

Analiza zmian klimatycznych na podstawie danych ERA5

Studium przypadku: Serce Hiszpanii (1994–2025)

Oliwier Stecyk

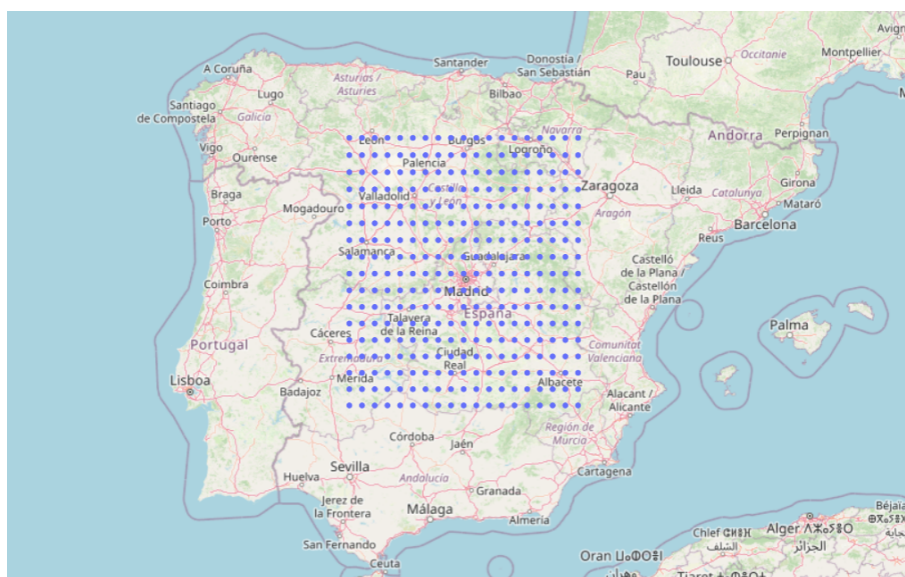
4 stycznia 2026

Spis treści

1	Wstęp i Metodyka	3
2	Charakterystyka zbioru danych i ograniczenia	3
3	Struktura zależności i weryfikacja multikolinearności	4
4	Analiza Trendów i Anomalii Termicznych	6
5	Ekstrema Termiczne i Fenologia	7
5.1	Asymetria ocieplenia: Dni vs Noce	7
5.2	Proces „letnizacji” i fale upałów	8
5.3	Zmiany fenologiczne i redefinicja pór termicznych	9
6	Diagnostyka Mechanizmów Hydrologicznych	10
6.1	Korelacja: Temperatura a degradacja wilgotności gleby	11
6.2	Klimatyczny Bilans Wodny	12
7	Ryzyko i Skutki Biologiczne	13
8	Struktura Danych	14
9	Wnioski	14
9.1	Kluczowe ustalenia: Nowa rzeczywistość klimatyczna	14
9.2	Wykorzystanie uczenia maszynowego	15
9.3	Praktyczne rekomendacje	15
	Literatura i źródła danych	16

1 Wstęp i Metodyka

Niniejsze opracowanie stanowi bezstronną analizę zmian klimatycznych w regionie centralnej Hiszpanii (Meseta Central) w latach 1994–2025. Podstawę empiryczną stanowią dane reanalizy ERA5 pozyskane z serwisu Copernicus Climate Data Store (CDS). Analiza obejmuje zmienne kluczowe dla bilansu radiacyjnego i wodnego: temperaturę powietrza (2 m), wilgotność gleby, zachmurzenie oraz promieniowanie słoneczne. Celem pracy jest nie tylko deskrypcja trendów, ale przede wszystkim diagnostyka mechanizmów fizycznych i ocena ryzyka występowania zjawisk ekstremalnych. Wyniki mają służyć jako fundament pod przyszłe modelowanie predykcyjne z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego (ML).



Rysunek 1: Położenie regionu Meseta Central w Hiszpanii

2 Charakterystyka zbioru danych i ograniczenia

W analizie wykorzystano zbiór danych ERA5, obejmujący szerokie zasób parametrów atmosferycznych i glebowych. Wybór kilku zmiennych wynikał z tego, że klimat jest zjawiskiem złożonym i nie można go opisać jedną miarą. Dane surowe zostały poddane procesowi czyszczenia oraz konwersji jednostek (np. z Kelvinów na stopnie Celsjusza oraz z metrów na milimetry).

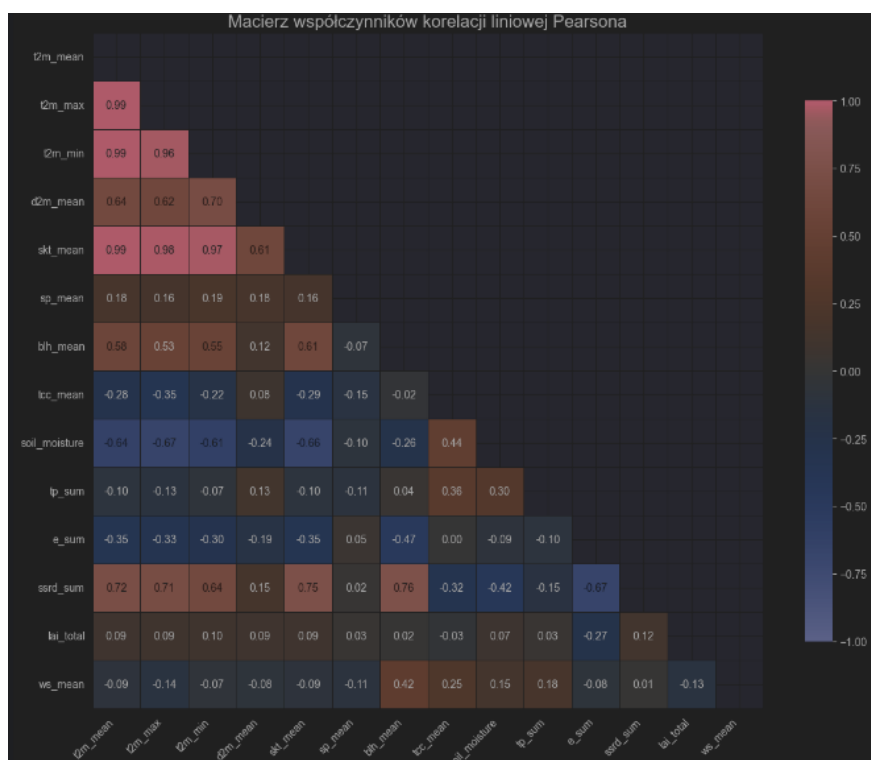
Ograniczenia danych: Należy mieć na uwadze, że ERA5 jest modelem reanalizy o rozdzielczości ok. 31 km. Może on nie doszacowywać lokalnych ekstremów wynikających z mikroklimatu miejskiego (np. wyspa ciepła w Madrycie) lub specyfiki rzeźby terenu, jednak w skali regionalnej stanowi najbardziej wiarygodne źródło danych klimatycznych dostępnych dla niezależnych badaczy.

- **Zmienne termiczne:** Średnia, maksymalna i minimalna temperatura na 2m ($t2m$), temperatura powierzchni gruntu (skt) oraz temperatura punktu rosy ($d2m$).
- **Zmienne hydrologiczne i glebowe:** Wilgotność gleby ($soil_moisture$), suma opadów (tp_sum) oraz suma ewaporacji (e_sum). Na ich podstawie wyliczono bilans wodny regionu.
- **Zmienne radiacyjne i osłonowe:** Całkowite zachmurzenie (tcc) oraz suma promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ($ssrd$).
- **Zmienne biologiczne i dynamiczne:** Wskaźnik ulistnienia (lai_total), wysokość warstwy granicznej (blh) oraz prędkość wiatru (ws_mean).

Tak szeroki dobór cech pozwala wychwycić mniej oczywiste zależności między zmiennymi, co stanowi podstawę do budowy modeli predykcyjnych.

3 Struktura zależności i weryfikacja multikolinearności

W celu zrozumienia wewnętrznej dynamiki badanego systemu klimatycznego, wyznaczono macierz współczynników korelacji liniowej Pearsona (Rys. 2). Pozwala ona na identyfikację kluczowych sprzężeń między zmiennymi atmosferycznymi a stanem podłoża.



Rysunek 2: Macierz korelacji Pearsona dla zmiennych ERA5.

Kluczowe obserwacje diagnostyczne:

- **Sprzężenie termiczno-wilgotnościowe:** Odnotowano silną ujemną korelację między temperaturą maksymalną (*t2m_max*) a wilgotnością gleby (*soil_moisture*) na poziomie **-0,67**. Jest to dowód na to, że fale upałów w tym regionie są nierozdzielnie związane z gwałtownym przesuszeniem profilu glebowego (temperatura rośnie, gleba zmniejsza wilgotność).
- **Rola promieniowania słonecznego:** Zmienna *ssrd_sum* (promieniowanie krótkofalowe) wykazuje silną dodatnią korelację z temperaturą gruntu *skt_mean* (**0,75**), co oznacza, że wyższe nasłonecznienie wiąże się z wyższą temperaturą powierzchni.

	feature	VIF
4	skt_mean	99.650768
1	t2m_max	43.729447
2	t2m_min	36.886720
11	ssrd_sum	13.209564
6	blh_mean	6.101081
3	d2m_mean	4.462932
10	e_sum	3.720322
8	soil_moisture	3.017844
13	ws_mean	1.956339
7	tcc_mean	1.803644
9	tp_sum	1.298556
5	sp_mean	1.149366
12	lai_total	1.141452

Rysunek 3: Wartości współczynnika VIF dla predyktorów.

Analiza współliniowości (VIF)

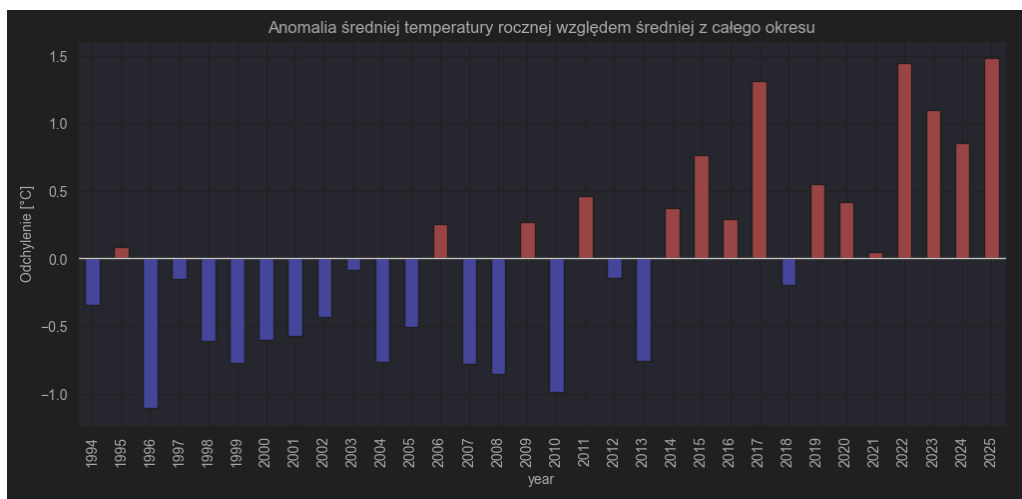
W celu oceny stabilności przyszłego modelu wyznaczono współczynnik inflacji wariancji (VIF). Wartości przekraczające próg 10 wskazują na silną wielowspółliniowość, która może prowadzić do błędnej estymacji wag modelu.

Ekstremalnie wysokie wyniki dla zmiennych termicznych (*skt_mean* ≈ 99 , *t2m_max* ≈ 43) potwierdzają niemal pełną redundancję informacji. Fizycznie wynika to ze ścisłego sprzężenia temperatury gruntu i przyziemnej warstwy atmosfery. Zmienne takie jak *tp_sum* czy *soil_moisture* wykazują niskie wartości VIF, co czyni je stabilnymi predyktorami o unikalnym wkładzie informacyjnym.

Wniosek pod kątem Machine Learning: Wysoka korelacja między parametrami temperatury sugeruje, że w procesie budowy modelu predykcyjnego należy dokonać selekcji cech i wybrać jedną reprezentatywną zmienną termiczną (np. *t2m_max*), aby uniknąć problemu multikolinearności i zawyżenia wyników VIF.

4 Analiza Trendów i Anomalii Termicznych

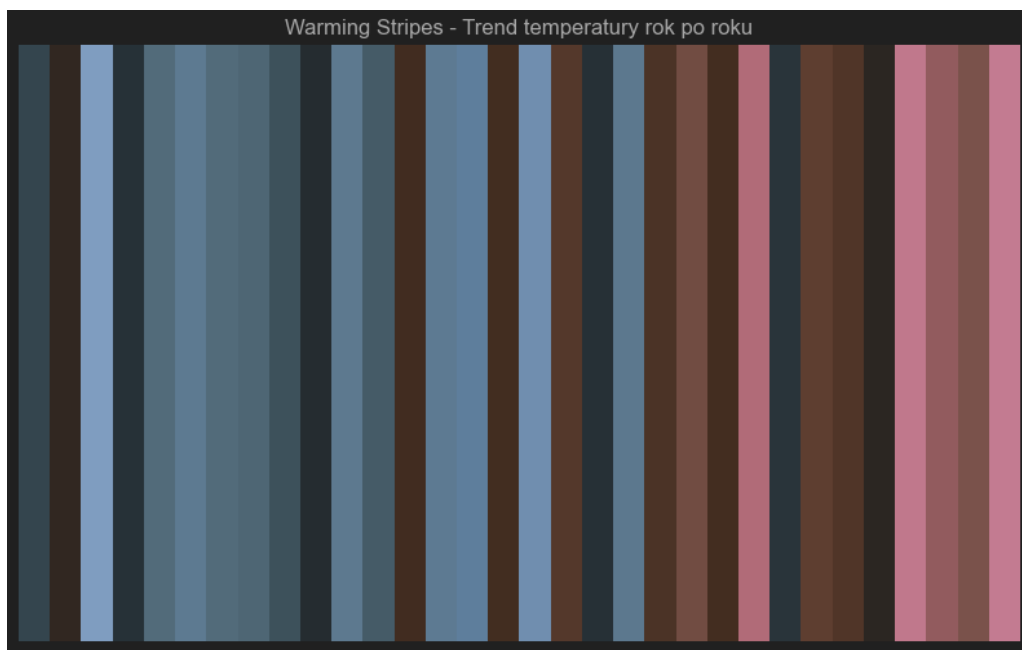
Wykres pokazuje zmiany średniej temperatury w regionie w ciągu 31 lat. Jako punkt odniesienia wykorzystano średnią z całego okresu, co pozwala zidentyfikować lata cieplejsze i chłodniejsze od typowego poziomu (Rys. 4).



Rysunek 4: Anomalie średniej temperatury rocznej względem średniej z całego okresu 1994–2025.

Podstawowym narzędziem służącym do zobrazowania skali problemu jest analiza anomalii temperatury względem przyjętego okresu referencyjnego. Zastosowanie średniej z całego 31-letniego cyklu pomiarowego jako wartości bazowej pozwala w sposób obiektywny zidentyfikować moment, w którym lokalny klimat zaczął trwale odbiegać od swojej charakterystyki wieloletniej.

Analiza odchyleń rocznych (Rys. 4) ujawnia wyraźną strukturę trendu. Pierwsze dwie dekady badanego okresu zdominowane były przez wartości ujemne (temperatury kształtowały się poniżej średniej z całego wielolecia). Sytuacja ta uległa gwałtownej zmianie po 2013 roku, od kiedy obserwuje się serię niemal wyłącznie dodatnich anomalii. Fakt, że w ostatnich latach (2022–2025) odchylenia te osiągają poziom $+1,5^{\circ}\text{C}$ względem średniej z ostatnich trzech dekad, jest sygnałem alarmującym. Świadczy to o tym, że tempo ocieplenia w ostatniej fazie jest znacznie wyższe, niż sugerowałyby to statystyka całego okresu.



Rysunek 5: Warming Stripes – wizualizacja dynamiki ocieplenia rok po roku.

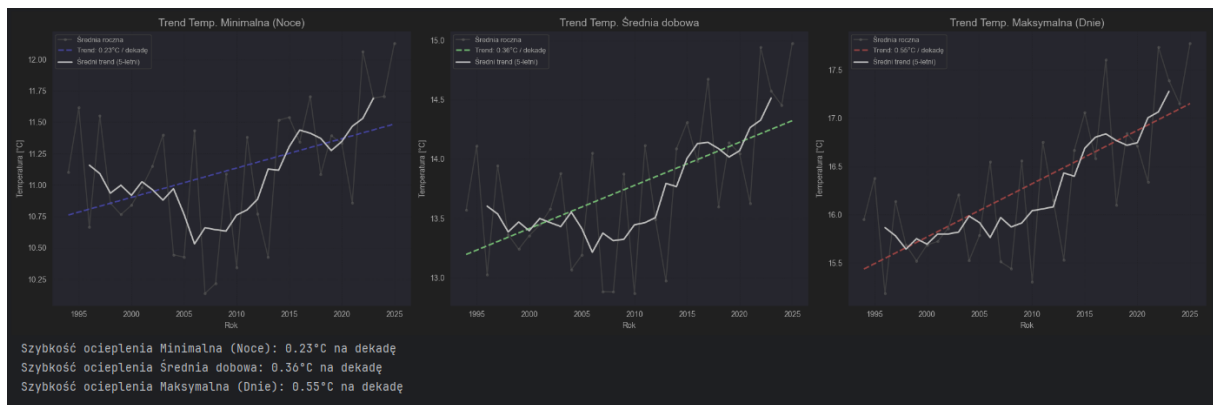
Graficznym dopełnieniem tej analizy matematycznej jest wykres „Warming Stripes” (Rys. 5). Każdy pasek reprezentuje odchylenie temperatury konkretnego roku od wyznaczonej średniej 31-letniej. Przejście od głębokich błękitów i szarości (lata poniżej średniej) do nasyconych odcieni czerwieni i brązu (lata powyżej średniej) wizualizuje proces „wypychania” klimatu regionu w stronę ekstremów cieplnych. Taka struktura danych potwierdza, że ocieplenie w centralnej Hiszpanii ma charakter nieliniowy i uległo znacznemu przyspieszeniu w ciągu ostatniej dekady.

5 Ekstrema Termiczne i Fenologia

Wzrost średniej temperatury pociąga za sobą drastyczne zmiany w strukturze ekstremów pogodowych oraz przesunięcie cykli biologicznych regionu.

5.1 Asymetria ocieplenia: Dni vs Noce

Analiza trendów dla temperatur maksymalnych i minimalnych (Rys. 6) ujawnia istotną asymetrię. Choć obie wartości rosną, to temperatury maksymalne (dni) rosną w tempie **0,55°C na dekadę**, czyli ponad dwukrotnie szybciej niż temperatury minimalne (noce: 0,23°C/dekadę).

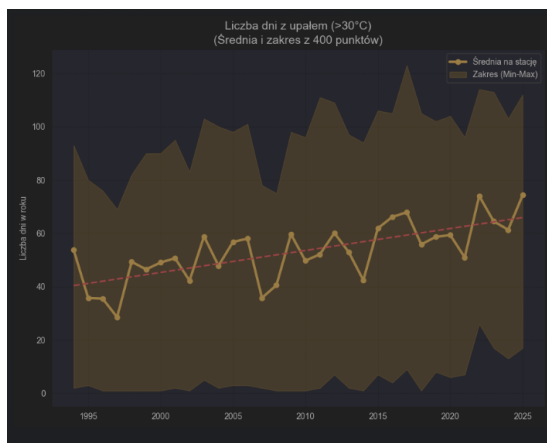


Rysunek 6: Porównanie szybkości ocieplenia dla nocy (lewa), średniej dobowej (środek) i dni (prawa).

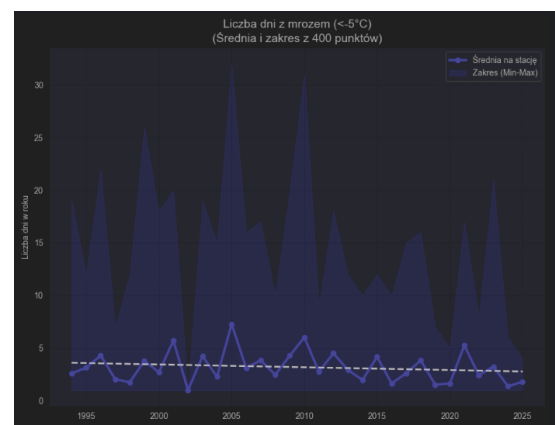
Analiza trendów (Rys. 6) wykazuje wyraźną asymetrię: temperatury maksymalne rosną o 0,55°C na dekadę, czyli ponad dwukrotnie szybciej niż nocne (0,23°C). Taka dysproporcja nasila stres termiczny roślinności w ciągu dnia, przy jednoczesnym braku wystarczającego ochłodzenia nocą niezbędnego do regeneracji zasobów wody. W praktyce prowadzi to do destabilizacji warunków wegetacji i zaostrzenia ekstremów dobowych w całym regionie.

5.2 Proces „letnizacji” i fale upałów

Najbardziej alarmującym zjawiskiem jest wzrost liczby dni upalnych przy jednoczesnym zaniku mrozu. Obecnie liczba dni z temperaturą $> 30^{\circ}\text{C}$ wzrosła z ok. 40 do ponad 70 rocznie (Rys. 7).



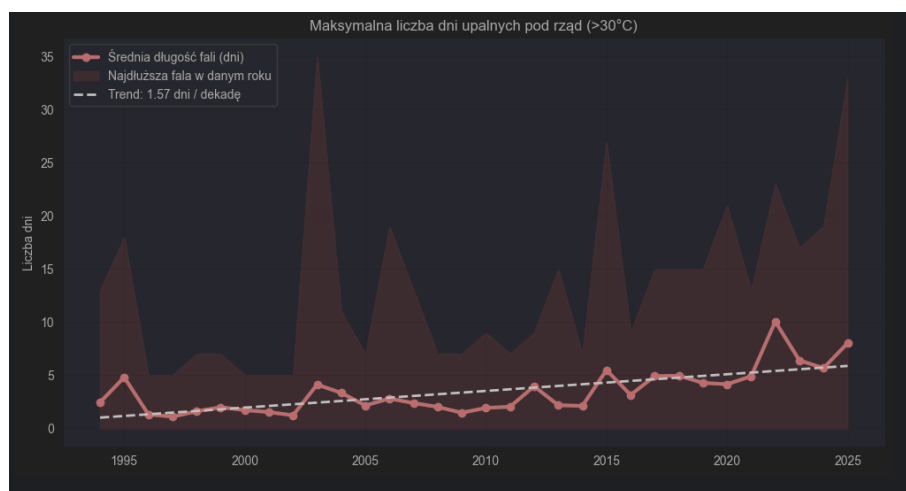
(a) Liczba dni upalnych ($> 30^{\circ}\text{C}$)



(b) Liczba dni mroźnych ($< -5^{\circ}\text{C}$)

Rysunek 7: Zmiany w częstotliwości występowania ekstremów termicznych.

Kluczowym zagrożeniem nie jest jednak sama liczba dni gorących, ale ich koncentracja w czasie. Dane wskazują na wydłużanie się tzw. fal upałów (Rys. 8). Maksymalna liczba dni upalnych pod rząd wzrosła o **1,57 dnia na dekadę**. W ekstremalnych latach (np. 2022) fale te trwały nieprzerwanie przez ponad 30 dni, co stanowi bezpośrednie zagrożenie dla stabilności sieci energetycznych i zdrowia publicznego.



Rysunek 8: Trend maksymalnej długości fal upalnych (liczba dni pod rząd).

5.3 Zmiany fenologiczne i redefinicja pór termicznych

Gwałtowny wzrost temperatury wymusza operacyjną redefinicję pór termicznych w regionie Meseta Central. Ze względu na specyfikę klimatu śródziemnomorskiego o cechach kontynentalnych, do analizy przyjęto autorskie progi termiczne dla średniej dobowej temperatury powietrza: Zima ($T < 8^{\circ}\text{C}$), Lato ($T \geq 20^{\circ}\text{C}$) oraz okresy przejściowe.



Rysunek 9: Zmiany w strukturze pór termicznych roku: ekspansja lata kosztem redukcji okresów chłodnych i przejściowych.

Analiza zmian w liczbie dni termicznych (Rys. 9) dokumentuje proces głębokiej przebudowy struktury roku. Obserwuje się wyraźną dominację fazy letniej, która systematycznie wypiera okresy chłodne. Taka presja termiczna prowadzi do destabilizacji lokalnych agrosystemów, co najlepiej obrazuje wskaźnik rozpoczęcia wiosny termicznej (Rys. 10).



Rysunek 10: Trend zmiany terminu rozpoczęcia wiosny termicznej (Dzień 1 = 1 stycznia).

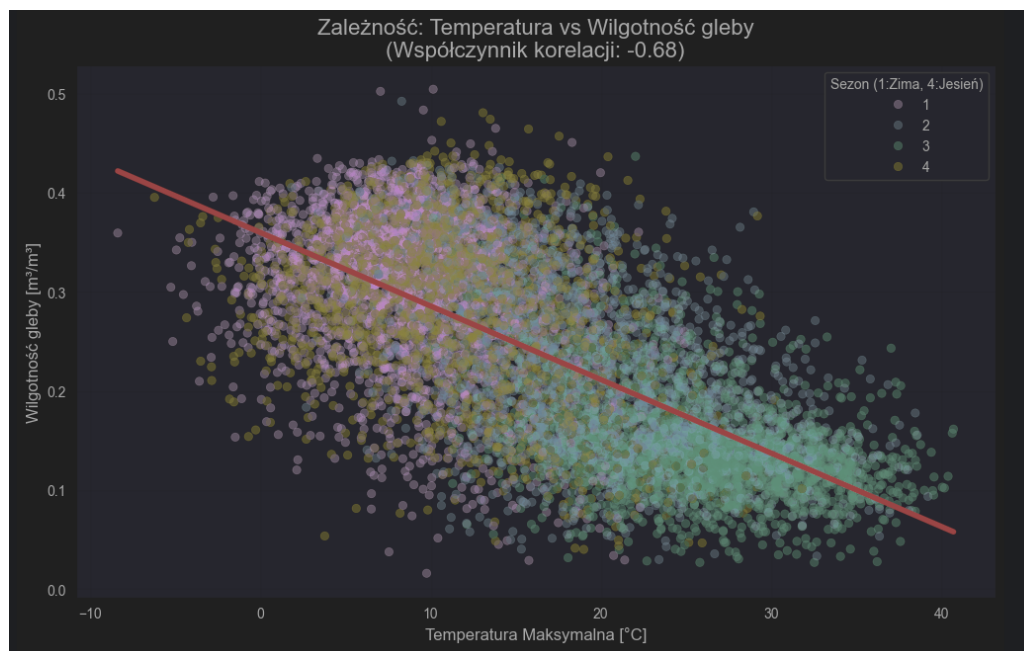
Zgodnie z wyznaczonym trendem, wiosna w centralnej Hiszpanii rozpoczyna się obecnie średnio o **12,1 dnia wcześniej** niż w roku 1994. Tempo tego przyspieszenia (3,9 dnia na dekadę) ma krytyczne znaczenie fenologiczne. Przedwczesny start wegetacji, stymulowany anomalnie wysokimi temperaturami wczesną wiosną, drastycznie zwiększa ryzyko narażenia młodych tkanek roślinnych na przymrozki radiacyjne. Mimo ogólnego ocieplenia, zjawiska te wciąż występują w klimacie Mesety jako niebezpieczne ekstrema w marcu i kwietniu, co czyni rolnictwo regionu bardziej podatnym na straty.

6 Diagnostyka Mechanizmów Hydrologicznych

Kluczowym elementem analizy klimatu Mesety Central jest zrozumienie relacji między wzrostem temperatury a dynamiką zasobów wodnych. Silna ujemna korelacja ($r = -0,68$) potwierdza, że to właśnie fale upałów są głównym czynnikiem powodującym gwałtowne wysychanie gleby w regionie (Rys. 11).

6.1 Korelacja: Temperatura a degradacja wilgotności gleby

Kluczowym dowodem na bezpośredni wpływ ocieplenia na ekosystem jest analiza rozrzutu (*scatter plot*) relacji temperatury maksymalnej do wilgotności gleby (Rys. 11).



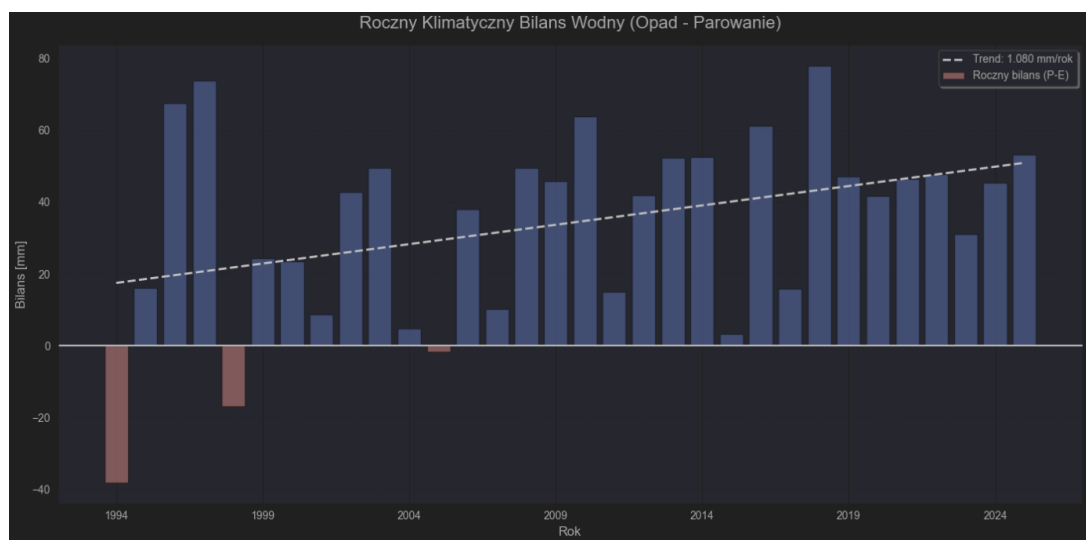
Rysunek 11: Relacja między temperaturą maksymalną a wilgotnością gleby (korelacja: -0,68).

Dane wskazują, że gdy temperatura przekracza próg 30°C , wilgotność podłoża drastycznie spada do poziomów krytycznych (poniżej $0,1\text{m}^3/\text{m}^3$), co w warunkach hiszpańskich oznacza wystąpienie silnej suszy rolniczej. Podział danych na pory roku uwidacznia istotną różnicę w stabilności systemu: o ile zimą (punkty fioletowe) zasoby wody w glebie są relatywnie stałe, o tyle latem (punkty zielone) kondycja podłoża zależy niemal całkowicie od tego, jak wysoka była temperatura danego dnia.

Dopełnieniem tej analizy jest Roczny Klimatyczny Bilans Wodny (Rys. 12), wyliczony jako różnica między sumą opadów a parowaniem. Takie zestawienie pozwala ocenić realne zasoby wodne regionu — sprawdza, czy parowanie wymuszone przez wysokie temperatury nie zaczyna przeważać nad dostawami wody z opadów deszczu.

6.2 Klimatyczny Bilans Wodny

Kolejnym etapem analizy jest ocena Roczne Klimatycznego Bilansu Wodnego (Rys. 12), wyliczonego jako różnica między sumarycznymi opadami a parowaniem (P-E). Parametr ten pozwala sprawdzić, ile wody faktycznie pozostaje w środowisku po uwzględnieniu strat wynikających z rosnącej temperatury i nasłonecznienia.

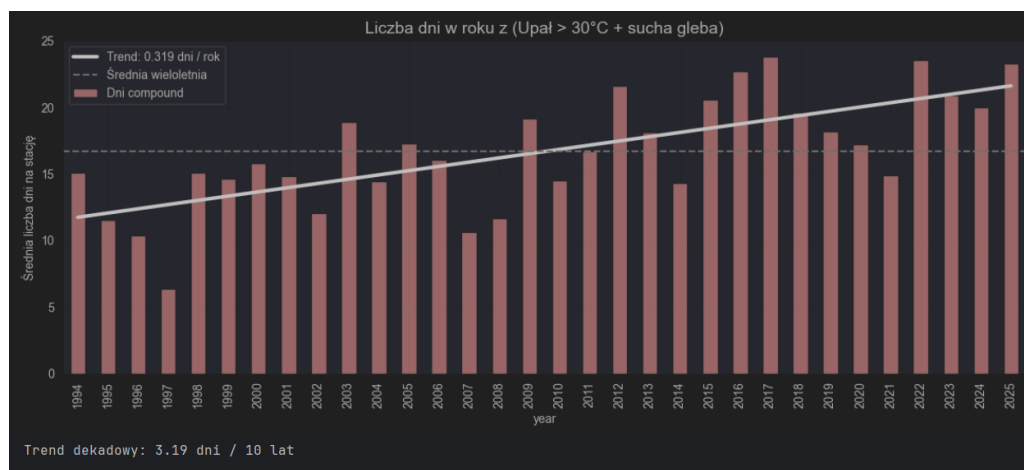


Rysunek 12: Dynamika klimatycznego bilansu wodnego (Opad - Parowanie) w latach 1994–2025.

W badanym wieloleciu obserwujemy bardzo dużą zmienność międzyroczną, co jest typowe dla kontynentalnego klimatu Hiszpanii. Choć wyznaczony trend liniowy wykazuje niewielką tendencję wzrostową (ok. 1 mm rocznie), to z punktu widzenia rolnictwa sytuacja pozostaje krytyczna. Problem polega na tym, że coraz wyższe temperatury w sezonie letnim wymuszają tak gwałtowne parowanie, że nawet lata z teoretycznie dodatnim bilansem nie gwarantują regeneracji zasobów wody w glebie. Krótkotrwałe, ulewne deszcze (często zawyżające roczną sumę opadów) nie są w stanie skompensować strat wynikających z chronicznych fal upałów, co prowadzi do pogłębiania się suszy rolniczej mimo braku wyraźnego trendu spadkowego w samych sumach bilansu rocznego.

7 Ryzyko i Skutki Biologiczne

Współczesna analiza klimatu Mesety Central musi uwzględniać tzw. zdarzenia złożone (*compound events*). Objawiają się one poprzez jednoczesne występowanie ekstremalnych upałów oraz krytycznego deficytu wilgoci w glebie (Rys. 13). To właśnie ta kombinacja, a nie sama temperatura, jest najbardziej niszcząca dla rolnictwa i lasów.

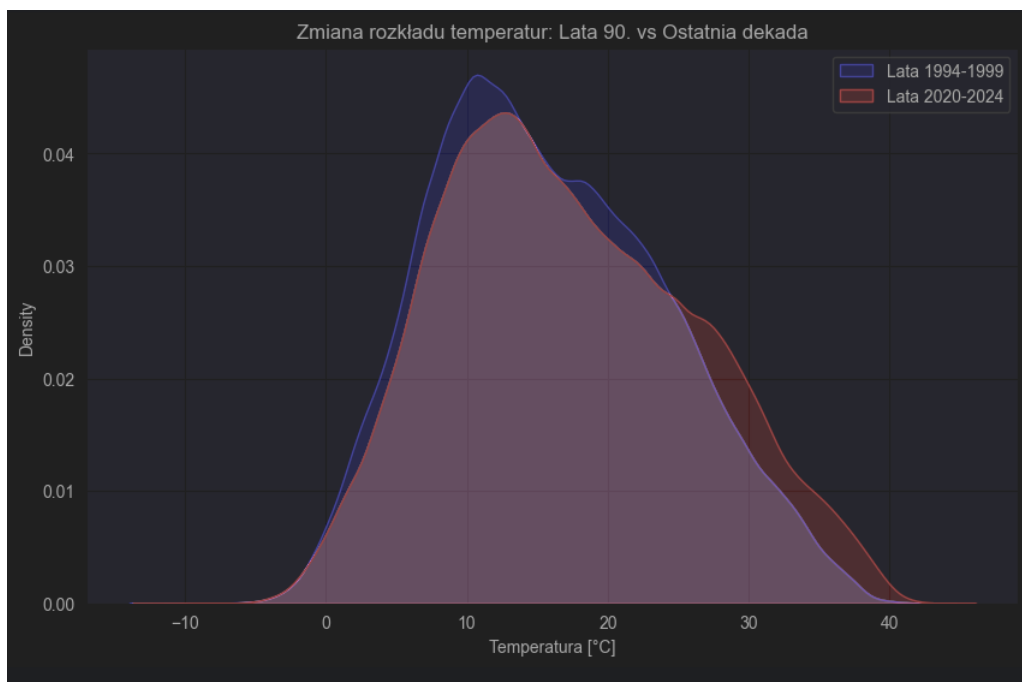


Rysunek 13: Częstotliwość dni typu (Upał + Ekstremalnie sucha gleba).

Z danych wynika, że liczba dni o tak wysokim ryzyku pożarowym i agrometeorologicznym uległa niemal podwojeniu w ciągu ostatnich trzech dekad. Trend wzrostowy wynosi **3,19 dnia na każdą dekadę**. Tak silna presja bezpośrednio uderza w kondycję biosfery, co potwierdziły nasze analizy wskaźnika ulistnienia (LAI). Obserwujemy mechanizm „przyspieszonego zamierania”: roślinność, stymulowana bardzo ciepłymi wiosnami, gwałtownie startuje z wegetacją, ale w lipcu i sierpniu „zderza się ze ścianą” braku wody. Skutkuje to znacznie szybszym usychaniem liści i degradacją roślinności niż miało to miejsce w latach 90.

8 Struktura Danych

Porównanie rozkładów temperatury (Rys. 14) dla lat 90. oraz ostatniej dekady pozwala na wyciągnięcie kluczowego wniosku: ocieplenie w regionie Meseta Central nie polega jedynie na przesunięciu średniej. Najważniejszą zmianą, jaką widzimy na wykresie, jest wyraźne „rozlanie się” czerwonego pola w stronę bardzo wysokich wartości (prawy bok wykresu).



Rysunek 14: Zmiana rozkładu statystycznego temperatury (KDE) – Lata 90. vs Ostatnia dekada.

W praktyce oznacza to drastyczny wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych fal gorąca. O ile w latach 90. temperatury przekraczające 35 – 40°C były zjawiskiem rzadkim (niebieski szczyt kończy się znacznie szybciej), o tyle obecnie stały się one stałym elementem każdego lata. Można stwierdzić, że lokalny klimat wszedł w stan znacznie większej zmienności – zjawiska, które trzydzieści lat temu uznawano za rekordowe anomalie, dzisiaj wpisują się w nową, znacznie gorętszą normę pogodową tego regionu.

9 Wnioski

9.1 Kluczowe ustalenia: Nowa rzeczywistość klimatyczna

Analiza danych z ostatnich 31 lat dowodzi, że serce Hiszpanii nie tylko się ociepla, ale przechodzi fundamentalną transformację. Najważniejsze wnioski to:

- **Koniec stabilności:** Region Meseta Central ewoluuje w stronę klimatu półpustynnego. Lato przestało być porą roku, a stało się dominującym stanem pogodowym, który „wypiera” wiosnę i jesień.

- **Kumulacja zagrożeń:** Największym wyzwaniem nie jest sam wzrost temperatury o $1,1^{\circ}\text{C}$, ale zjawisko „Zabójczego Kombo” – nakładania się ekstremalnych upałów na całkowite przesuszenie gleby. Częstotliwość takich dni wzrosła niemal dwukrotnie, co czyni pożary i straty w rolnictwie niemal nieuniknionymi.
- **Dni palą mocniej niż noce:** Skoro dni ocieplają się dwa razy szybciej niż noce, gleba nie ma czasu na regenerację. To prowadzi do ujemnego bilansu wodnego – Hiszpania traci więcej wody przez parowanie, niż zyskuje z deszczu.

9.2 Wykorzystanie uczenia maszynowego

Dane wskazują, że modele predykcyjne mogą pomóc w przewidywaniu problemów klimatycznych:

- Możemy np. przewidywać, kiedy wystąpi ekstremalny deficyt wilgotności gleby albo kiedy rośnie ryzyko pożarów.
- Do takich prognoz najlepiej używać zmiennych: promieniowania słonecznego, zachmurzenia, wilgotności gleby oraz wskaźników bilansu wodnego.
- Użycie modeli takich jak Random Forest czy XGBoost pozwoli wychwycić zależności, których na pierwszy rzut oka nie widać.

9.3 Praktyczne rekomendacje

Na podstawie wyników analizy warto rozważyć następujące działania:

- **Rolnictwo:** Wprowadzenie metod, technik, nowych maszyn odpornych na przesunięcie kalendarza oraz do nowych cieplejszych warunków klimatycznych.
- **Bezpieczeństwo:** Budowa systemów wczesnego ostrzegania przed suszą i upałami, które nie tylko mierzą temperaturę, ale też przewidują połączenia ekstremów (upały + brak wody). W takich momentach warto mieć przygotowane lokalne źródła wody dla rolników i społeczności.
- **Gospodarka wodna:** Tworzenie zbiorników wodnych i magazynów retencyjnych, które pozwolą przechować wodę z krótkich, intensywnych opadów i wykorzystać ją w okresach suszy.
- **Edukacja i świadomość społeczna:** Szkolenia dla rolników i mieszkańców o nowych warunkach klimatycznych, ostrzeganie o ekstremach i edukacja o sposobach oszczędzania wody oraz ochrony upraw.

Literatura i źródła danych

Literatura

- [1] Copernicus Climate Change Service (C3S). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Data Store (CDS).
- [2] Schneider, D. (2021). *The Climate Data Guide: Climate Analysis Tools and Metrics*. National Center for Atmospheric Research (NCAR). Dostęp online: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-tools>
- [3] Statology (2023). *How to Plot a Time Series in Seaborn*. Dostęp online: <https://www.statology.org/seaborn-time-series/>
- [4] Poespas, J. (2025). *Advanced Seaborn Visualizations for Anomaly Detection in Climate Data*. Dostęp online: <https://blog.poespas.me/posts/2025/03/04/advanced-seaborn-visualizations-anomaly-detection/>