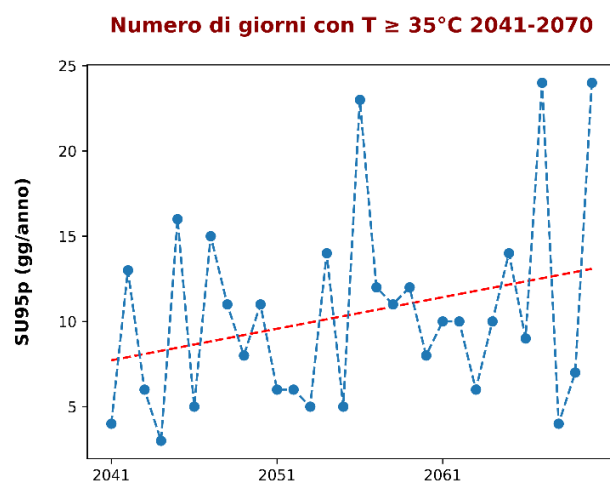
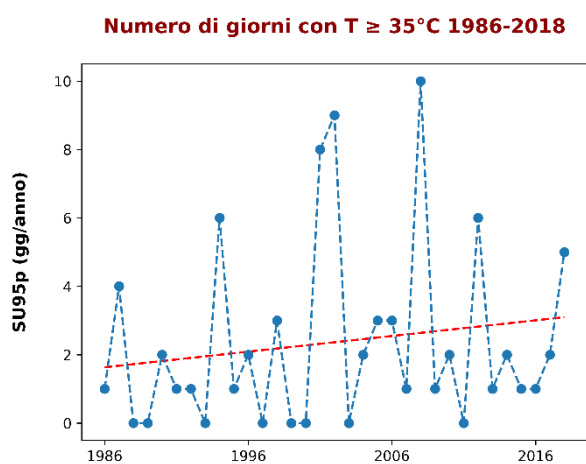
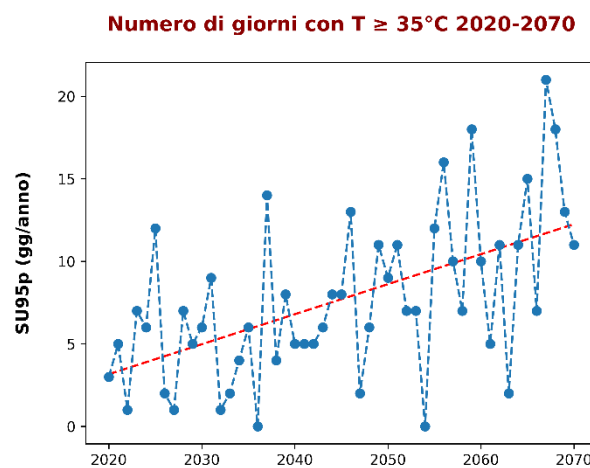


Figure 18 Nombre de jours avec $T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$ pour le modèle CM5A et RCP 4,5

Temp_climaCM5A_1986-2018_rcp8,5



Temp_scenarioCM5A_2020-2070_rcp8,5



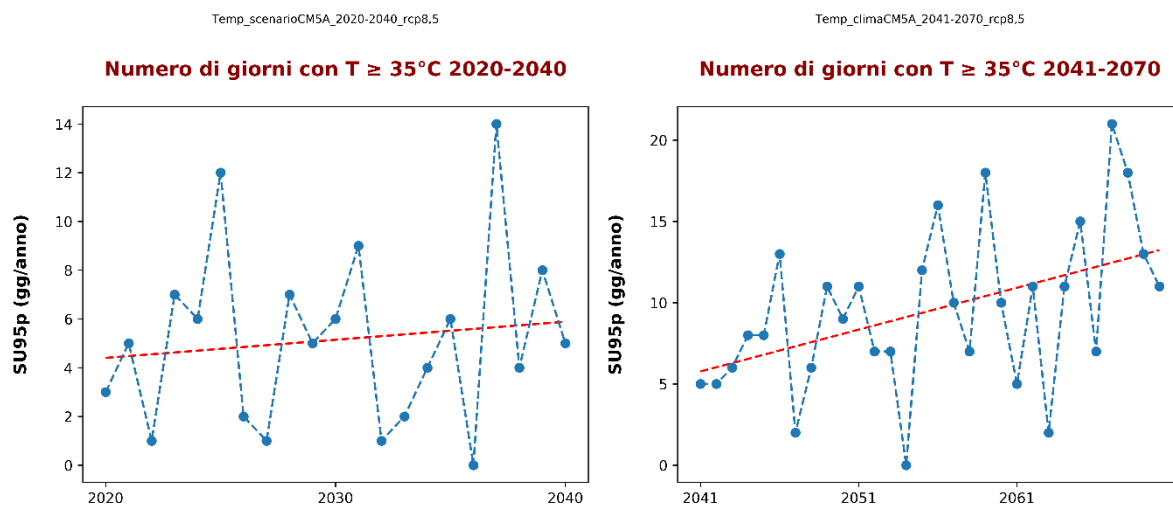


Figure 19 – Numéro de jours avec $T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$ pour le modèle CM5A e RCP 8,5

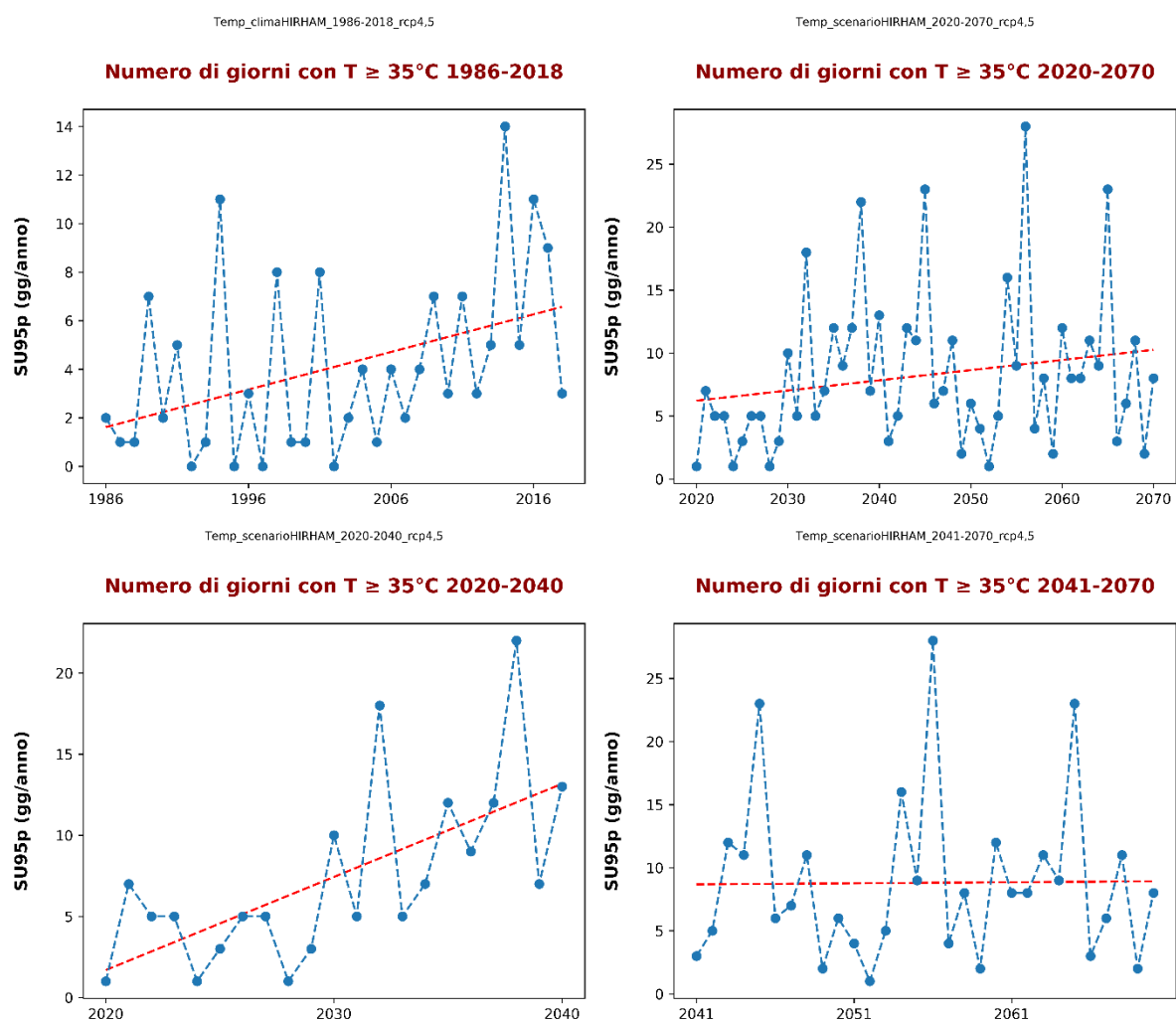
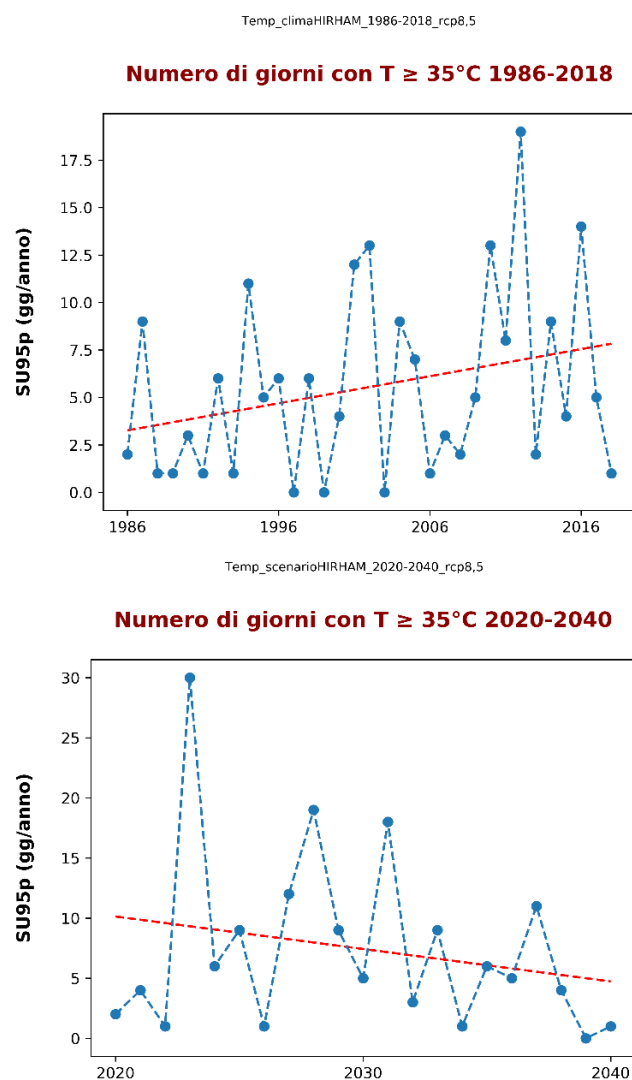


Figure 20 – Numéro de jours/an avec Tmax $\geq 35^{\circ}\text{C}$ selon le modèle Hirham scénario RCP 4,5



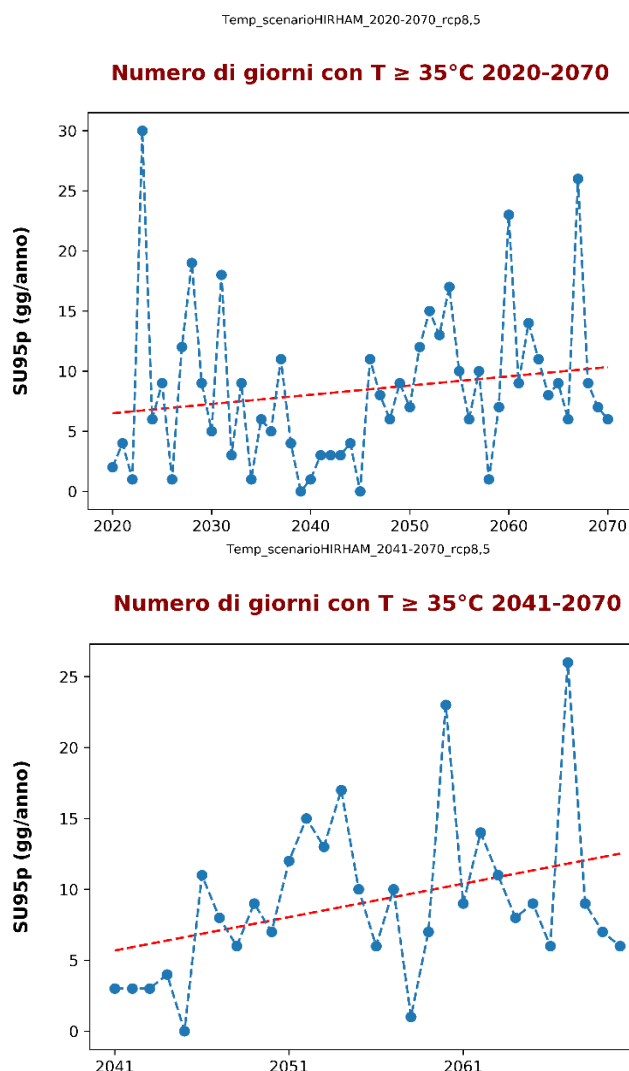
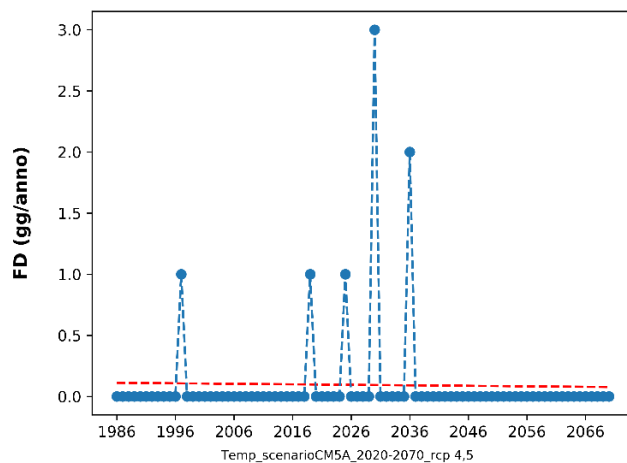


Figure 21 – Numéro de jours/an avec $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$ selon le modèle Hirham scenario RCP 8,5

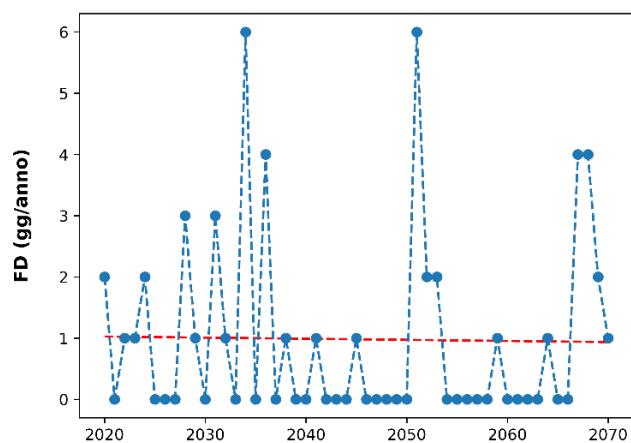
De la même manière, le calcul et l'analyse de l'indicateur qui résume le nombre de jours de gel (FD), c'est-à-dire le nombre de jours/an avec des températures $\leq 0^{\circ}\text{C}$, paraît intéressant. Comme on peut le remarquer dans les figures 22 et 23, où sont affichés les résultats pour le modèle CM5A et les scénarios RCP 4,5 et 8,5 respectivement, à mesure que la température augmente, les jours où les températures atteignent ou descendent en dessous du seuil de 0°C diminuent, jusqu'à disparaître complètement dans le scénario 2070 avec RCP 8,5. On observe la même chose avec les figures 24 et 25 du modèle Hirham et les scénarios RCP 4,5 et 8,5, avec une réduction progressive de jours/an avec des températures minimales inférieures ou égales à 0°C . Seule exception est le scénario prévu pour la période 2041-2070, où le modèle prévoit quelques épisodes de gel.

temp_climaCM5A_1986-2018_rcp4,5

Numero di giorni con $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ 1986-2070

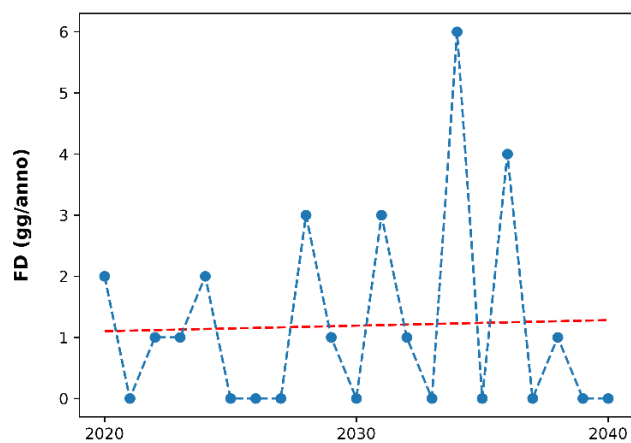


Numero di giorni con $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ 2020-2070



Temp_scenarioCM5A_2020-2040_rcp 4,5

Numero di giorni con $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ 2020-2040



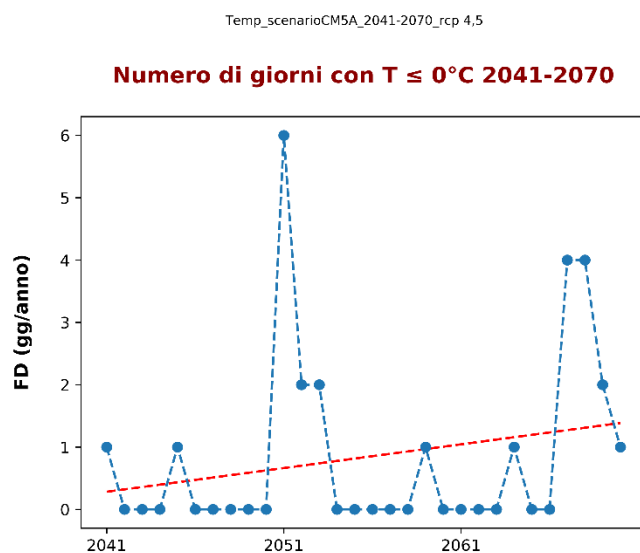
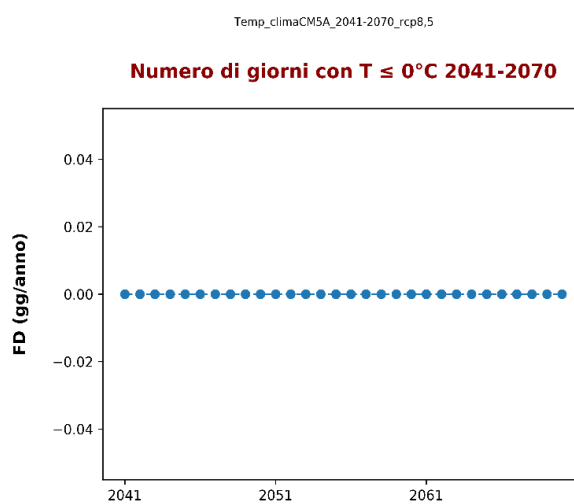
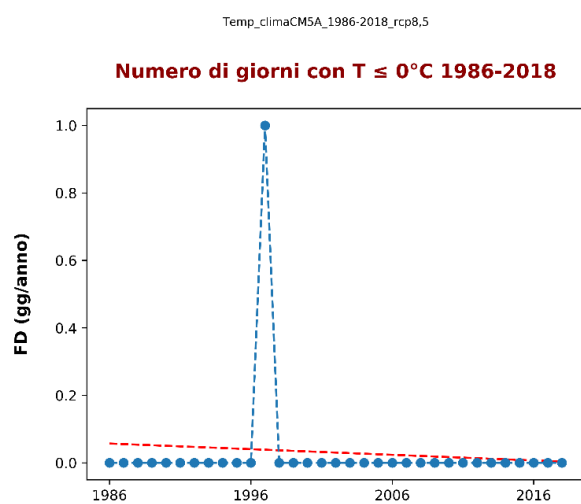


Figure 22- Nombre de jours/an avec températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ selon le modèle CM5A et scénario RCP 4,5



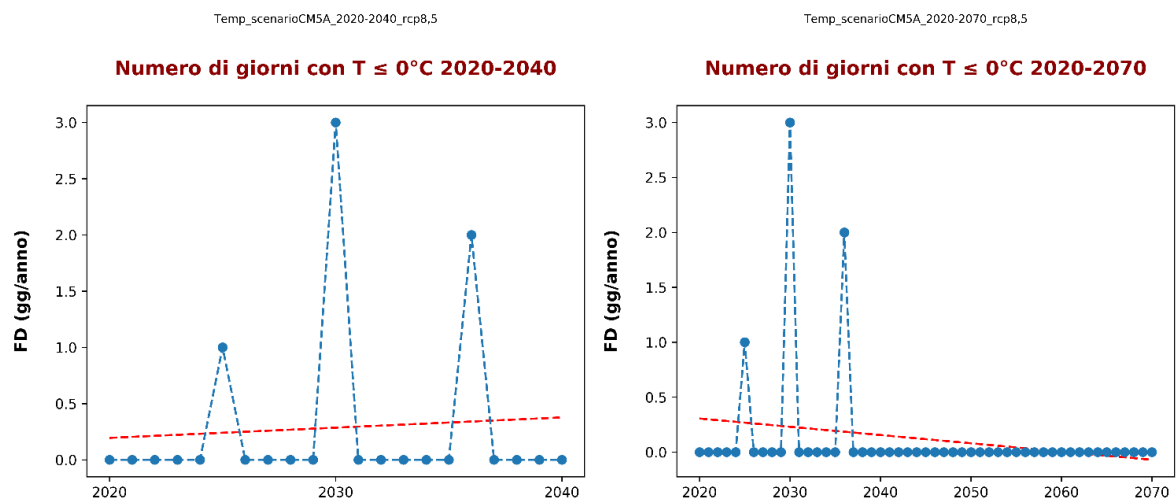


Figure 23 - Nombre de jours/an avec températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ selon le modèle CM5A et scénario RCP 8,5

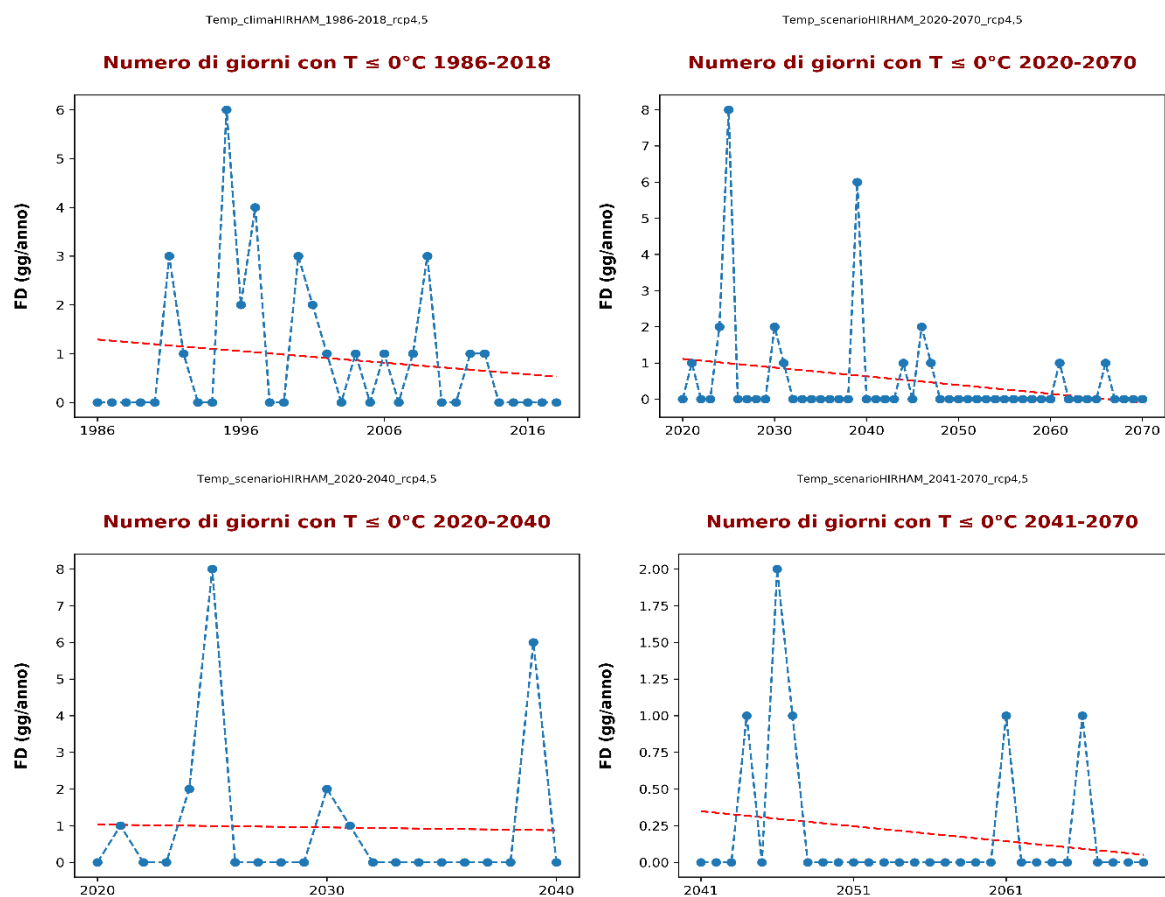


Figure 24 - Nombre de jours/an avec température minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ selon modèle Hirham et scénario RCP 4,5

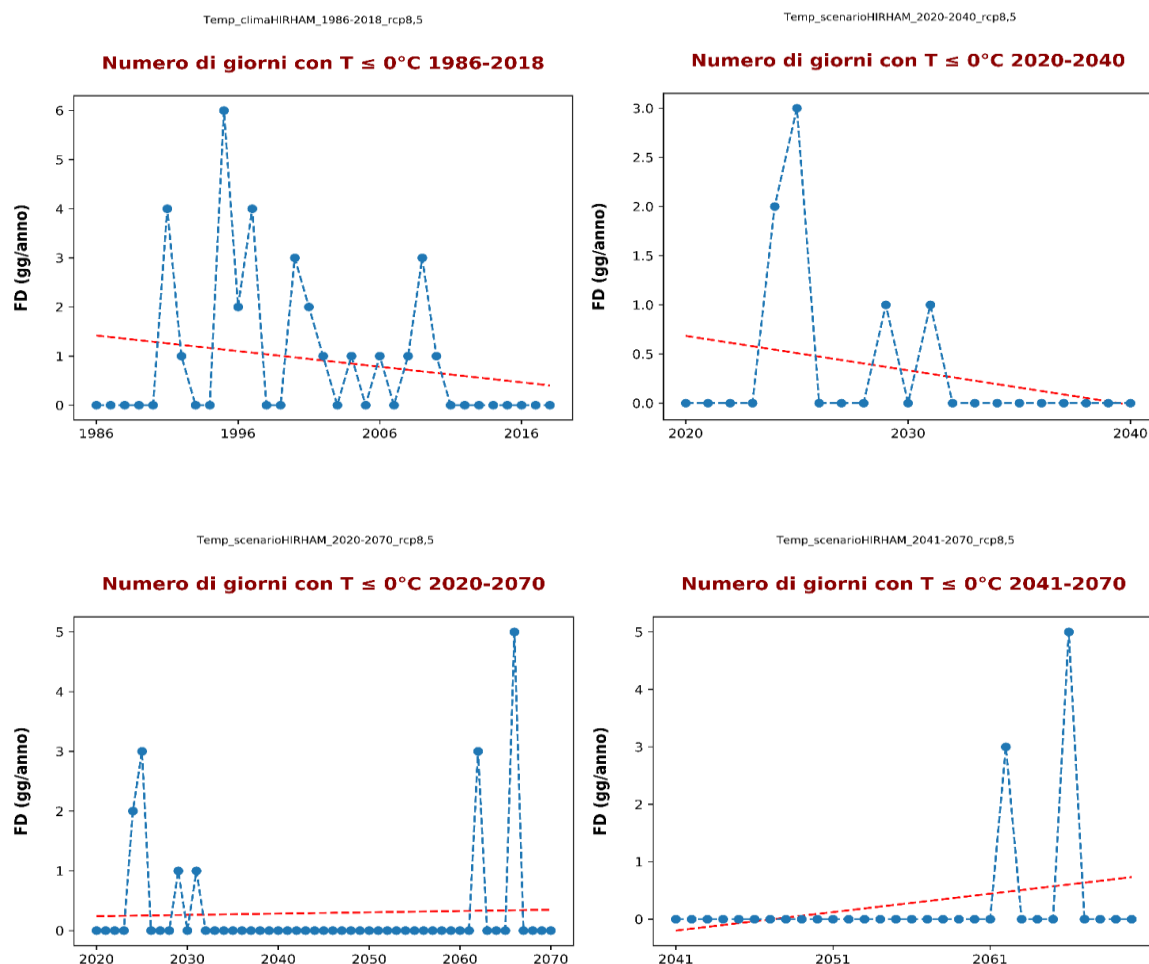


Figure 25 - Nombre de jours/an avec températures minimales $\leq 0^{\circ}\text{C}$ selon le modèle Hirham et scénario RCP 8,5

Analyse des scénarios de précipitations

La difficulté de prévoir les précipitations même à des échelles de temps assez courtes est également confirmée par les modèles choisis pour décrire les scénarios climatiques futurs de la commune d'Oristano.

En effet, si les modèles et les scénarios voient en général une réduction du cumul annuel des précipitations, le calcul des indicateurs de changement climatique associés donne des signaux assez controversés. Les figures 26, 27, 28 et 29 montrent l'*Annual Precipitation* pour les deux modèles et les deux scénarios. Hormis le modèle CM5A dans le scénario RCP 4,5, qui montre une légère augmentation des valeurs du cumul annuel des précipitations, le même modèle dans le scénario RCP 8,5 et le modèle Hirham dans les deux scénarios montrent une tendance décroissante. La réduction est quantifiable à environ 100 mm dans les scénarios les plus sévères (CM5A et RCP 8,5) et à environ 50 mm (soit environ -10% par rapport à la base climatique) dans le cas de conditions moins sévères que prévues (modèle Hirham avec RCP 4,5 et RCP 8,5).

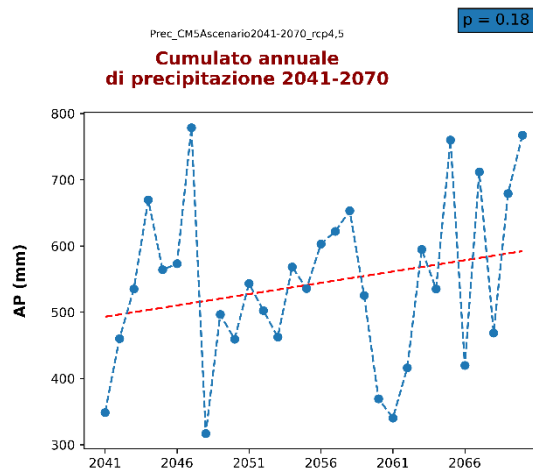
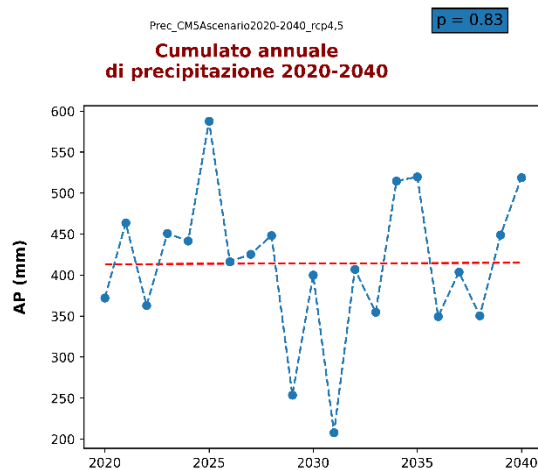
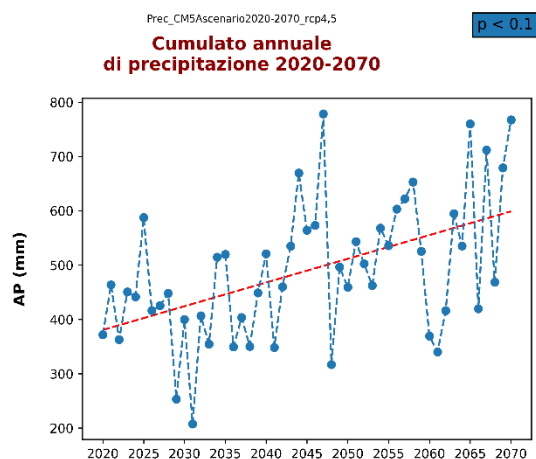
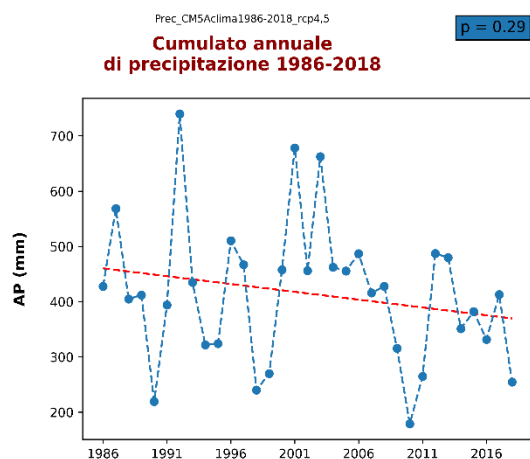
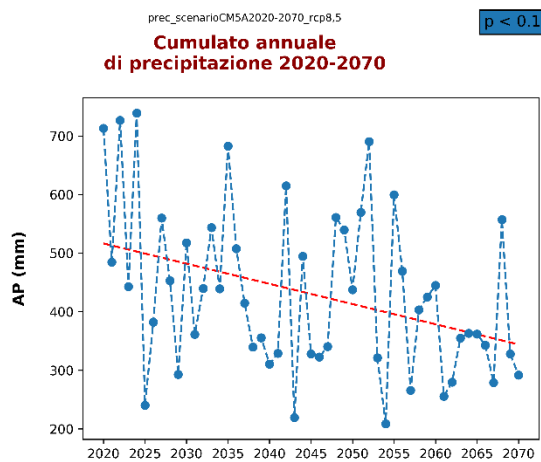
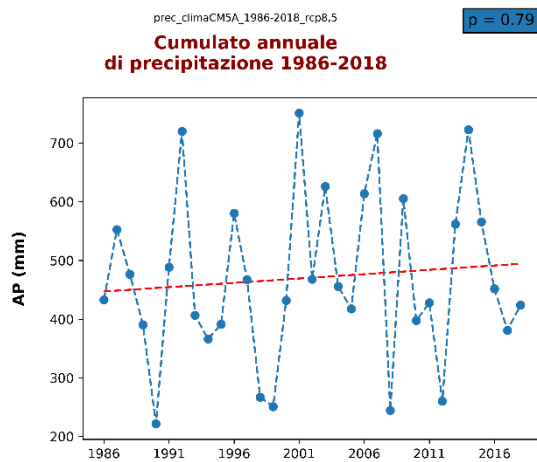


Figure 26 - Cumul annuel des précipitations pour le modèle climatique CM5A et scénario RCP 4,5



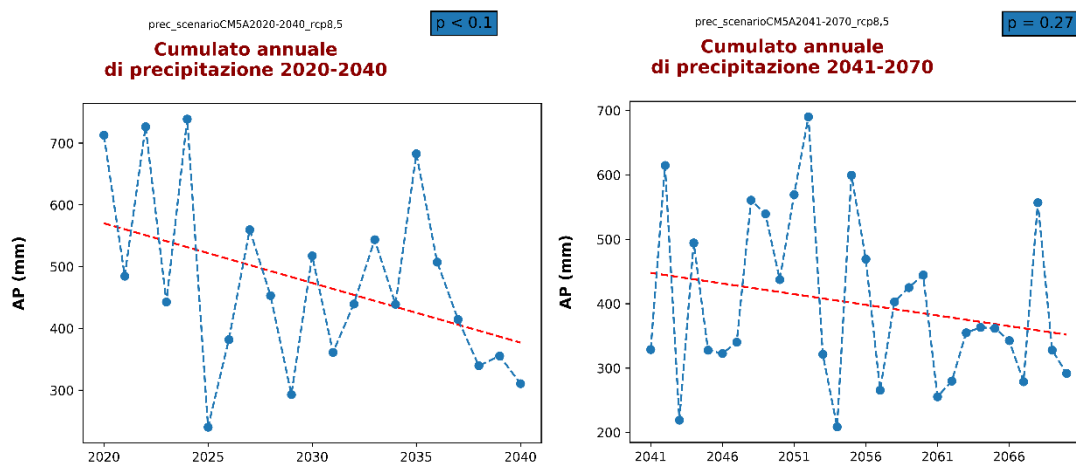


Figure 27 - Cumul annuel des précipitations pour le modèle climatique CM5A et scénario RCP 8,5

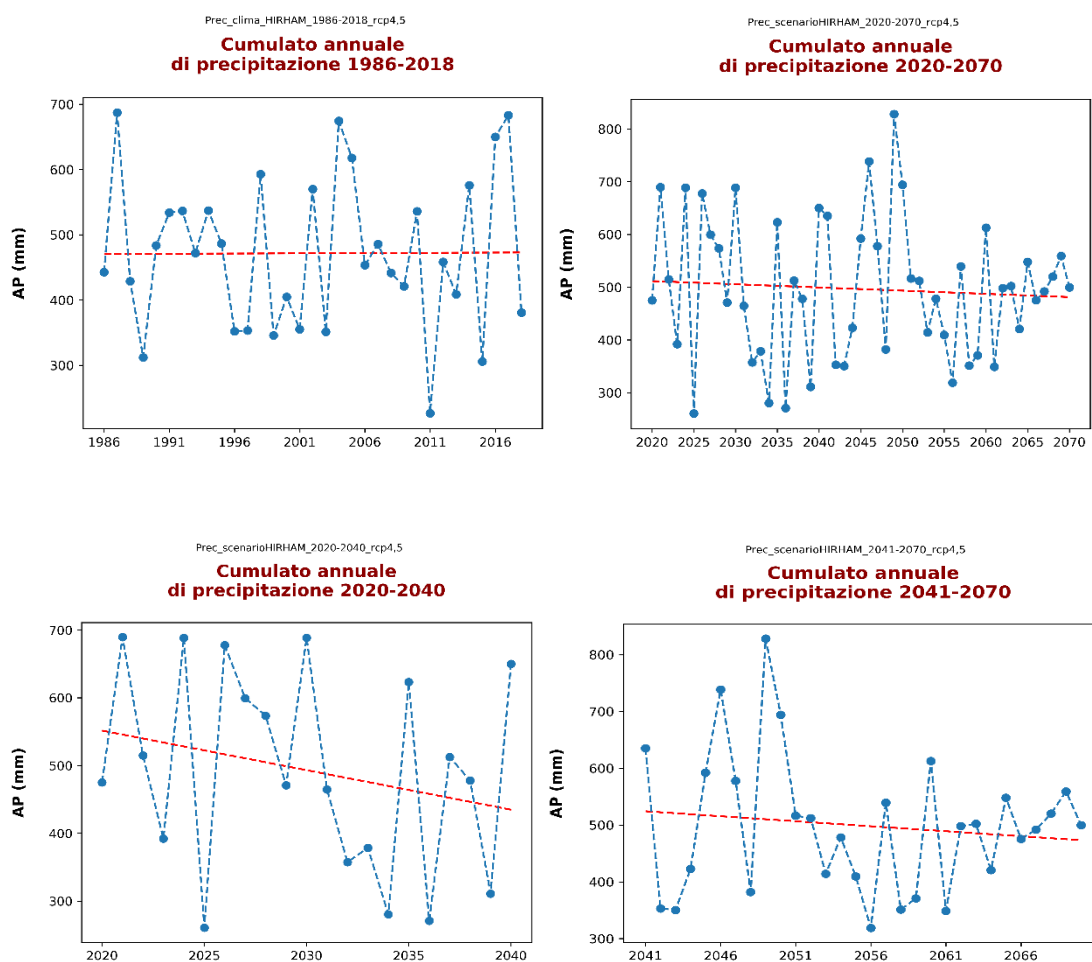


Figure 28 - Cumul annuel des précipitations pour le modèle climatique Hirham et scénario RCP 4,5

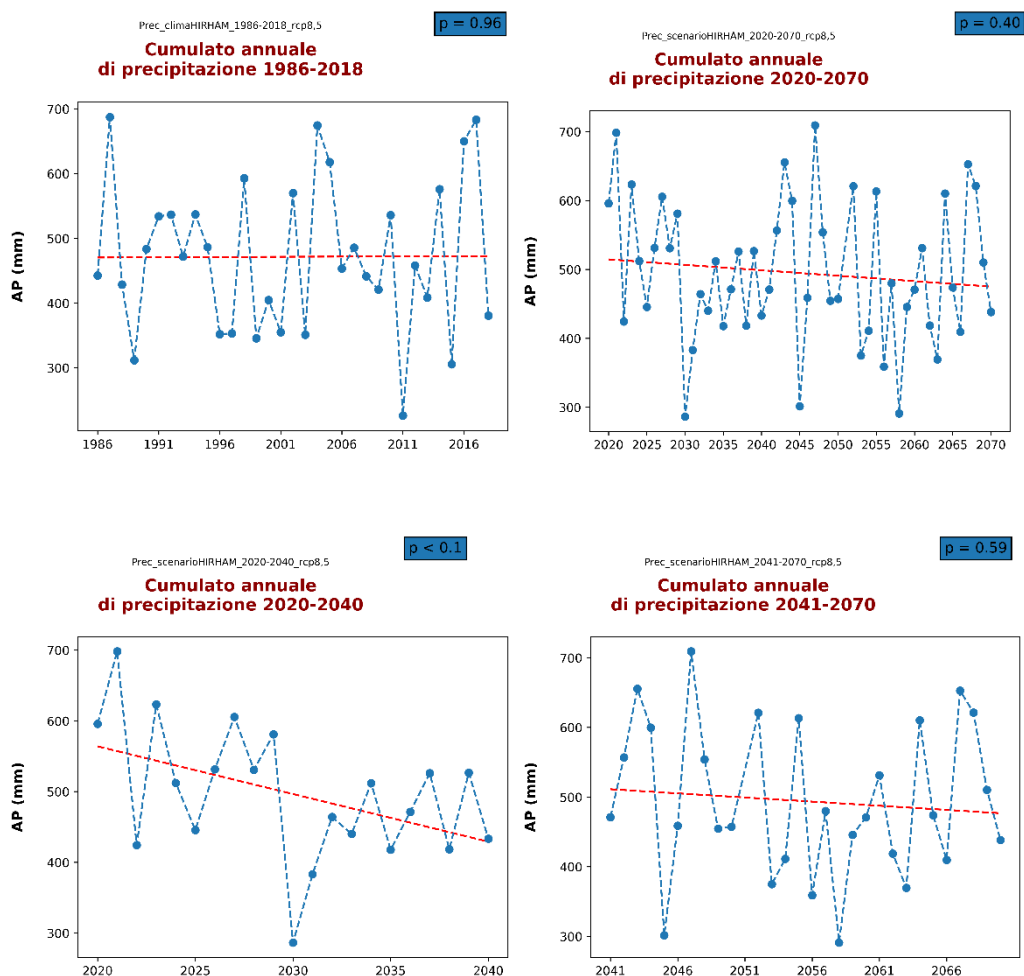


Figure 29 - Cumul annuel des précipitations pour le modèle climatique Hirham et scénario RCP 8,5

Cette évolution des précipitations avec cumuls décroissants est confirmée par un autre indicateur qui montre le nombre de jours consécutifs sans pluie, le *Consecutive Dry Days* index. Le CDD, qui est aussi un indicateur de sécheresse, montre en général une tendance croissante (figures 30, 31, 32, 33) exprimant ainsi une tendance pour l'avenir vers une augmentation des périodes sèches et sans pluie, avec l'augmentation de la longueur des *dry spells*, qui peuvent augmenter de quelques jours (modèle Hirham et scénario RCP 8,5) ou au contraire plusieurs semaines, jusqu'à une augmentation des jours consécutifs sans pluie d'environ 25 unités dans le scénario le plus sévère CM5A et RCP 8,5.

On peut ajouter qu'une donnée intéressante est que l'indicateur montre seulement le maximum des jours consécutifs sans pluie, qui correspond généralement à la fin du printemps-été, mais qu'en réalité l'analyse des données a montré une autre tranche de plusieurs jours secs à l'automne (mois d'octobre et novembre) qui devrait augmenter pour la période 2040-2070. Il convient également de noter la grande variabilité interannuelle de l'indicateur qui montre que la distribution des précipitations prévues dans les scénarios climatiques futurs est tout à fait erratique.

Cette tendance est confirmée par l'indicateur CWD, c'est-à-dire les jours consécutifs de pluie d'au moins 1 mm, qui cherche à mettre en évidence les périodes de l'année où des pluies continues saturent le sol ou les canaux de ruissellement, générant potentiellement des conditions d'inondation, qui dépendent cependant en grande partie de l'intensité des précipitations. Comme on peut le voir aux figures 34, 35, 36 et 37, le modèle CM5A prévoit une légère réduction du nombre de jours consécutifs de pluie pour le scénario RCP 8,5, alors qu'il est le même pour le scénario RCP 4,5, aussi bien le modèle Hirham pour les deux scénarios prévoit une augmentation de l'indice CWD, dans de nombreux cas même avec une tendance statistiquement significative (avec indice $p_{0,1}$) du Mann-Kendall test.

Les indicateurs analysés ci-dessus ont montré que les scénarios de changement climatique prévoient, d'une part, une réduction du cumul annuel des précipitations, comme prévu par d'autres Regional Circulation Models pour la biorégion méditerranéenne et parallèlement une augmentation de la durée des périodes de sécheresse; d'autre part, **on ne sait pas si la distribution des précipitations se fera sur un nombre d'événements plus faible, et donc avec des précipitations plus fortes, ou avec des précipitations bien réparties sur des jours consécutifs avec des pluies d'une certaine intensité.**

Les figures 38, 39, 40 et 41 indiquent le résultat du calcul de l'indice qui tient compte des précipitations journalières de plus de 20 mm (indicateur R20).

Comme on peut le voir, il n'y a pas d'augmentation du nombre de jours/an avec de potentiels cumuls de précipitations intenses qui ont une signification suffisante, au contraire les modèles en général prévoient soit un manque de tendances ou des tendances peu significatives.

Il n'a pas non plus été utile de calculer le cumul maximal de précipitations en 5 jours consécutifs (Rx5day), parce que les deux modèles présentent des niveaux de significativité assez faibles et des signes de tendances parfois opposées et en quantités assez réduites.

La variabilité interannuelle est très forte, signe d'une grande imprévisibilité des phénomènes, qui peuvent atteindre des extrêmes (positifs et négatifs) même d'une certaine ampleur, avec des différences allant jusqu'à 40-50 mm d'une année à l'autre.

Un dernier indicateur calculé pour les modèles et les scénarios analysés montre que, dans presque tous les cas analysés, le nombre de jours pluvieux diminue, dans certains cas même sensiblement (modèle CM5A et RCP 8,5), dans d'autres beaucoup moins. Le comportement du nombre de jours de pluie est cependant encore emblématique sur la variabilité interannuelle des événements de précipitations : les différences d'une année à l'autre peuvent être de 30 jours de pluie sur 60, Avec les cumuls annuels qui, somme toute, se réduisent peu significativement.

Dans les années avec un faible nombre de jours de pluie, on pourrait s'attendre à un cumul / jours élevés et probablement à haute intensité.

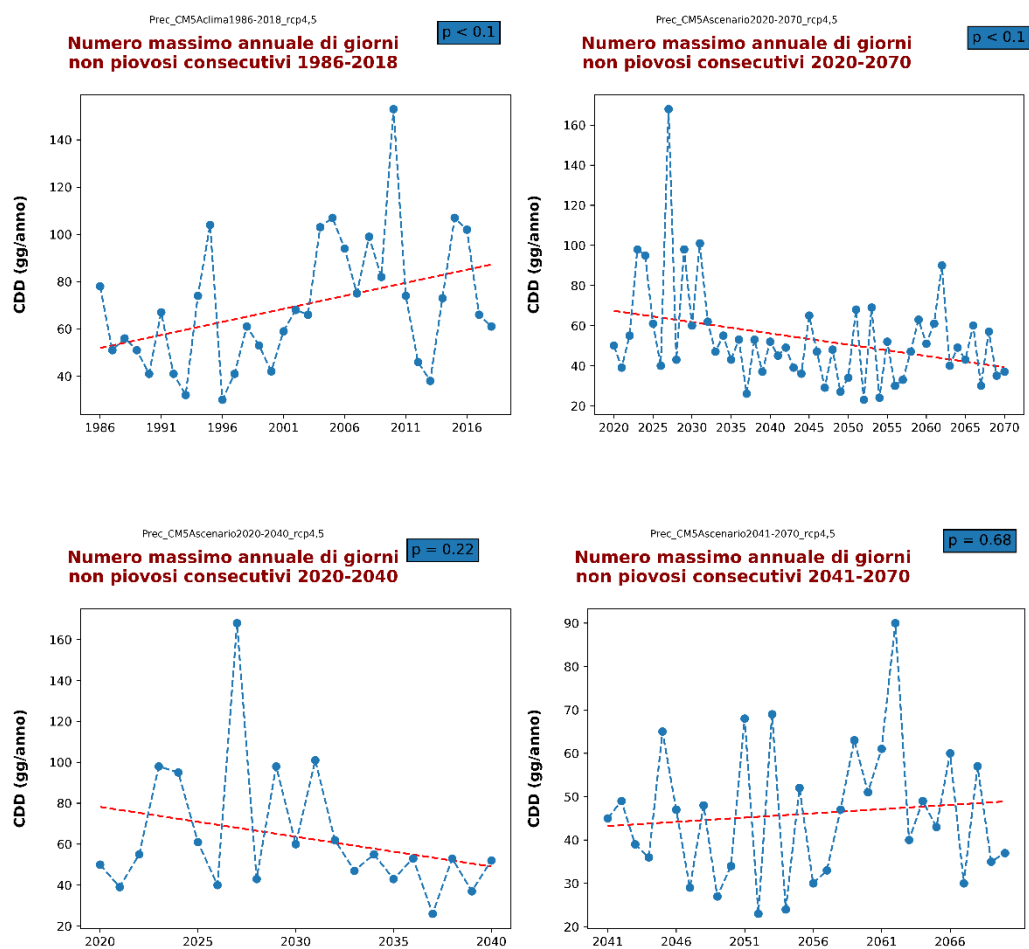


Figure 30 – Nombre de jours consécutifs/an sans pluie pour le modèle CM5A et scénario RCP 4,5

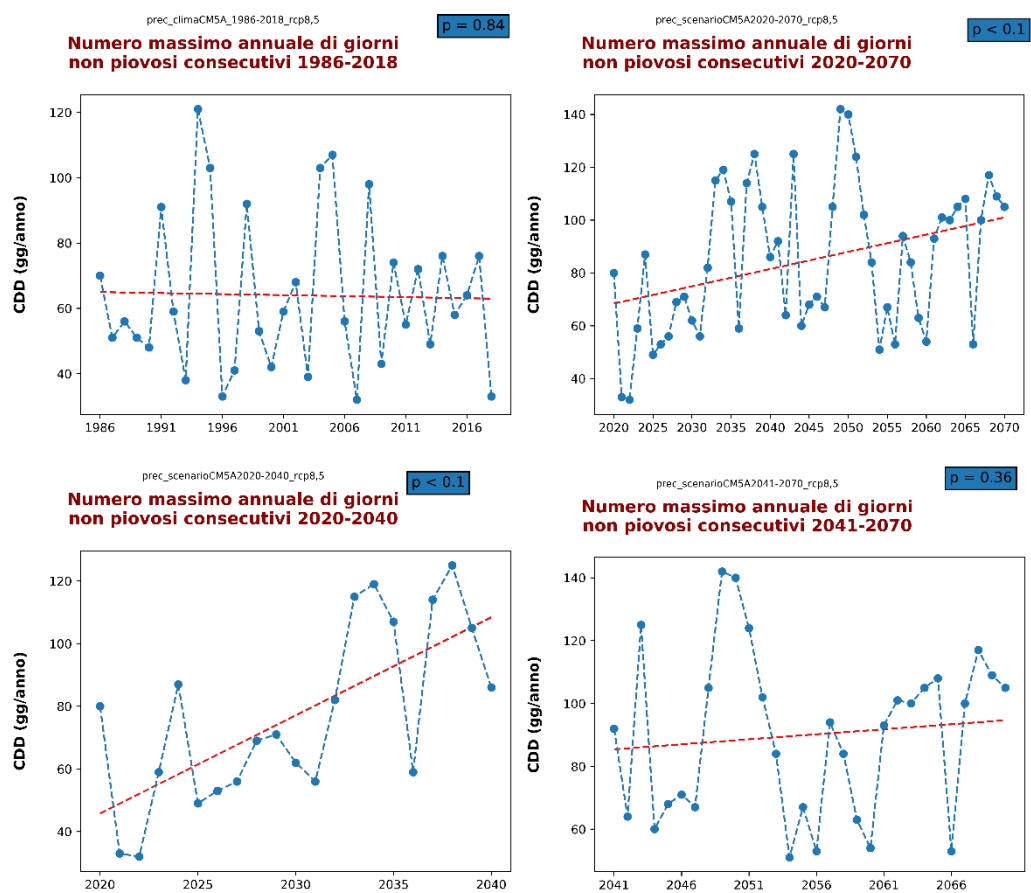


Figure 31 – Nombre de jours consécutifs/an sans pluie pour le modèle CM5A et le scénario RCP 8,5

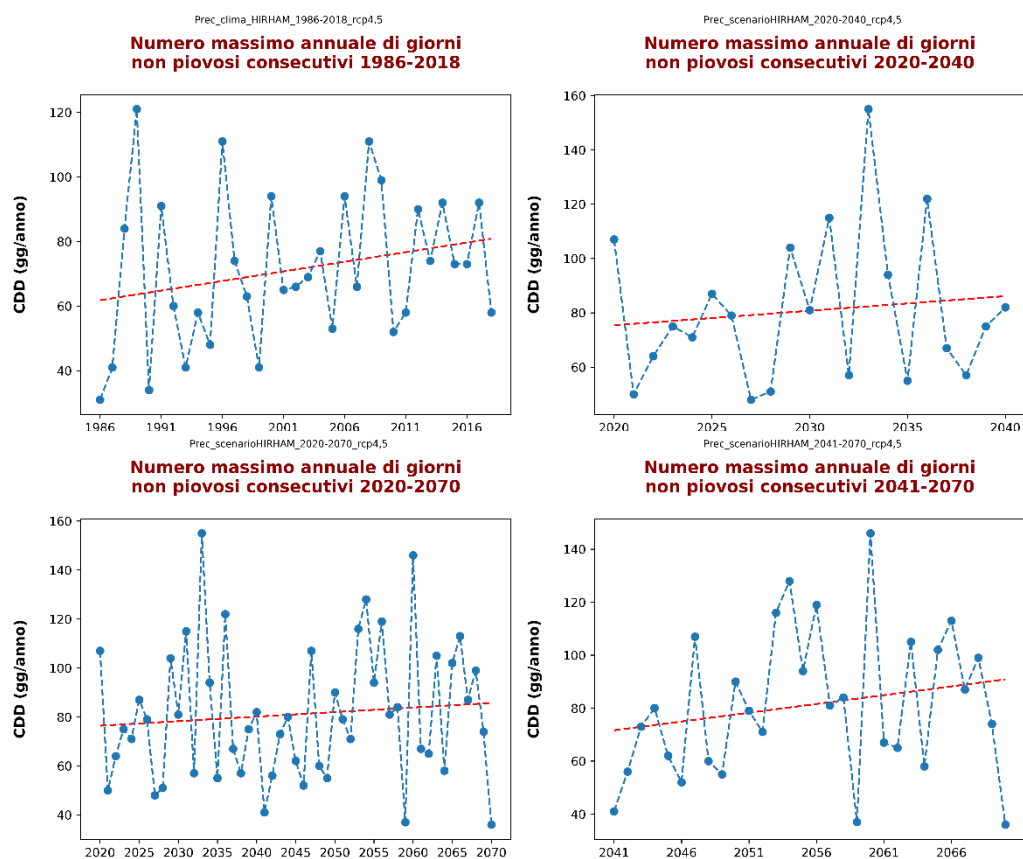
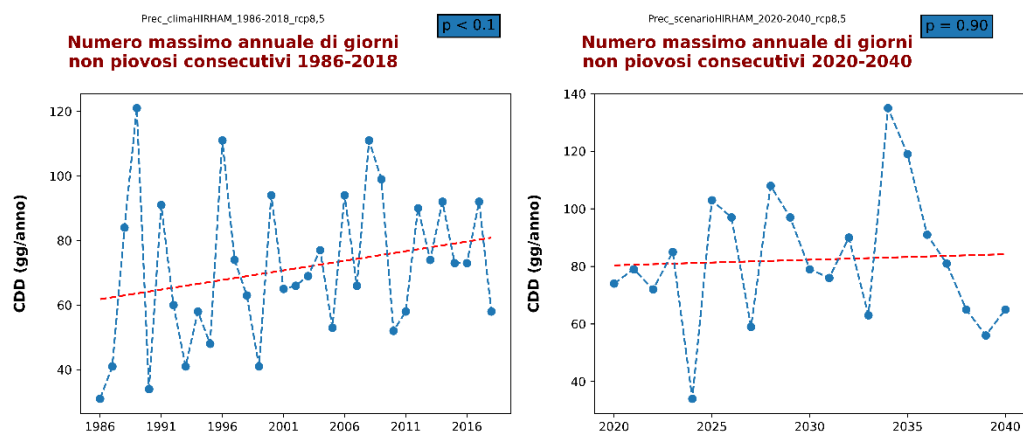


Figure 32 – Numero de jours consécutifs /an sans pluie pour le modèle Hirham et scénario RCP 4,5



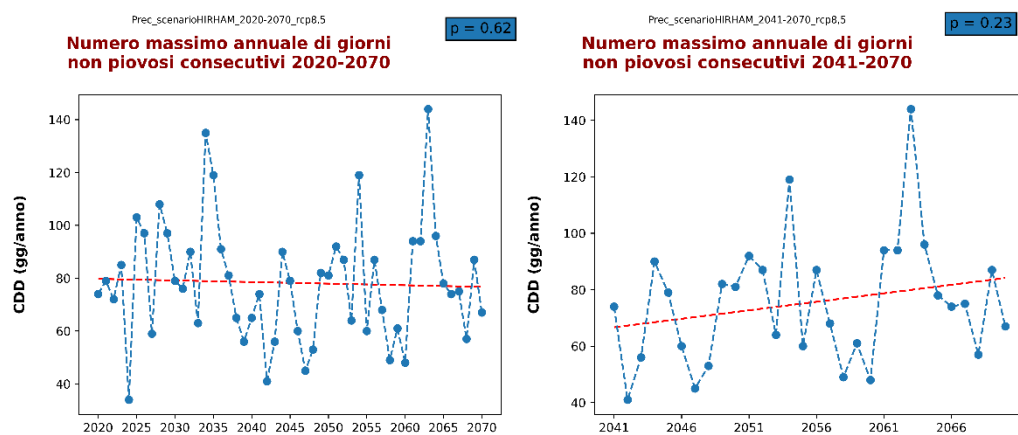


Figure 33 – Nombre de jours consécutifs/an sans pluie pour le modèle Hirham et scénario RCP 8,5

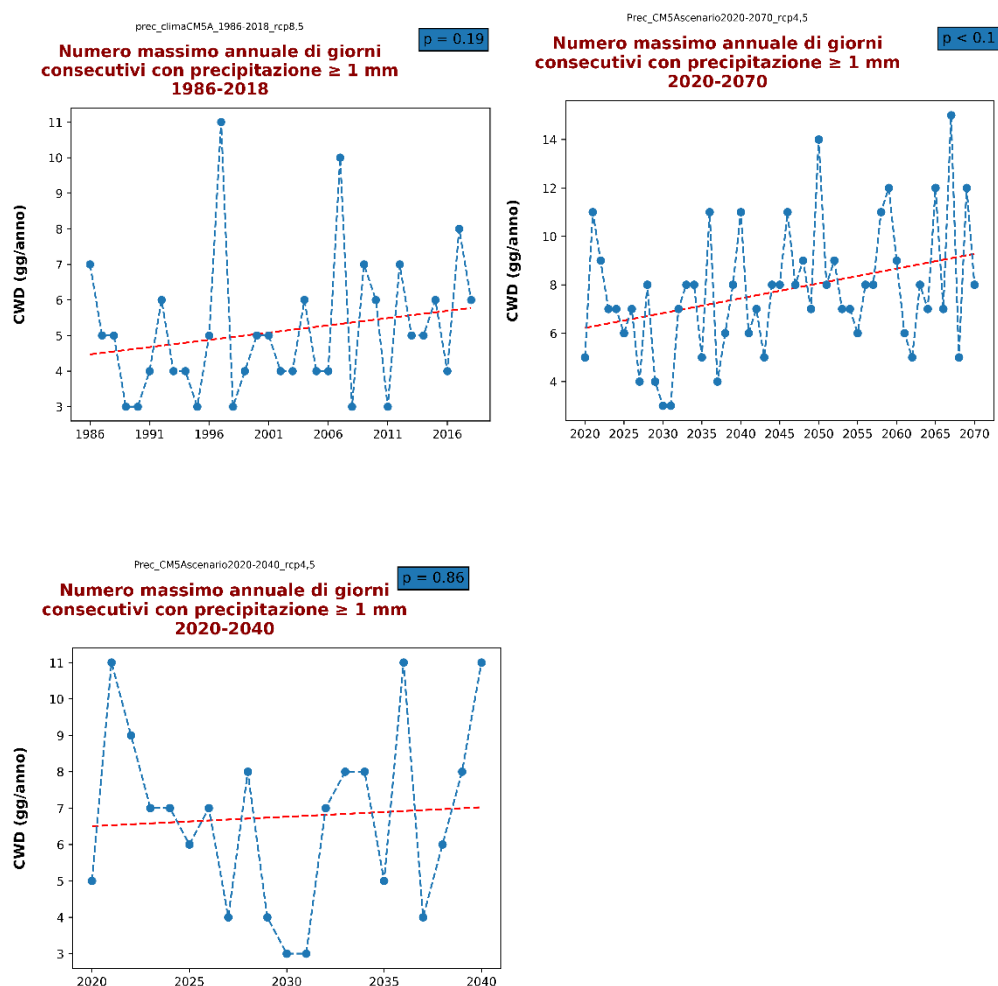


Figure 34 – Nombre maximum de jours consécutifs /an avec pluie pour le modèle CM5A et scénario RCP 4,5

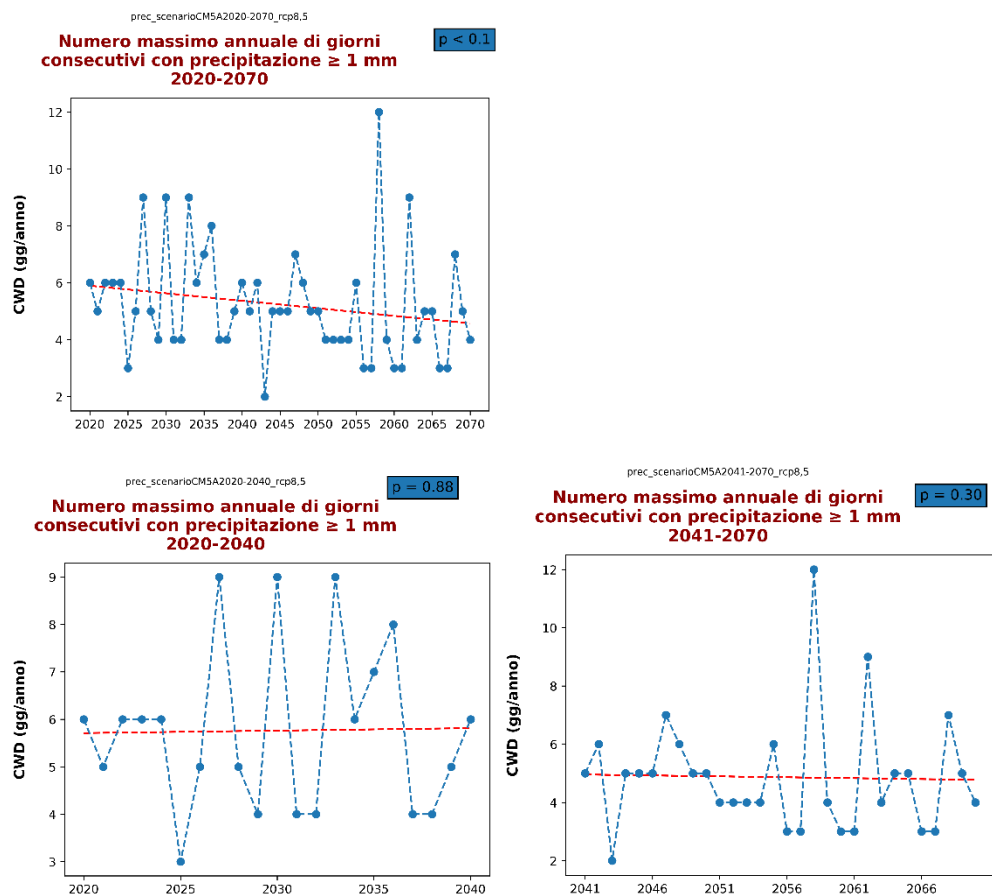
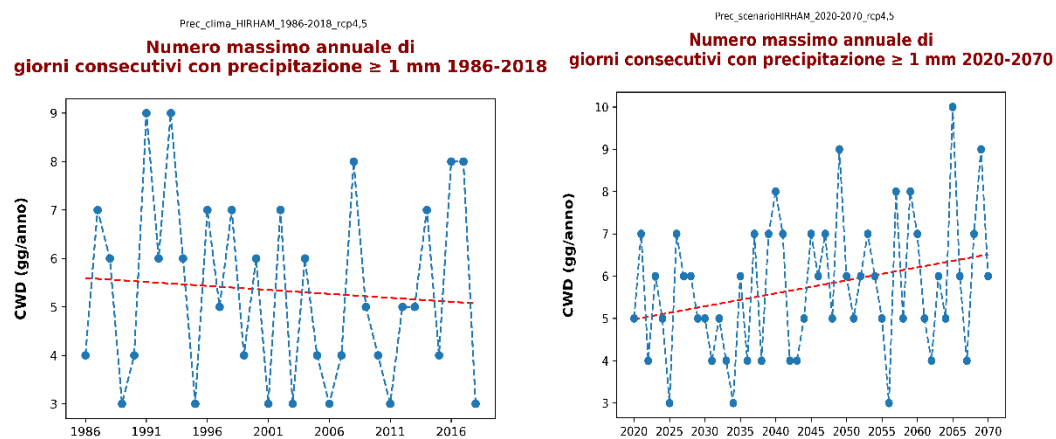


Figure 35 – Nombre maximum de jours consécutifs/an avec pluie pour le modèle CM5A e scénario RCP 8,5



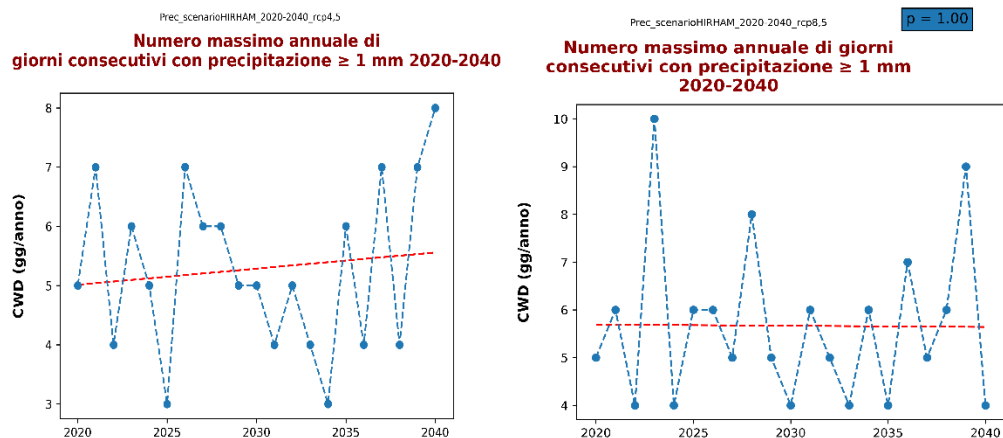


Figure 36 – Nombre maximum de jours consécutifs/an avec pluie pour le modèle Hirham et scénario RCP 4,5

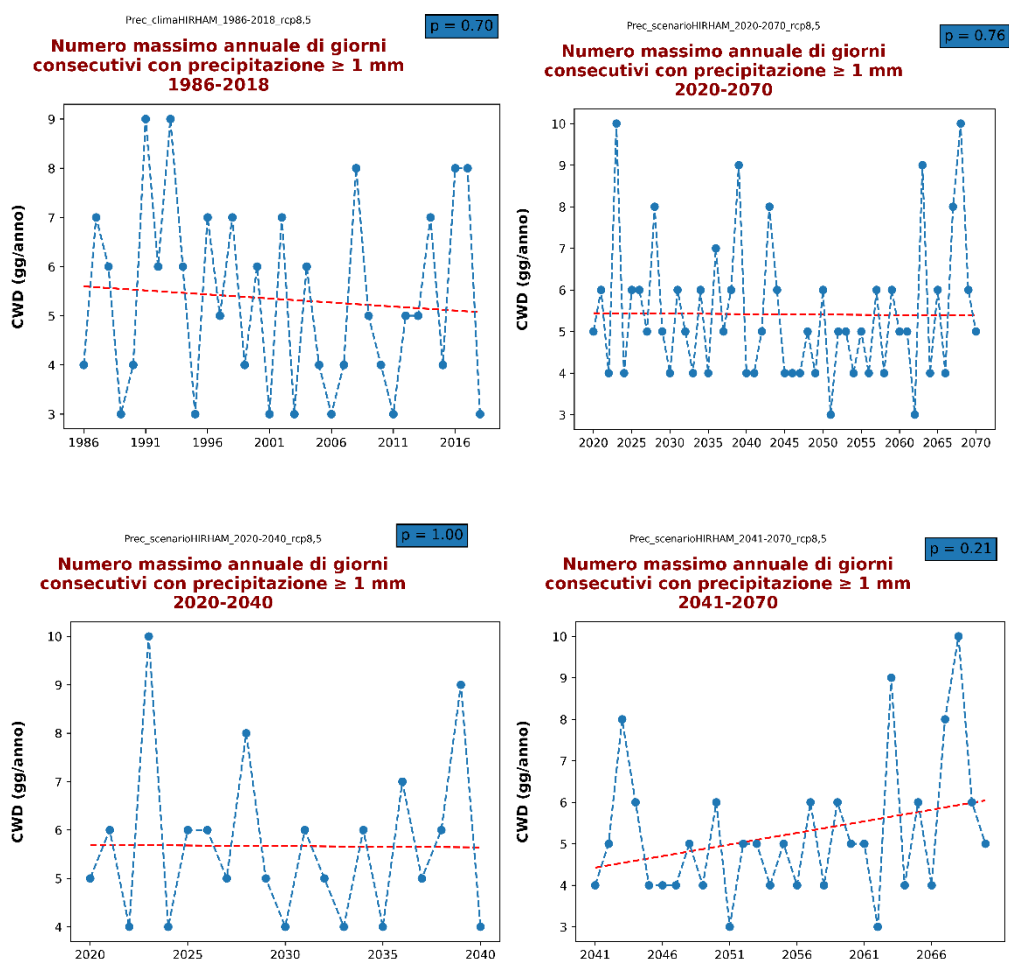


Figure 37 – Nombre maximum de jours consécutifs/an avec de la pluie pour le modèle Hirham et scénario RCP 8,5

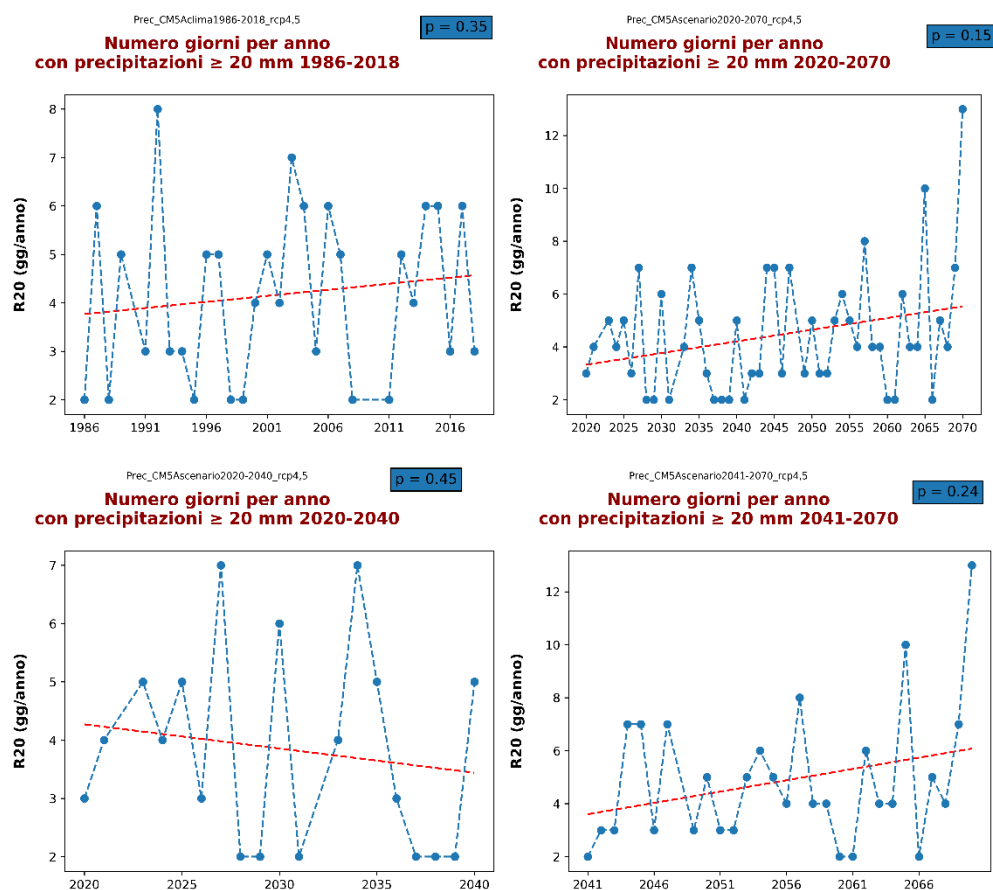
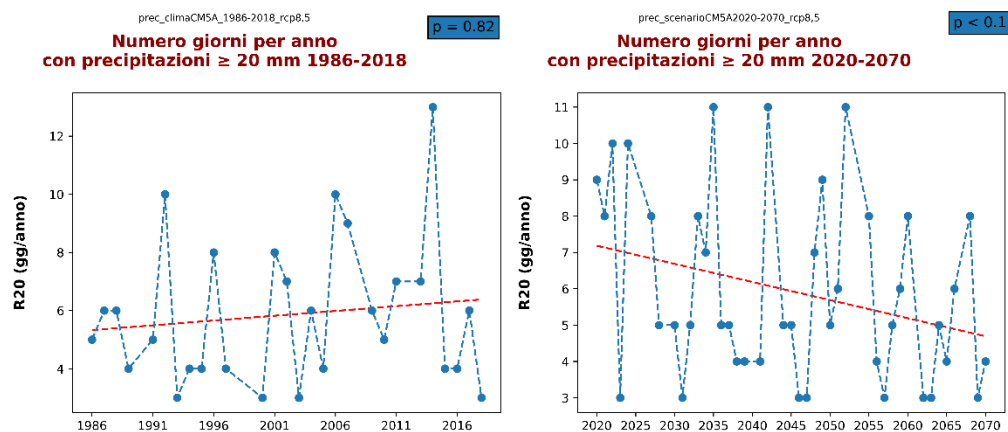


Figure 38 – Numero massimo de jours/an avec précipitations supérieures à 20 mm. Modèle CM5A e RCP 4,5



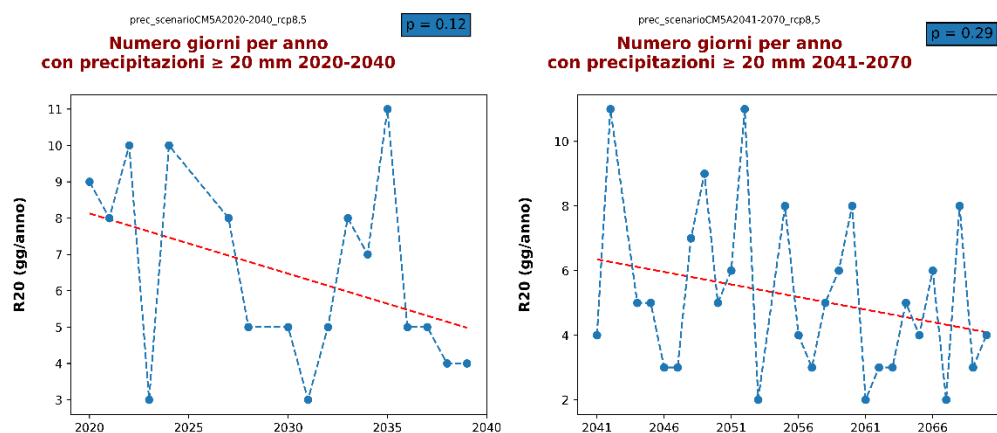


Figure 39 – Nombre maximum de jours /an avec précipitations supérieures à 20 mm. Modèle CM5A e RCP 8,5

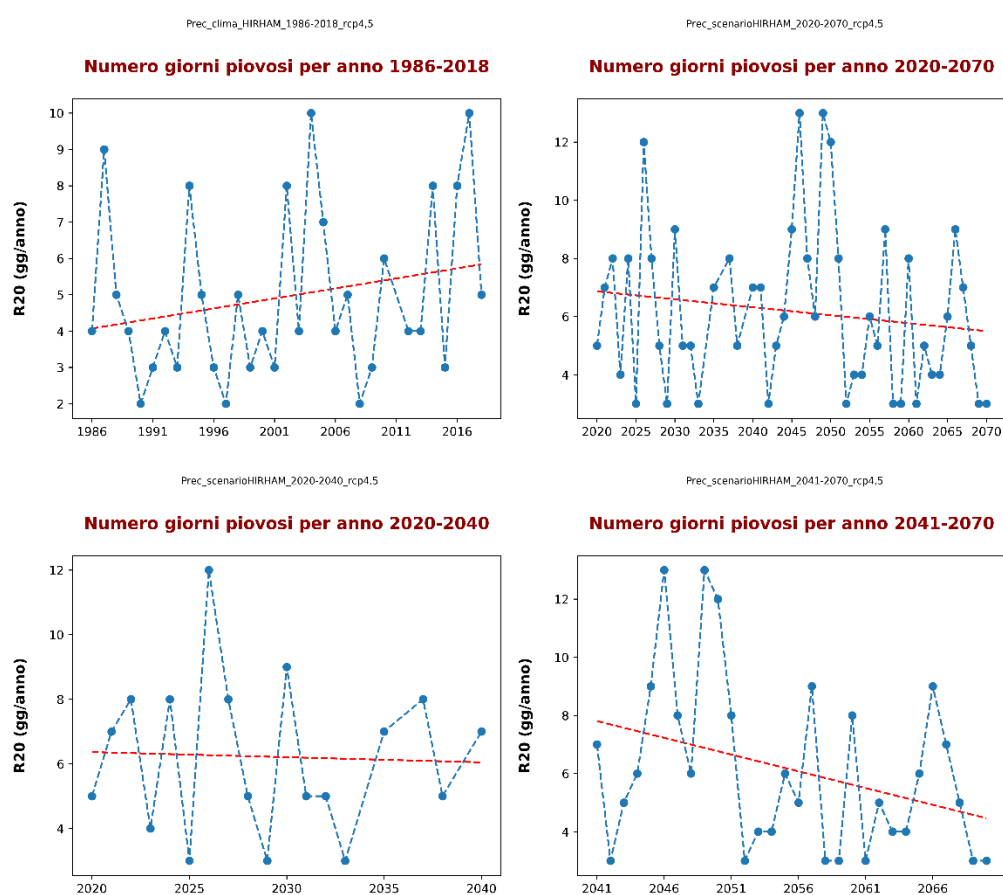


Figure 40 – Nombre maximum de jours/an avec précipitations supérieures à 20 mm. Modèle Hirham et RCP 4,5

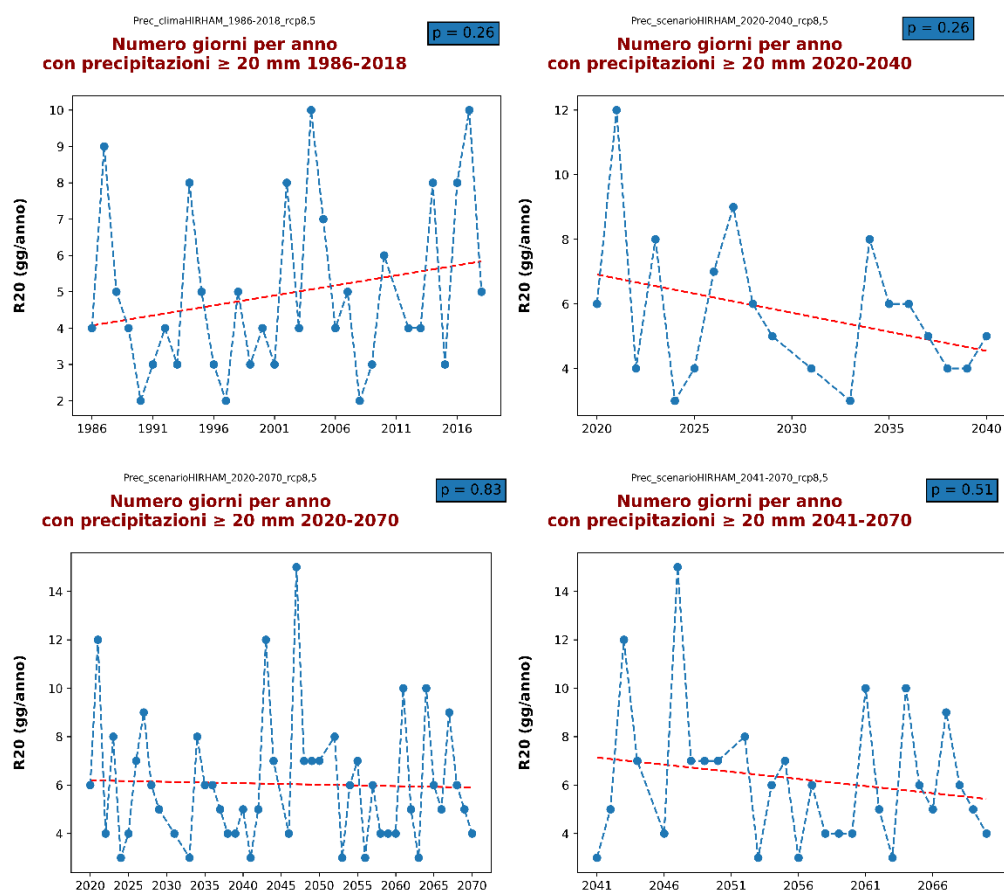
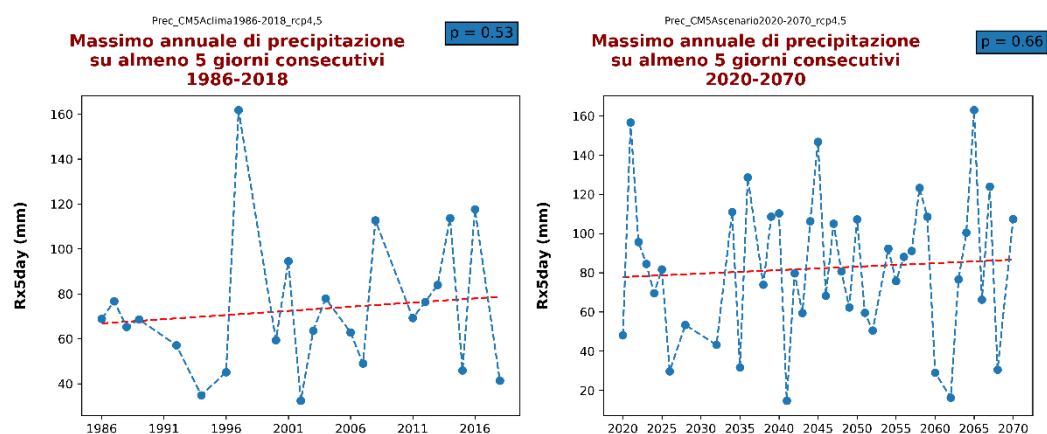


Figure 41 – Nombre maximum de jours /an avec précipitations supérieures à 20 mm. Modèle Hirham e RCP 8,5



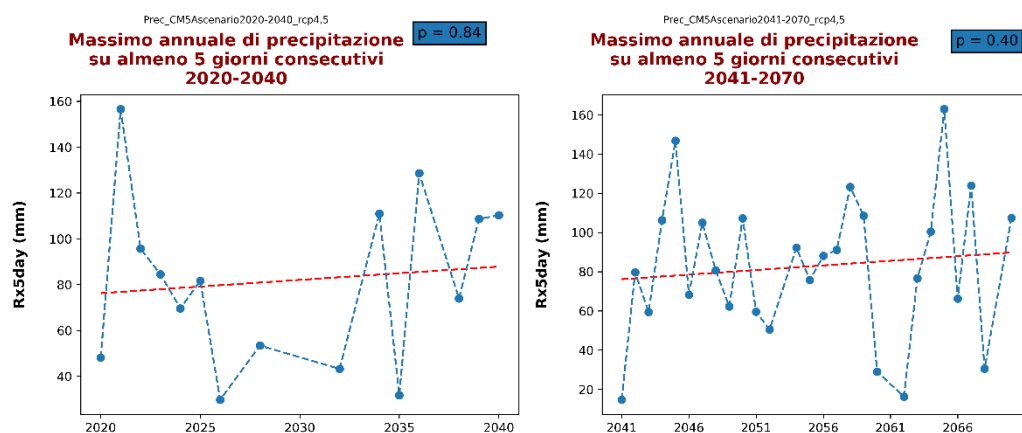


Figure 42 – Maximaux des précipitations exprimées en mm sur au moins 5 jours consécutifs de pluie. Modèle CM5A et scénario RCP 4,5.

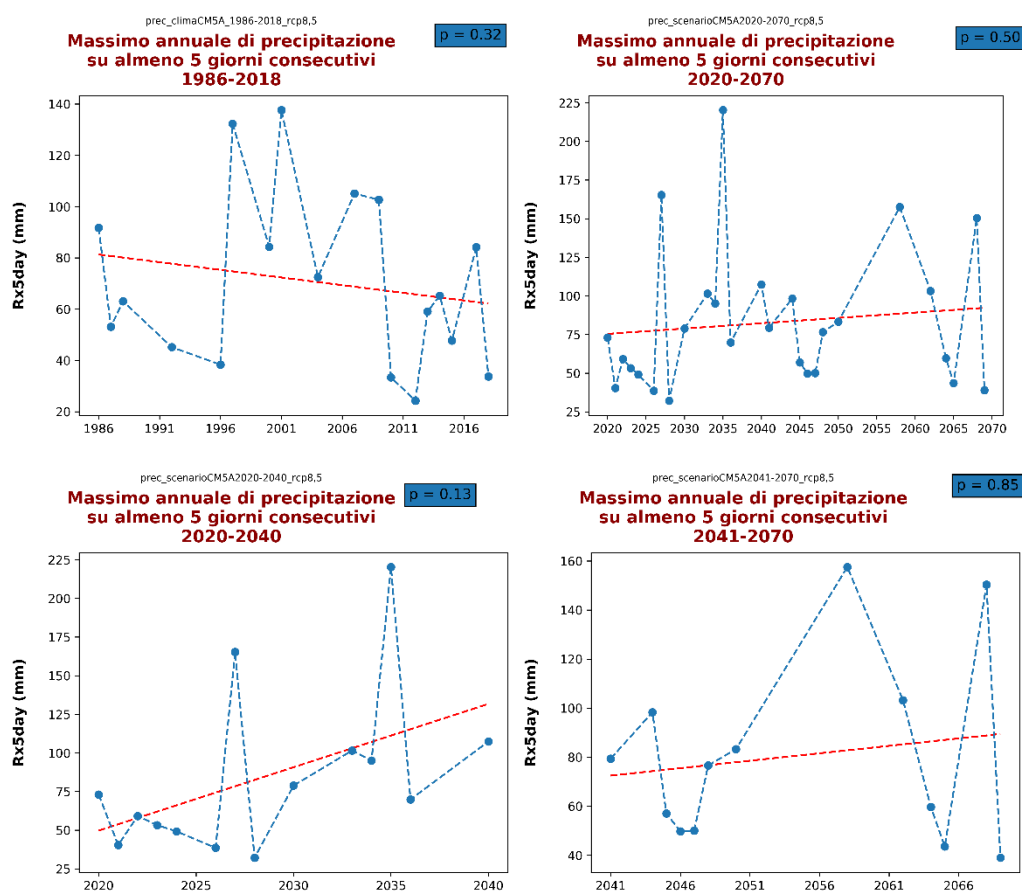


Figure 43 – Maximum de précipitations en mm sur au moins 5 jours consécutifs de pluie. Modèle CM5A e RCP 8,5.

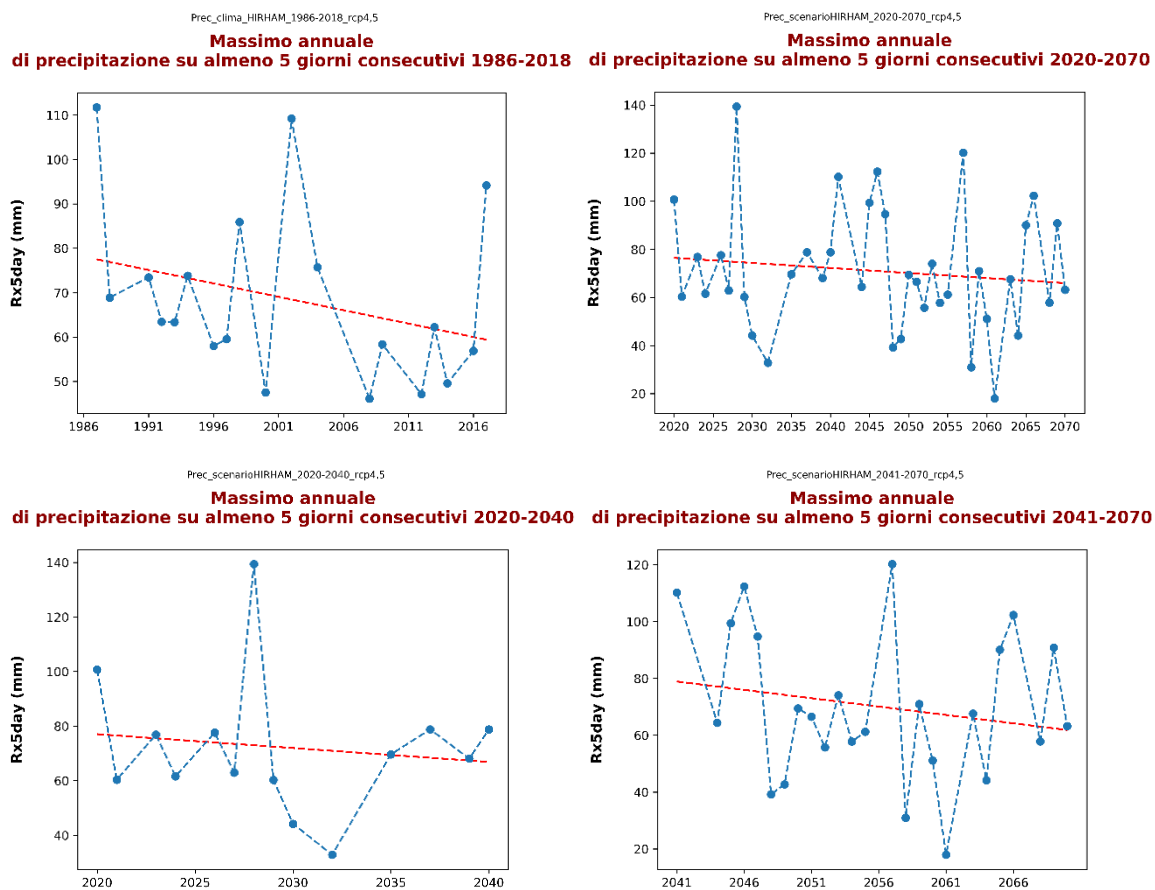
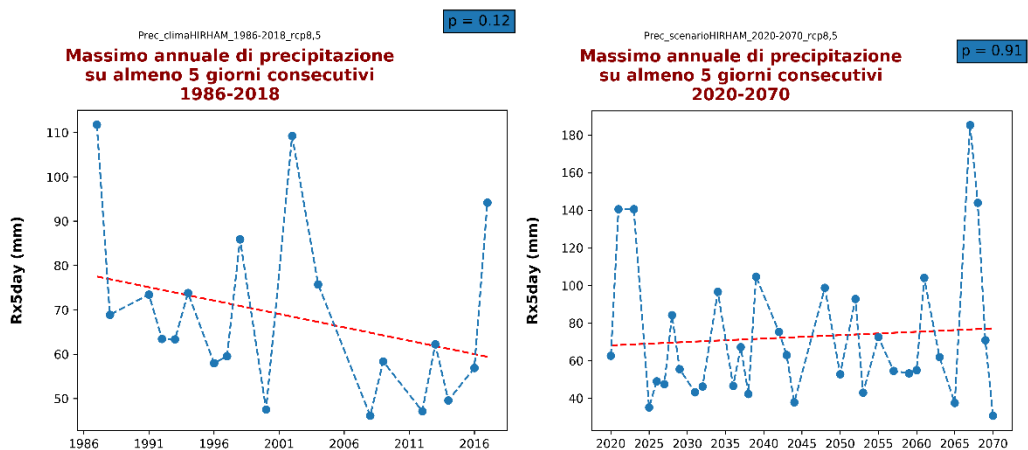


Figure 44 – Maximum de précipitations en mm sur au moins 5 jours consécutifs de pluie. Modèle Hirham e RCP 4,5.



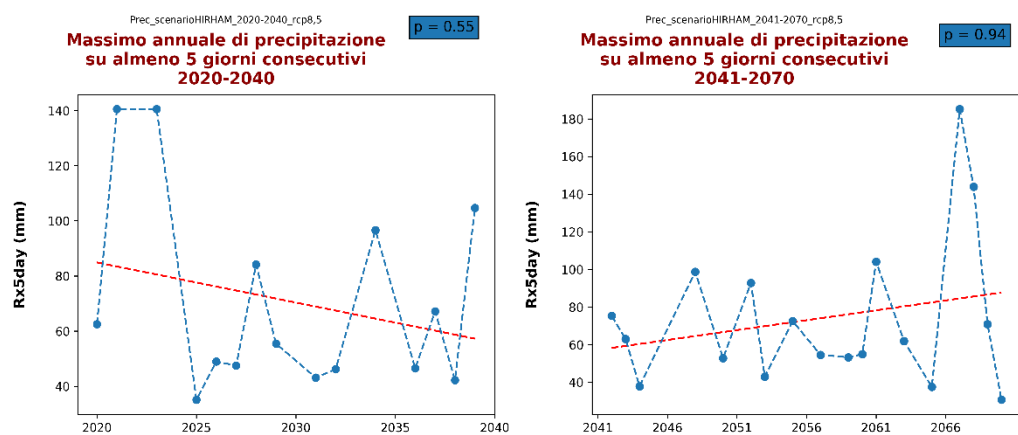


Figure 45 – Maximum de précipitations en mm sur au moins 5 jours consécutifs de pluie. Modèle Hirham e RCP 8,5.

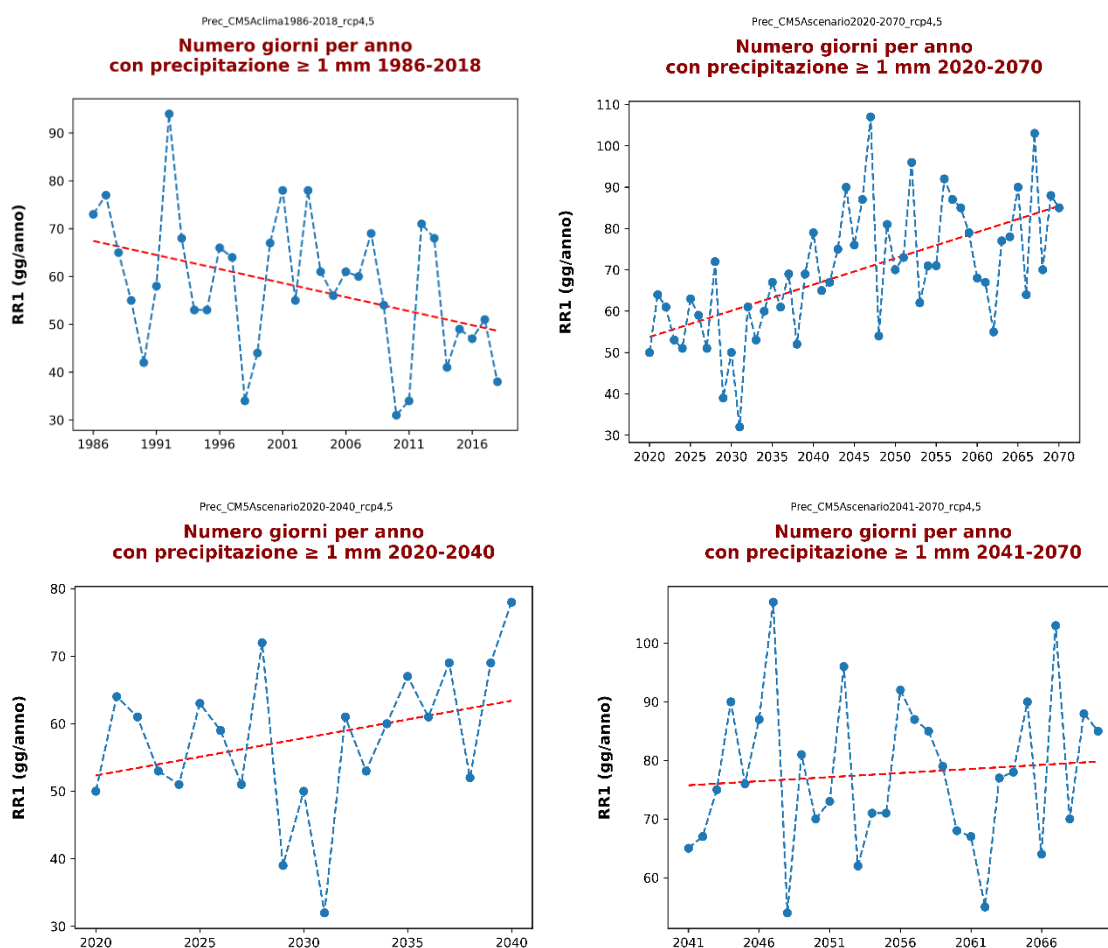


Figure 46 – Nombre de jours par an avec des précipitations d'au moins 1 mm. Modèle CM5A e RCP 4,5.

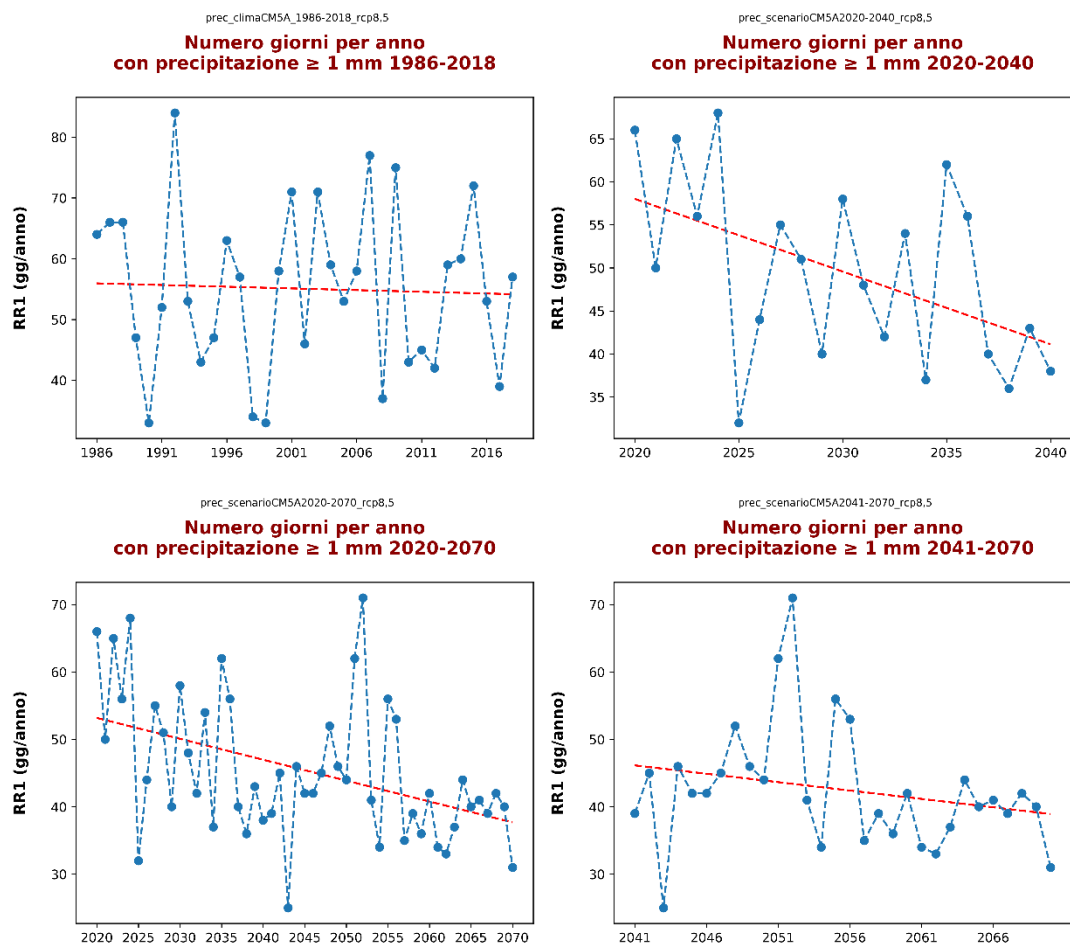
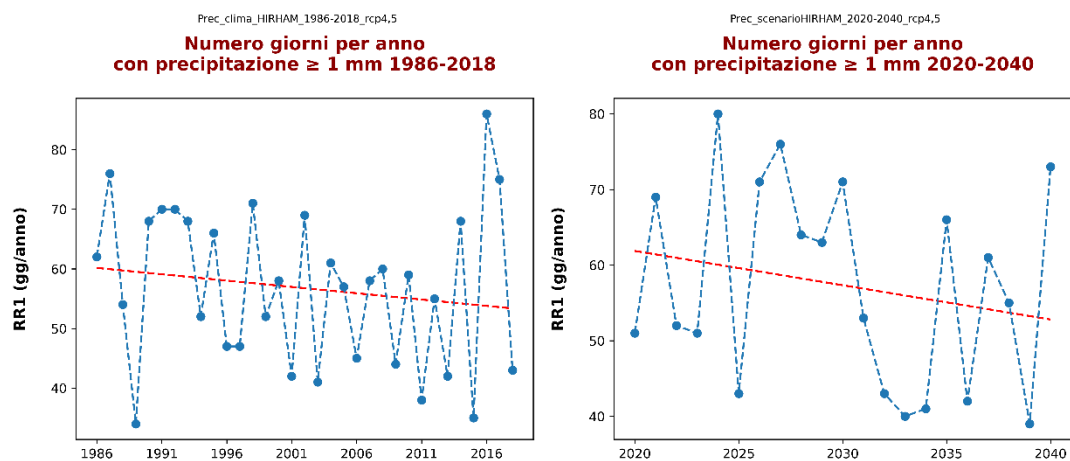


Figure 47 – Nombre de jours par an avec précipitations d’au moins 1 mm. Modèle CM5A e RCP 8,5.



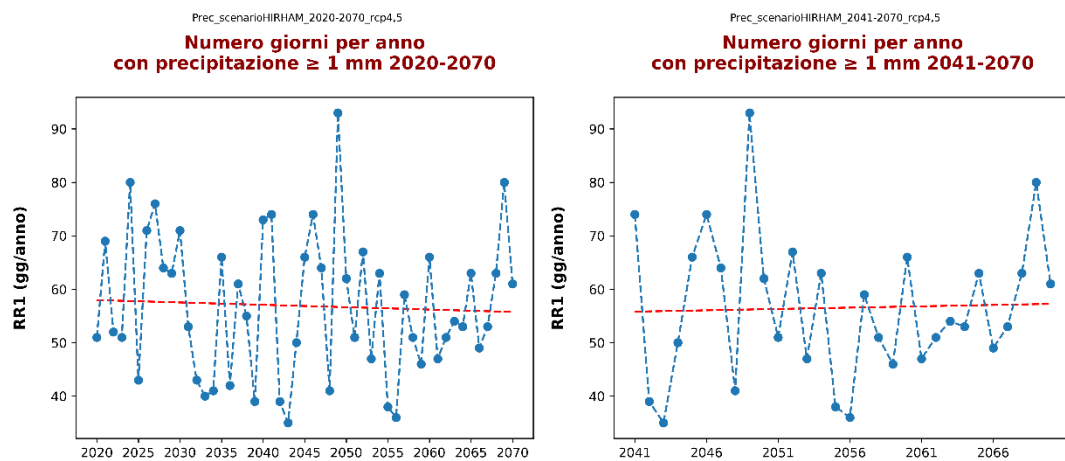


Figure 48 – Nombre de jours par an avec précipitation d'au moins 1 mm. Modèle Hirham e RCP 4,5.

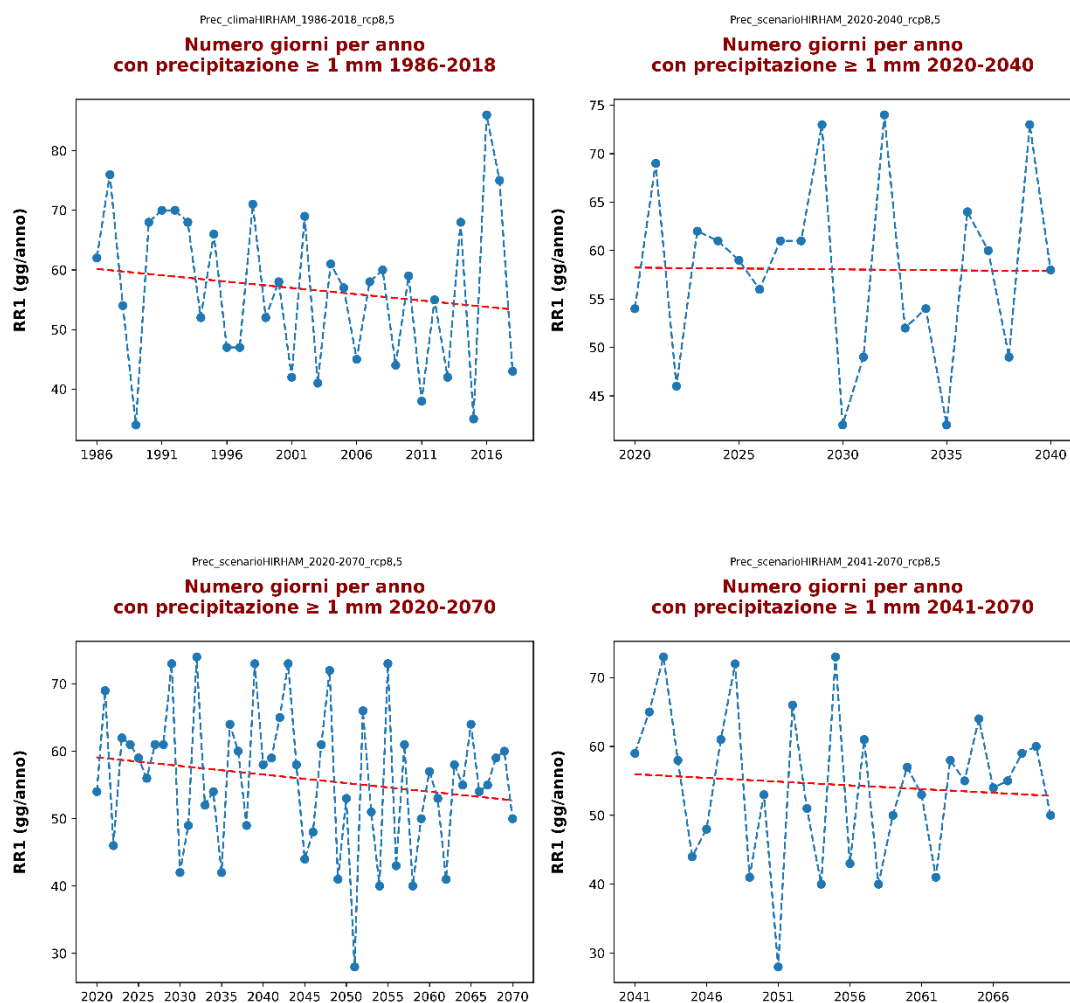


Figure 49 – Nombre de jours par an avec précipitations d'au moins 1 mm. Modèle Hirham et RCP 8,5.

Considérations finales

L'analyse climatique pour la commune d'Oristano pour la période 1961-2010 a permis de définir les criticités et les vulnérabilités des conditions climatiques les plus extrêmes qui pourraient avoir un impact négatif sur le territoire.

Cette affirmation est particulièrement attestée pour les valeurs des températures tant maximales que minimales, alors que, comme on pouvait s'y attendre, les valeurs de tendance pour les précipitations, souvent, ne sont pas significatives.

Alors que l'analyse des données climatiques au cours de la période considérée a donné des résultats assez clairs pour toutes les stations météorologiques considérées, il n'en va pas de même pour les scénarios climatiques futurs des modèles PLSA_CM5A et DIM_HIRHAM, surtout pour les précipitations.

En général, les modèles prévoient une augmentation des températures à moyen terme (2040) et à long terme (2070), une augmentation qui peut être très sévère comme dans le cas du modèle PLSA_CM5A.

À des températures très élevées, aussi bien dans les valeurs minimales que maximales, correspondront des situations de malaise beaucoup plus intenses et fréquentes, comme les vagues de chaleur (indicateur HW), les nuits tropicales et les périodes de sécheresse (indicateurs CDD et SPI).

Les précipitations, comme on pouvait s'y attendre, montrent un comportement pas toujours univoque et avec des résultats dont le niveau de confiance ne peut être aussi élevé que pour les températures (IPCC 5th Assessment, 2013).

En effet, si les précipitations présentent une réduction (en moyenne estimée à 10 % par rapport à la base climatique) du cumul annuel (indicateur AP) pour presque tous les modèles et scénarios, la répartition des précipitations au cours des 50 prochaines années n'est pas claire.

Les modèles et les scénarios donnent en effet des signaux différents en ce qui concerne divers indicateurs : l'indicateur CWD (jours consécutifs avec pluie) croît pour tous les scénarios sauf pour le scénario CM5A RCP 8,5; le cumul des précipitations des événements d'au moins 5 jours consécutifs (Rx5day) montre des variations négligeables pour tous les scénarios; l'indicateur des jours de pluie avec des précipitations de 20 mm diminue considérablement pour tous les scénarios, le scénario du RCP 4,5 pour le modèle CM5A présente une tendance à la hausse, mais pas statistiquement significative.

L'élément le plus intéressant pour les scénarios de précipitations prévus par les modèles est la grande variabilité interannuelle, de sorte que, s'il est vrai que pour de nombreux indicateurs, il n'y a pas de tendance significative ou de signe égal, il est vrai que les valeurs extrêmes sont très éloignées d'une année à l'autre. Par années dans la norme climatique de la région d'Oristano, il peut suivre des années où il pleut beaucoup plus que la moyenne, avec même des cumuls au-dessus de 150 mm en 5 jours et avec un nombre d'événements intenses par an supérieur à 10.

Les modèles ne tiennent pas compte des données horaires de précipitation et ne modélisent donc pas les intensités horaires, une information qui serait évidemment très utile par rapport aux dynamiques des événements extrêmes de précipitation pour la commune d'Oristano.

D'autre part, l'augmentation des événements extrêmes ressort plus clairement de l'analyse des données horaires de précipitations qui montrent, au cours de la période 2006-2018, une tendance significative à l'augmentation de l'intensité.