



Comune di Livorno

**DATA-SET INFORMATIZZATO DI DATI
RASTER E VETTORIALI GEOSPAZIALI
RILEVATI MEDIANTE PIATTAFORME SATELLITARI E UAS (DRONI)
PER LO STUDIO DELLE ISOLE DI CALORE E LA PIANIFICAZIONE
DI MISURE PER L'ADATTAMENTO E IL CONTRASTO
AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Report preliminare – Dicembre 2024

Sommario

Sommario	2
Introduzione	3
Sintesi del lavoro svolto	3
FASE 1 RILIEVI SATELLITARI SULL'INTERO TERRITORIO COMUNALE	7
1.1 Le mappe delle temperature superficiali da satellite	7
1.2 La mappa della permeabilità delle superfici da satellite	13
1.3 La mappa di albedo da satellite	16
FASE 2 RILIEVI AEREI CON UAS SU AREE CRITICHE	19
Materiale di consegna FASE 1	20
Materiale di consegna FASE 2	20
Piattaforma Web-GIS	21
Conclusioni	21

Introduzione

In un contesto urbano ormai caratterizzato da sfide ambientali e climatiche rilevanti per la cittadinanza, pubblica amministrazione con tecnici e professionisti giocano un ruolo importante nella pianificazione e progettazione di analisi e soluzioni finalizzate a contrastare gli effetti del cambiamento climatico.

Una delle principali criticità climatiche per cui le amministrazioni sono portate a sperimentare ipotesi di adattamento porta il nome di **Isola di calore**: fenomeno che prende in considerazione la differenza di temperatura in diverse parti della città e che si intensifica, causando disagi a persone e cose, nei periodi estivi in presenza di forti ondate di calore.

L'assetto morfologico della città, i tipi di attività presenti, i materiali che caratterizzano l'edificato e lo spazio aperto sono solo alcuni aspetti che influenzano notevolmente l'isola di calore.

L'amplificazione di tale fenomeno ha conseguenze negative sulla salute umana, sulla qualità dell'aria e sulla domanda di energia.

Saper dunque proporre misure ed azioni politiche di adattamento della città sperimentando, per esempio, soluzioni basate sulla natura significa influire e modificare il microclima urbano riportando in ambito urbano condizioni di benessere grazie alla presenza di nuove aree verdi e permeabili che riducono le temperature estreme e migliorano la qualità dell'aria.

Affrontare il problema delle isole di calore è un'occasione per migliorare la vivibilità e fruibilità delle nostre città.¹

Sintesi del lavoro svolto

Nell'ambito dello studio delle "Isole di calore" e dello sviluppo e pianificazione di misure atte a contrastare e mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici, nel territorio comunale, AeroDron ha raccolto ed elaborato un dataset informatizzato di dati raster e vettoriali geospaziali rilevati mediante piattaforme satellitari e Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (*Unmanned Aircraft System* - UAS), comunemente chiamati droni.

Le operazioni realizzate per ottenere quanto sopradescritto entro il confine comunale della città di Livorno, ovvero mappature relative ai fenomeni dell'albedo, della permeabilità delle superfici, delle temperature superficiali e della qualità dell'aria, sono state strutturate in due fasi principali:

- FASE 1 – Rilievi satellitari sull'intero territorio comunale
- FASE 2 – Rilievi aerei con UAS su aree critiche

¹ *Città e climate change. La vulnerabilità delle aree urbane alle isole di calore*, Gaglione F. (2022)



Perimetrazione del territorio comunale di Livorno



Identificazione delle aree oggetto di rilievo (da stabilirsi in FASE 2)

Per quanto concerne lo sviluppo delle mappature di ricognizione generale dei fenomeni sull'intero territorio comunale, AeroDron si è servita di piattaforme satellitari NASA e, nello specifico, ha elaborato dati registrati dal satellite Landsat-8 per ottenere:

- Mappe delle temperature superficiali
- Mappa della permeabilità delle superfici
- Mappa di albedo

Successivamente, per ogni area identificata saranno effettuati dei voli specifici servendosi di UAS con a bordo sensori specializzati per il rilevamento di informazioni multispettrali (bande del visibile e del vicino infrarosso), termiche e sulla qualità dell'aria.

I voli potranno essere eseguiti con UAS ad **ala fissa** (il piano di volo viene definito via software e caricato nella memoria del velivolo, il quale esegue in autonomia le operazioni di volo) e **multirotores** (il piano di volo viene eseguito direttamente dal pilota sul posto) a un'altitudine operativa inferiore a 100 m AGL.

Per i voli ad ala fissa, i fotogrammi saranno eseguiti come serie di strisciate a quota costante. Le singole strisciate seguono la pendenza del terreno sottostante.

I fotogrammi consecutivi di una stessa strisciata hanno un ricoprimento in direzione longitudinale (overlap) maggiore del 70%; invece, il ricoprimento trasversale fra modelli appartenenti a strisciate contigue (sidelap) non è inferiore al 70%.

Con lo scopo di ottenere un esaustivo set di informazioni territoriali geospaziali utile all'Amministrazione Comunale e ad ogni altro ente preposto in merito allo studio del fenomeno "Isola di calore", AeroDron potrà, per ciascuna area designata, ottenere ed elaborare dati ascrivibili alle seguenti tematiche:

- Temperature superficiali
- Permeabilità delle superfici
- Albedo
- Qualità dell'aria

Nei prossimi capitoli verranno descritte le informazioni tecniche e i principali output ottenuti per ogni fase; la tabella, qui riportata, fa infine sintesi delle relazioni tra i sensori installati e i dati acquisiti.

ANALISI CLIMATICA			
STRUMENTO	SENSORE		DATI ACQUISITI
 Landsat-8		OLI e TIRS	Temperatura superficiale
			Indice NDVI / Permeabilità
			Albedo
 Drone ad ala fissa		Termico	Temperatura superficiale
		Multispettrale	Indice NDVI / Permeabilità
			Albedo
 Multirotore		Qualità dell'aria	Temperatura dell'aria
			Umidità relativa
			Pressione atmosferica
			Inquinanti (NO ₂ /SO ₂ /CO/PM _{1-2.5-10})

FASE 1

RILIEVI SATELLITARI SULL'INTERO TERRITORIO COMUNALE

La ricognizione conoscitiva dell'intero territorio comunale di Livorno, in merito ai temi di temperatura superficiale, permeabilità e albedo, è stata condotta mediante l'utilizzo di dati satellitari NASA, con copertura nuvolosa inferiore al 20%, registrati dalla piattaforma Landsat-8 (risoluzione 30 m x 30 m) nei seguenti giorni estivi:



- 5 giugno 2024 | ore 12:04 locali
- 16 luglio 2024 | ore 11:58 locali
- 1° agosto 2024 | ore 11:58 locali

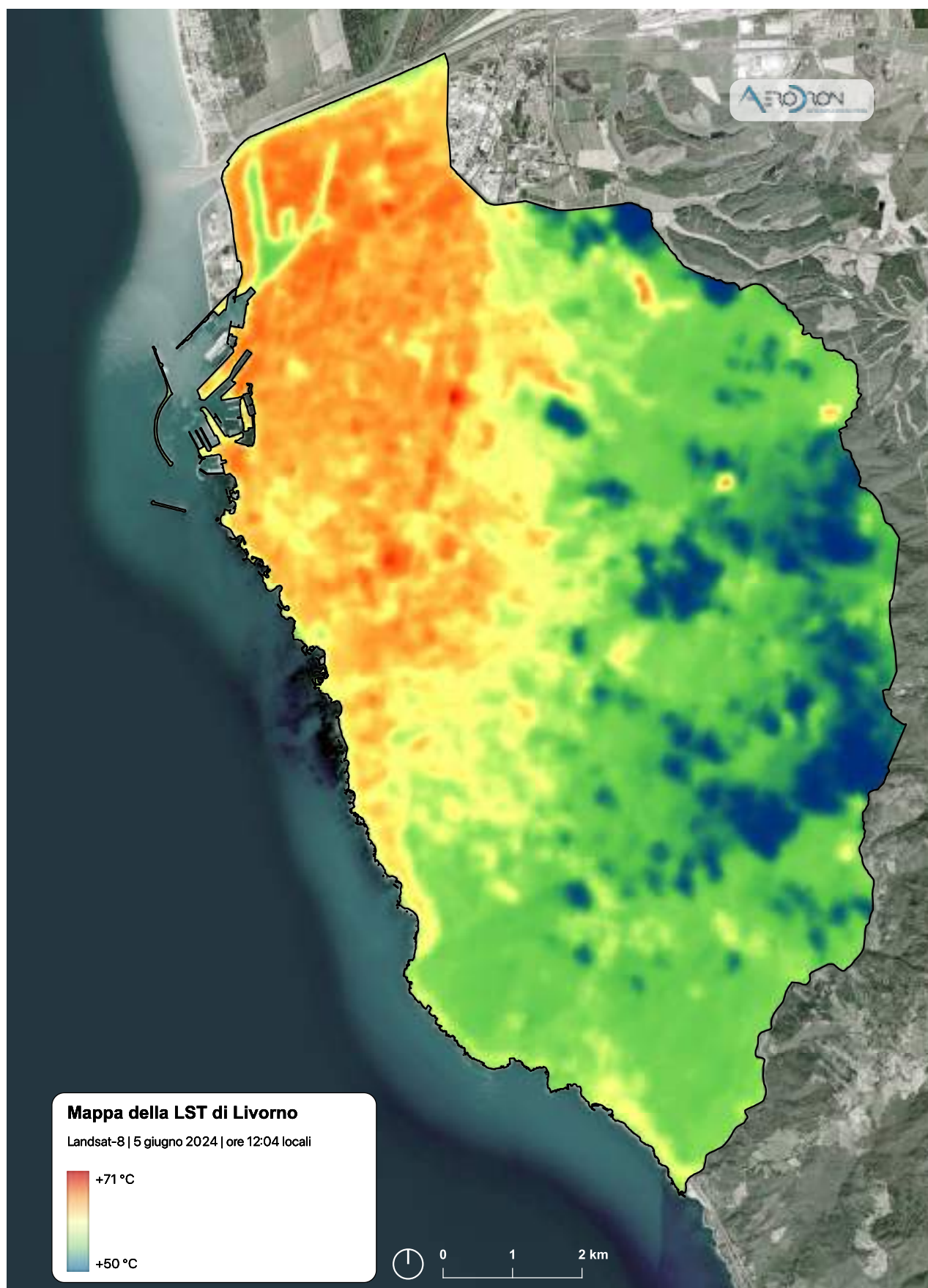
1.1 Le mappe delle temperature superficiali da satellite

Parametro principale per studiare il fenomeno isola di calore è la **temperatura superficiale**: come il nostro tessuto urbano risponde all'irraggiamento solare? Se il caldo in estate diventa quasi insopportabile durante un'ondata di calore, anche la composizione morfologica e i materiali usati in ambiente urbano ne sono una causa.

È stata, quindi, condotta una prima indagine preliminare per analizzare il fattore **LST** (*Land Surface Temperature*) entro i confini comunali della città di Livorno.

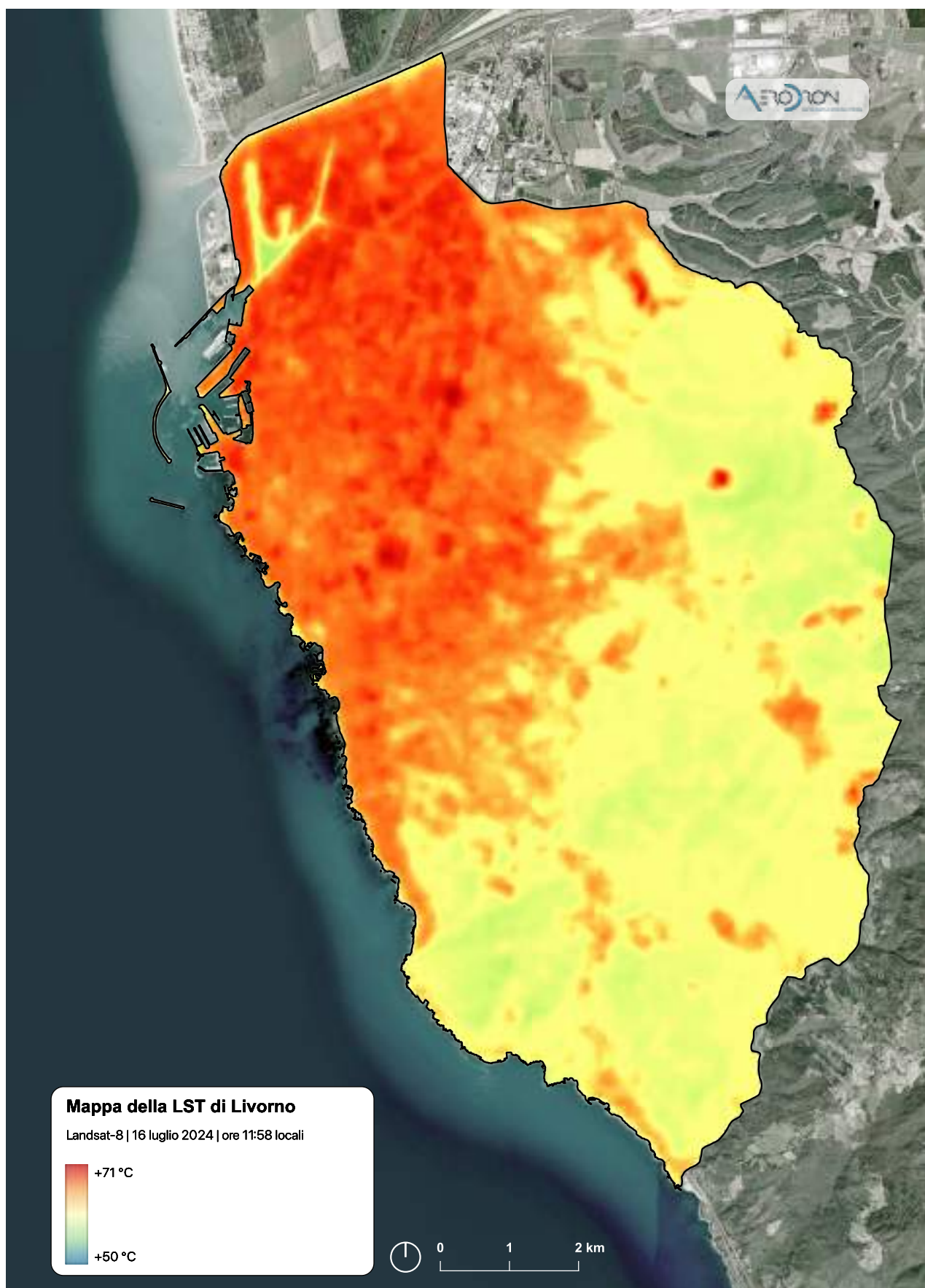
Sono state, dapprima, scelte tre giornate estive i cui dati reperibili fossero idonei a tale studio, tenendo in considerazione sia la disponibilità del dato (le immagini satellitari Landsat-8 hanno un tempo di riveduta di circa 16 giorni) che la copertura nuvolosa che andrebbe ad interferire con l'attendibilità del risultato ottenuto.

Dalle tre immagini tematiche seguenti è possibile, dunque, evincere un'evoluzione delle temperature superficiali registrate da Giugno ad Agosto 2024. Quest'ultima è risultata essere quella con le temperature più calde e, di conseguenza, è stata scelta come giornata significativa su cui effettuare anche le analisi successive. Pertanto, in un secondo momento, si è ritenuto opportuno rielaborare il dato della LST, classificandolo con un range di valori più ridotto, appartenenti proprio all'immagine di quel mese: la mappa rappresenta in blu le zone più fresche (min 59 °C) e in rosso le aree più calde (max 71 °C).

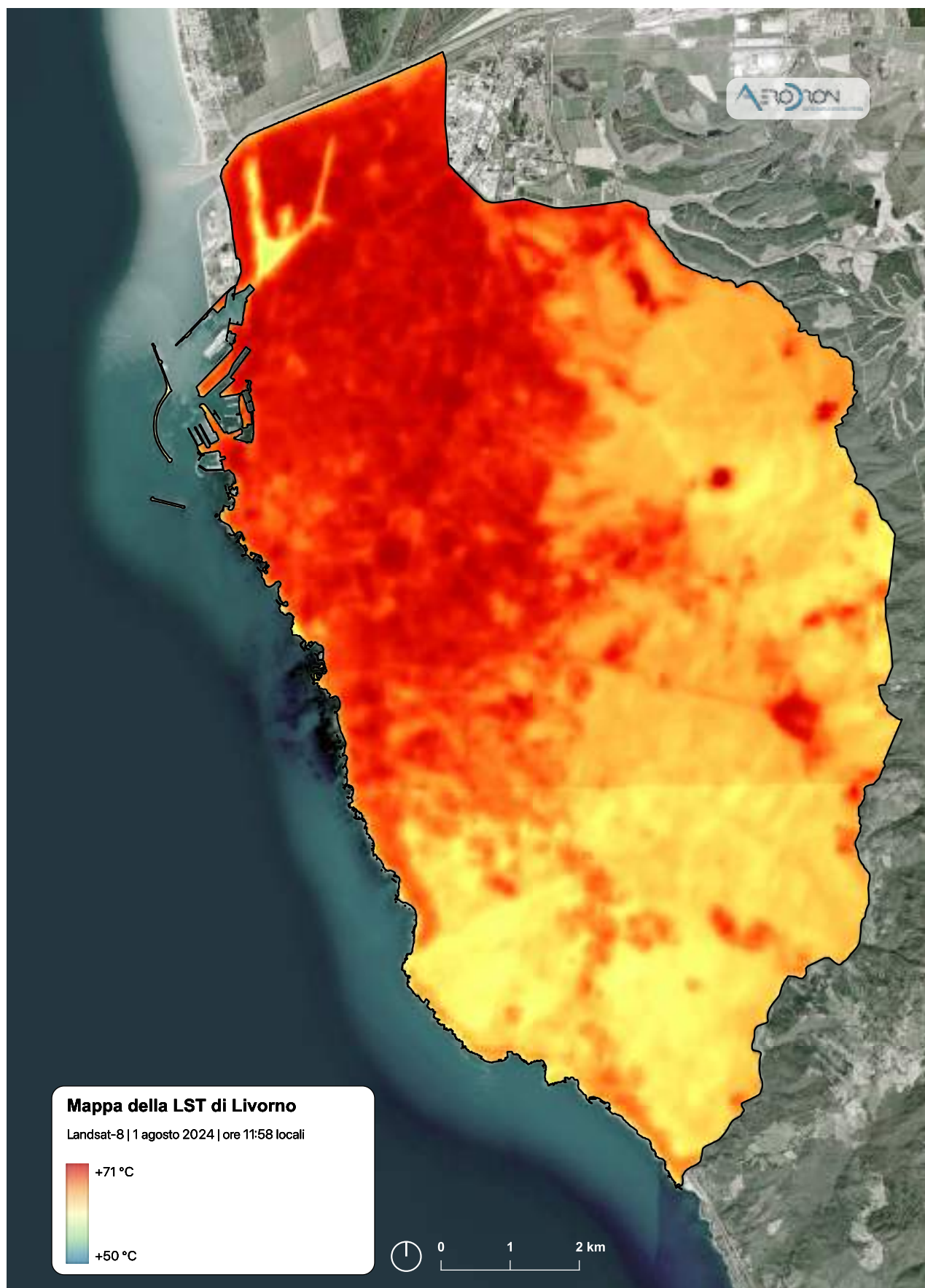


Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 5 giugno 2024

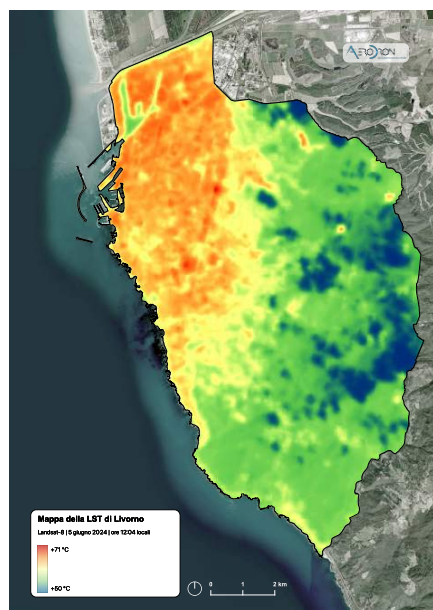
Si specifica che in questa mappa del 5 giugno 2024 la maggior parte delle aree blu in zona non urbanizzata corrisponde a copertura nuvolosa.



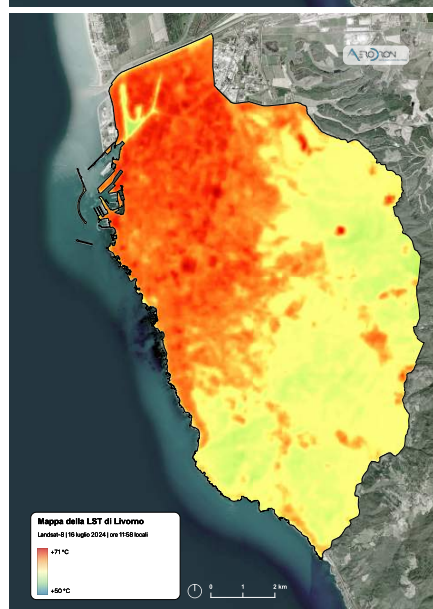
Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 16 luglio 2024



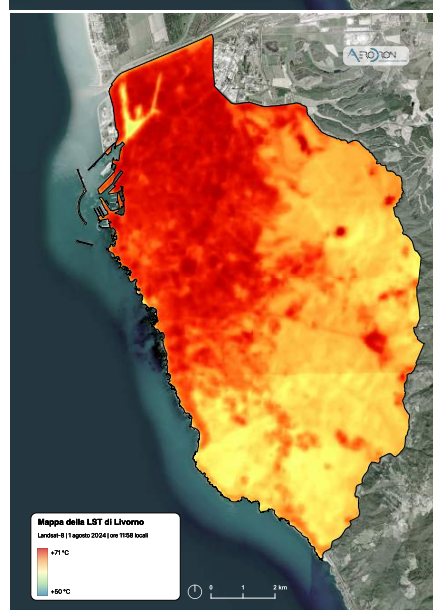
Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024



5 giugno 2024
ore 12:04 locali

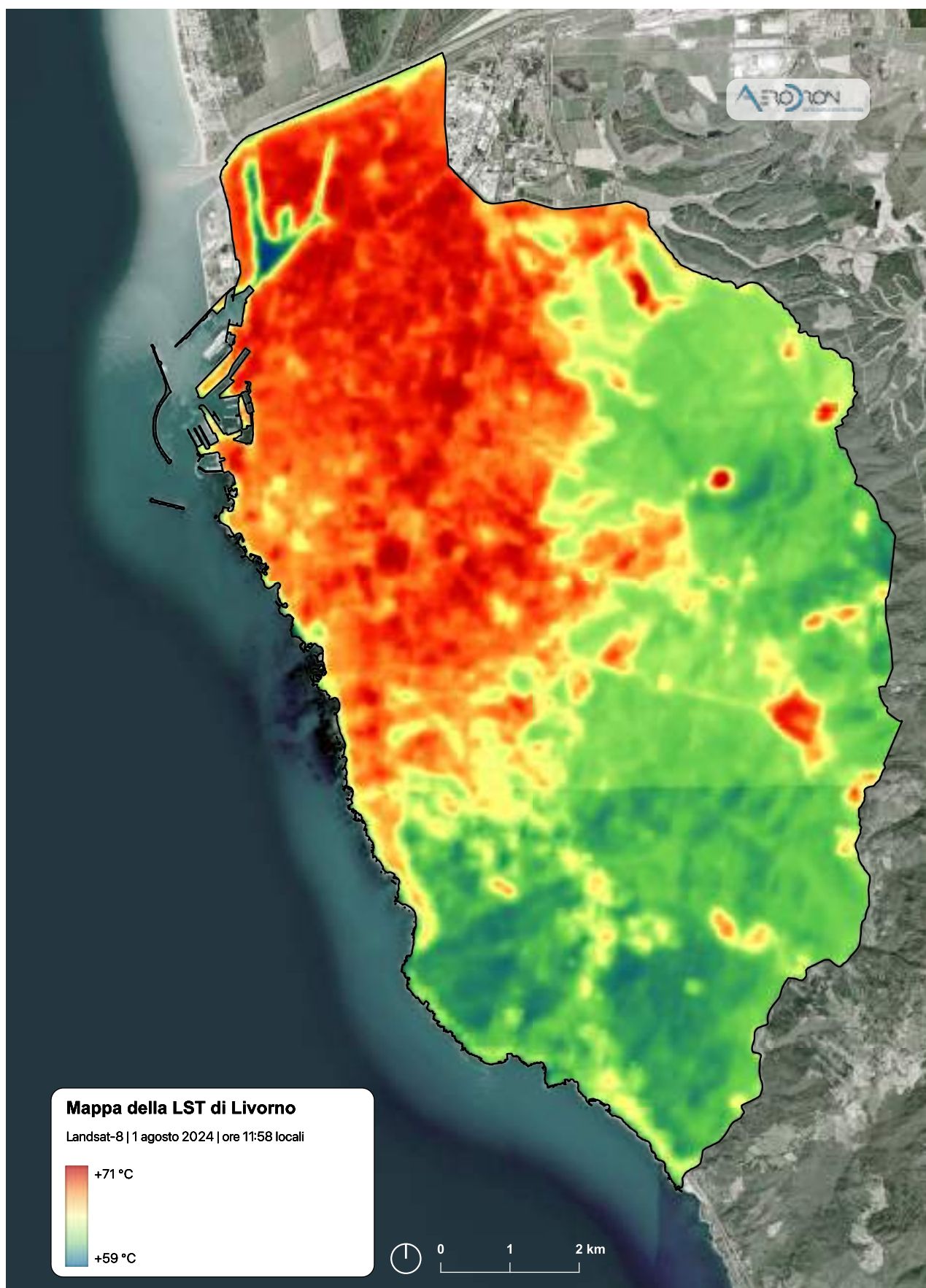


16 luglio 2024
ore 11:58 locali



1° agosto 2024
ore 11:58 locali

Confronto mappe di temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | giugno-agosto 2024



Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

1.2 La mappa della permeabilità delle superfici da satellite

Le funzioni e i benefici per l'essere umano delle cosiddette "Infrastrutture verdi" sono numerosi e ormai noti: riducono l'inquinamento acustico e dell'aria, contribuiscono alla gestione dell'acqua (cfr. il *runoff*), mitigano l'impatto dell'isola di calore, favoriscono l'integrazione sociale e concorrono alla formazione del patrimonio paesaggistico anche urbano.

Poter esaminare la presenza di aree verdi e permeabili in un contesto urbano costituisce, dunque, un indicatore cruciale per valutare la resilienza della città alle sfide legate al cambiamento climatico.

L'indice di vegetazione della differenza normalizzata (**NDVI** - *Normalized Difference Vegetation Index*) è il principale indicatore della presenza di vegetazione sulla superficie terrestre e del suo evolversi nel tempo. Valuta, infatti, la presenza di attività fotosintetica, poiché mette in relazione lo **spettro del rosso**, in cui c'è assorbimento da parte della clorofilla, e quello del **vicino infrarosso** in cui le foglie riflettono la luce per evitare il surriscaldamento.

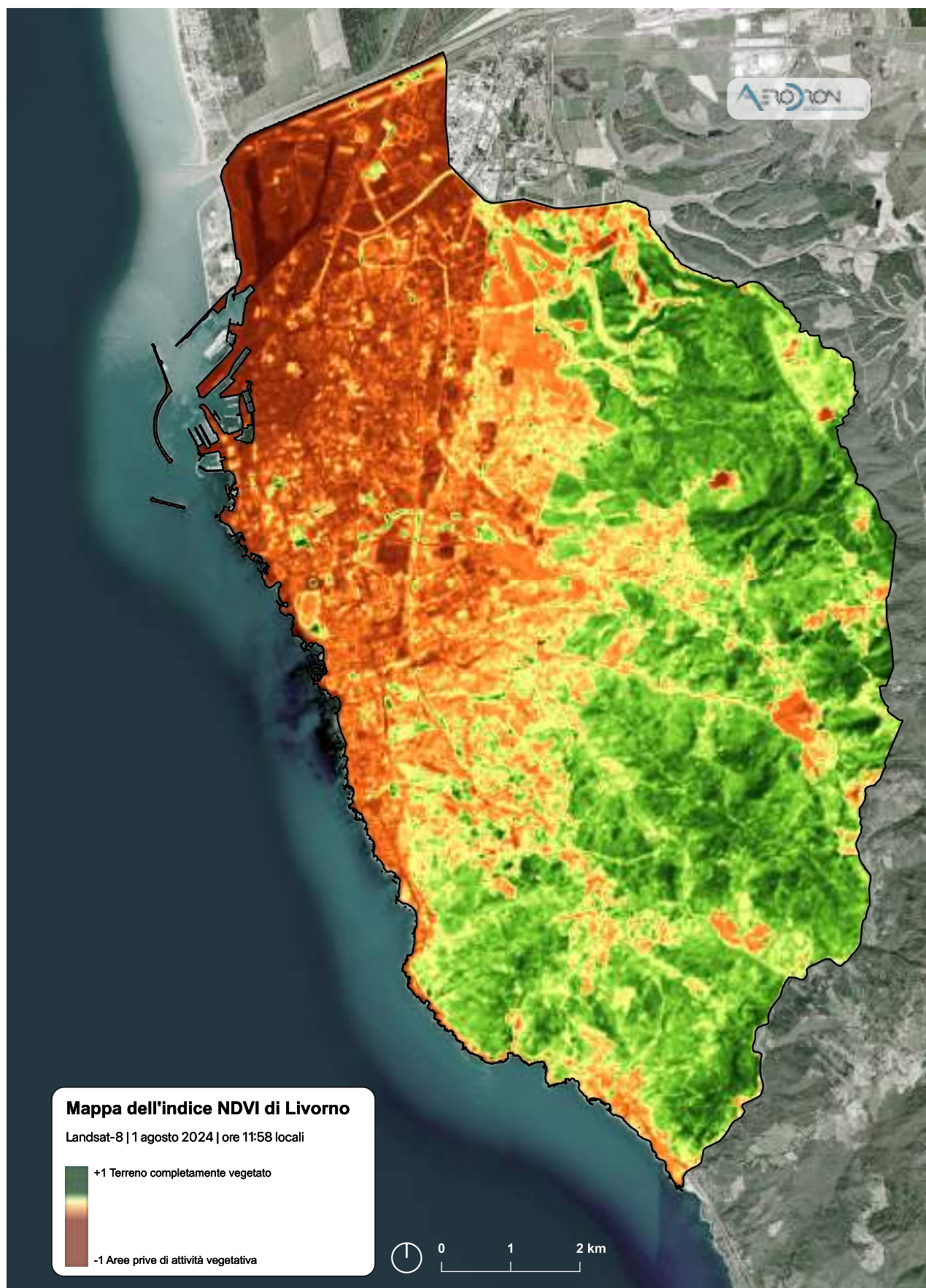
I valori dell'indice sono tipicamente compresi tra -1 e +1. La presenza di vegetazione assume valori maggiori di 0,2.²

Come precedentemente scritto, sono stati elaborati i dati satellitari del 1° agosto 2024 per ottenere una mappa in cui ogni pixel contenesse il valore dell'indice NDVI in quel punto. Nella seguente mappa a falsi colori vengono così identificati in marrone i valori più prossimi a -1 (aree prive di attività vegetativa) e in verde i valori più prossimi a 1 (terreno completamente vegetato).

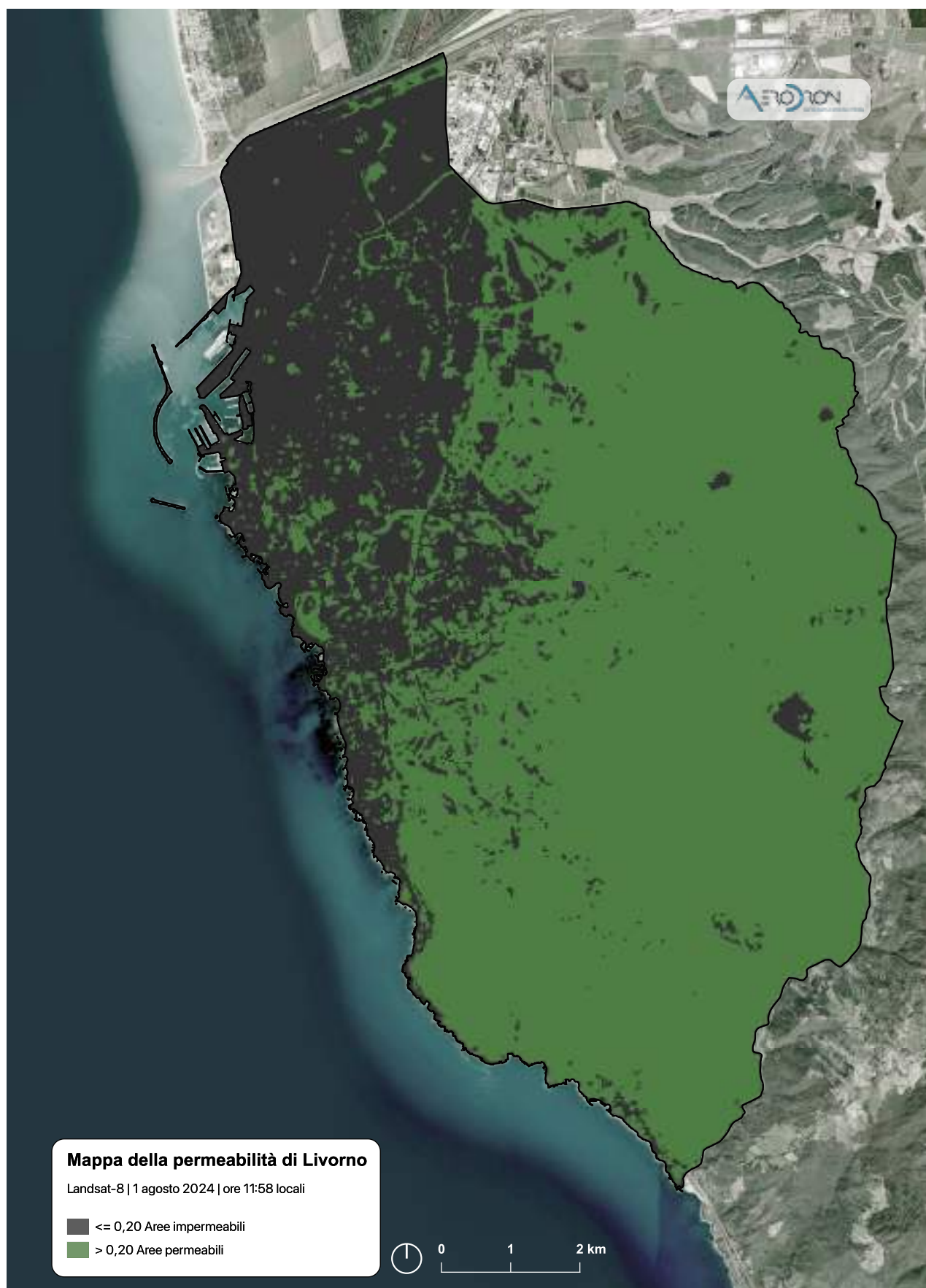
Successivamente, dalla mappa NDVI è stato possibile creare la mappa della **permeabilità**, isolando solamente quelle aree considerate permeabili, cioè con valori > 0,2.

Nella seconda immagine riportata di seguito si può, quindi, notare la suddivisione del territorio in aree permeabili (verde) e impermeabili (nero).

² Rielaborato da Arpae <https://www.arpae.it/temi-ambientali/siccita/scopri-di-piu/scopri-indicatori-siccita/indicatori-ndvi>



Mappa indice NDVI da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024



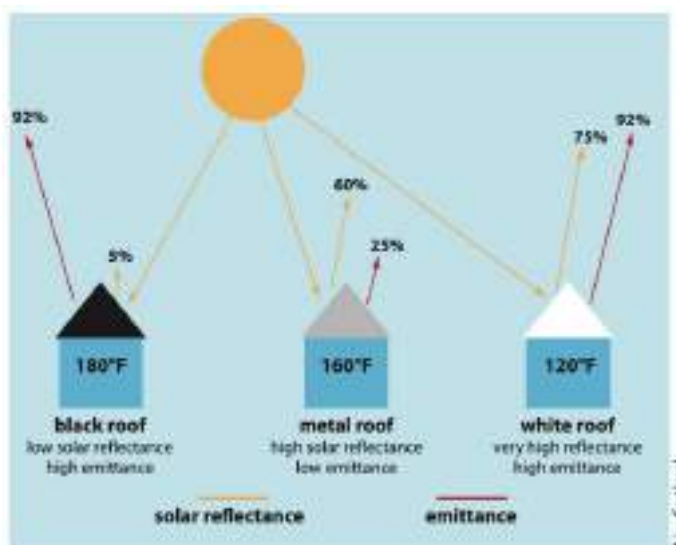
Mappa della permeabilità da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

1.3 La mappa di albedo da satellite

L'albedo è un coefficiente di riflessione della radiazione solare, con valori da 0 a 1. Nelle ore della giornata caratterizzate dalla presenza di radiazione solare, l'albedo è senz'altro la caratteristica che più influenza il comportamento termico del materiale. L'albedo, che è legato al **colore** e alla **rugosità** di un elemento, determina la quantità di radiazione solare incidente che ritorna all'ambiente una volta che viene intercettato dal materiale e di conseguenza la quantità che viene assorbita (e successivamente rimessa sotto forma di radiazione termica, cioè **calore**).

Un elemento chiaro e liscio come il marmo bianco, garantisce una riflessione quasi totale della radiazione solare che lo raggiunge, e dunque fa sì che il materiale rimanga relativamente fresco, o comunque quasi a regime con la temperatura dell'aria, perché la quantità di radiazione solare assorbita che si trasforma in calore è modesta. Un materiale

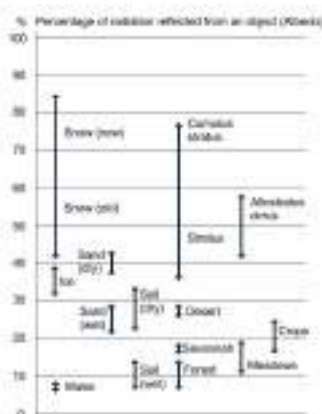
nero come l'asfalto, invece, definisce un comportamento opposto: il calore viene assorbito generando un alto aumento delle temperature.³



L'albedo delle superfici è dunque un parametro chiave nel bilancio energetico superficiale, e così gioca un ruolo importante nelle interazioni territorio-clima. Come proprietà biofisica chiave degli ecosistemi terrestri, l'albedo di superficie può cambiare durante le stagioni, a causa dei cambiamenti nella morfologia della vegetazione, e può anche essere influenzata dalle condizioni del cielo.

Nelle nostre città, l'albedo medio delle varie superfici che le compongono, assume valori all'intorno di 0,2.

Tipo di superficie	q
Nieve (caduta di fresco o con film di ghiaccio)	0,75
Superficie acquosa	0,07
Suolo (pietra, marmo)	0,14
Strade staminate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno/campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superficie scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure...)	0,27
Superficie chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare...)	0,60



Surface	Albedo
Corrugated roof	0.1 - 0.15
Colored paint	0.15 - 0.35
Trees	0.15 - 0.18
Asphalt	0.05 - 0.2
Concrete	0.25 - 0.7
Grass	0.25 - 0.3
Ice	0.3 - 0.5

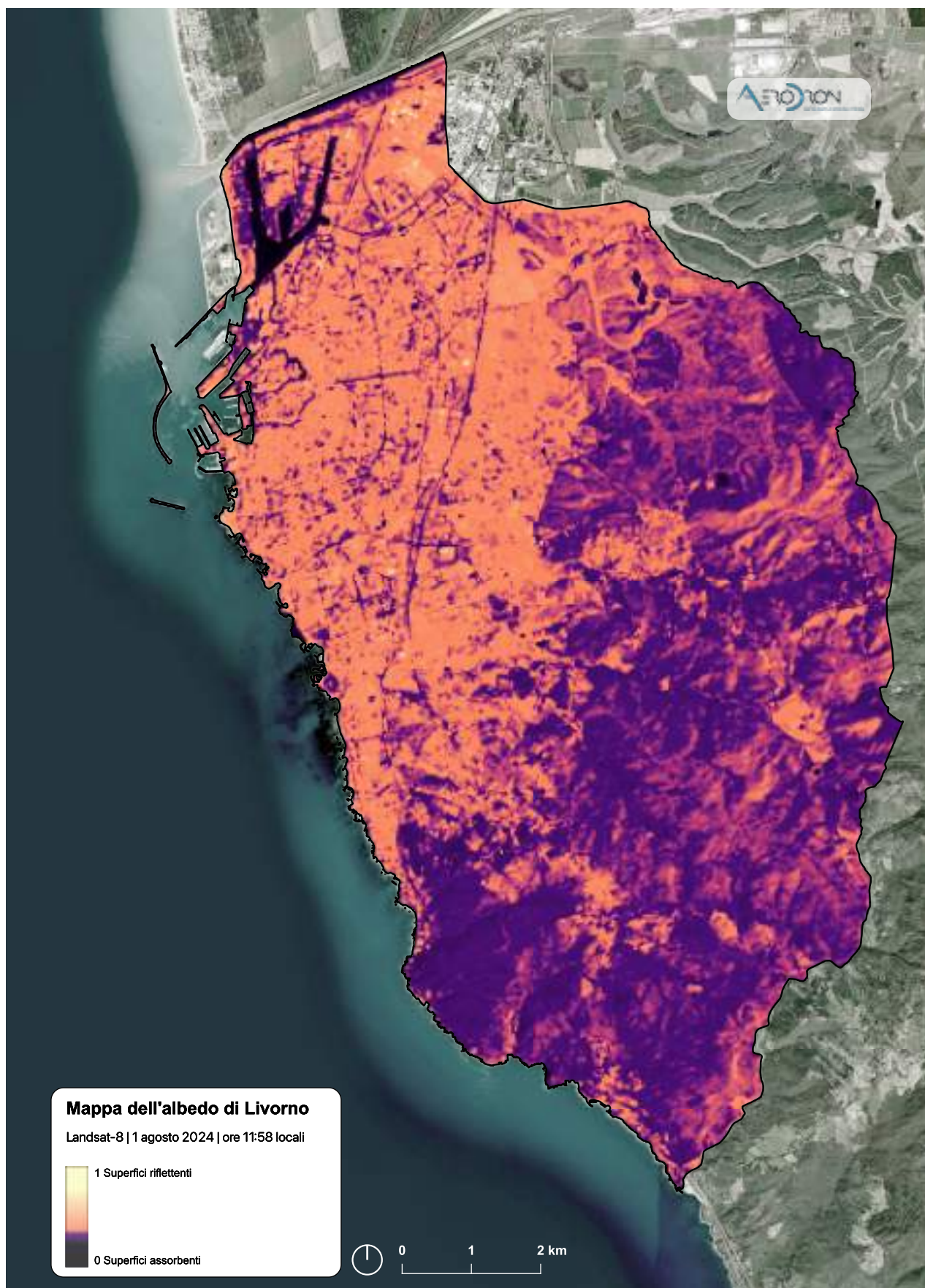
³ Tratto da *Rigenerare la città con la natura. Strumenti per la progettazione degli spazi pubblici tra mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici*. Regione Emilia-Romagna, Politecnico di Milano (2018).



Alcune tabelle di valori tipici dell'albedo in contesto urbano

Agli estremi ($< 0,1$) troviamo l'acqua del mare che assorbe quasi completamente la radiazione solare e viceversa la neve, che la riflette in maggior misura ($> 0,3$).

Dalla combinazione di più bande dello spettro elettromagnetico intercettate dal satellite, mediante algoritmo specifico, si è potuta ottenere la mappa di albedo del comune di Livorno per il 1° agosto 2024. La carta tematica, riportata qui di seguito, rappresenta il valore di albedo su una scala cromatica dal nero al giallo chiaro: le superfici più assorbenti la radiazione solare sono quelle marine con valori più prossimi allo zero (colore nero), più, invece, le superfici diventano chiare e riflettenti con valori superiori allo zero, più si schiarisce anche il colore in mappa.



Mappa di albedo da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

FASE 2

RILIEVI AEREI CON UAS SU AREE CRITICHE

Di futura realizzazione

Materiale di consegna | FASE 1

Al termine della FASE 1 ed entro la data concordata con l'Amministrazione Comunale, sono stati consegnati i seguenti materiali preliminari finali:

CONSEGNA FASE 1		
Cartella	Sottocartella	Documento
Materiali consegna_FASE 1	<u>Dati raster</u>	LST del Comune di Livorno del 2024-06-05
		LST del Comune di Livorno del 2024-07-16
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01
		NDVI del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Albedo del Comune di Livorno del 2024-08-01
	<u>Mappe in pdf</u>	LST del Comune di Livorno del 2024-06-05_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-07-16_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01_range59-71
		NDVI del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Permeabilità del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Albedo del Comune di Livorno del 2024-08-01
	<u>Report</u>	Report preliminare FASE 1

Materiale di consegna | FASE 2

Di futura realizzazione

Piattaforma Web-GIS

È stata predisposta una piattaforma Web-GIS dalla quale poter consultare online i risultati del presente progetto.

Le credenziali di accesso riservato saranno fornite al termine della FASE 2.

Conclusioni

La FASE 1 di questo progetto ha permesso di ottenere una ricognizione generale per l'intero territorio comunale della città di Livorno in merito ad alcune specifiche caratteristiche morfologiche e climatiche finalizzate allo studio di potenziali isole di calore urbane.

In relazione all'analisi climatica proposta, si è raccolto ed elaborato un set informatizzato di dati raster satellitari geospaziali utili alla pianificazione per una corretta localizzazione dell'informazione e una conoscenza generalizzata dei fenomeni che incidono sulla città. In particolare, si è dimostrato il manifestarsi di temperature più elevate nei contesti urbanizzati mediante lo studio della LST e il confronto con la carta della permeabilità.

Alla FASE 2 l'obiettivo di identificare aree critiche, e strategiche allo stesso tempo, sulle quali poter effettuare approfondimenti per un'urbanistica di precisione mediante UAS.

...le città a prova di clima sono anche città per le persone perché la maggior parte delle misure, sicuramente quelle più efficaci sia per l'adattamento che per la mitigazione, sono misure basate sulla reintroduzione della natura nelle aree urbane, che rendono le città più sane, belle, confortevoli, accessibili, vivibili, vitali ed attrattive.

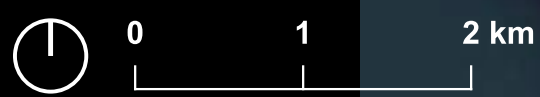
Jan Gehl - architetto danese



Mappa della LST di Livorno
Landsat-8 | 5 giugno 2024 | ore 12:04 locali

+71 °C

+50 °C



Mappa della LST di Livorno
Landsat-8 | 16 luglio 2024 | ore 11:58 locali

+71 °C

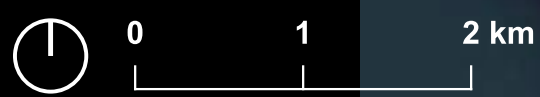
+50 °C



Mappa della LST di Livorno
Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali

+71 °C

+59 °C



Mappa della LST di Livorno
Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali

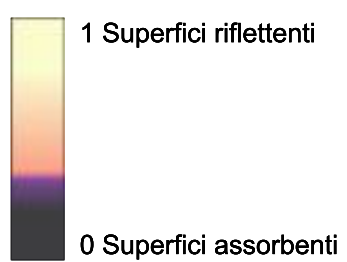
+71 °C

+50 °C



Mappa dell'albedo di Livorno

Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali



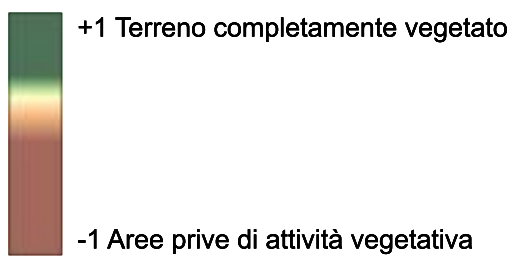
0

1

2 km

Mappa dell'indice NDVI di Livorno

Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali



0

1

2 km

Mappa della permeabilità di Livorno

Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali

-  $\leq 0,20$ Aree impermeabili
-  $> 0,20$ Aree permeabili



0

1

2 km



Comune di Livorno

**DATA-SET INFORMATIZZATO DI DATI
RASTER E VETTORIALI GEOSPAZIALI
RILEVATI MEDIANTE PIATTAFORME SATELLITARI E UAS (DRONI)
PER LO STUDIO DELLE ISOLE DI CALORE E LA PIANIFICAZIONE
DI MISURE PER L'ADATTAMENTO E IL CONTRASTO
AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Report finale - Novembre 2025

Sommario

Sommario	2
Introduzione	3
Sintesi del lavoro svolto	3
FASE 1 RILIEVI SATELLITARI SULL'INTERO TERRITORIO COMUNALE	7
1.1 Le mappe delle temperature superficiali da satellite	7
1.2 La mappa della permeabilità delle superfici da satellite	13
1.3 La mappa di albedo da satellite	16
FASE 2 RILIEVI AEREI CON UAS SU AREE CRITICHE	19
2.1 Rilievo aereo da UAS multirottore per la produzione di ortofoto ad elevata risoluzione spaziale	21
2.2 Rilievo aereo da UAS multirottore per la mappatura della permeabilità delle superfici e dell'albedo	22
2.3 Rilievo aereo da UAS multirottore per la mappatura delle temperature superficiali	23
2.4 Rilievo aereo da UAS multirottore con sensore per l'acquisizione di dati 3D sulla qualità e temperatura dell'aria, umidità relativa e principali inquinanti	24
Materiale di consegna FASE 1	30
Materiale di consegna FASE 2	30
Piattaforma Web-GIS	31
Conclusioni	31

Introduzione

In un contesto urbano ormai caratterizzato da sfide ambientali e climatiche rilevanti per la cittadinanza, pubblica amministrazione con tecnici e professionisti giocano un ruolo importante nella pianificazione e progettazione di analisi e soluzioni finalizzate a contrastare gli effetti del cambiamento climatico.

Una delle principali criticità climatiche per cui le amministrazioni sono portate a sperimentare ipotesi di adattamento porta il nome di **Isola di calore**: fenomeno che prende in considerazione la differenza di temperatura in diverse parti della città e che si intensifica, causando disagi a persone e cose, nei periodi estivi in presenza di forti ondate di calore.

L'assetto morfologico della città, i tipi di attività presenti, i materiali che caratterizzano l'edificato e lo spazio aperto sono solo alcuni aspetti che influenzano notevolmente l'isola di calore.

L'amplificazione di tale fenomeno ha conseguenze negative sulla salute umana, sulla qualità dell'aria e sulla domanda di energia.

Saper dunque proporre misure ed azioni politiche di adattamento della città sperimentando, per esempio, soluzioni basate sulla natura significa influire e modificare il microclima urbano riportando in ambito urbano condizioni di benessere grazie alla presenza di nuove aree verdi e permeabili che riducono le temperature estreme e migliorano la qualità dell'aria.

Affrontare il problema delle isole di calore è un'occasione per migliorare la vivibilità e fruibilità delle nostre città.¹

Sintesi del lavoro svolto

Nell'ambito dello studio delle "Isole di calore" e dello sviluppo e pianificazione di misure atte a contrastare e mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici, nel territorio comunale di Livorno, AeroDron ha raccolto ed elaborato un dataset informatizzato di dati raster e vettoriali geospaziali rilevati mediante piattaforme satellitari e Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (*Unmanned Aircraft System* - UAS), comunemente chiamati droni.

Le operazioni realizzate per ottenere quanto sopradescritto entro il confine comunale della città, ovvero mappature relative ai fenomeni dell'albedo, della permeabilità delle superfici, delle temperature superficiali e della qualità dell'aria, sono state strutturate in due fasi principali:

- FASE 1 – Rilievi satellitari sull'intero territorio comunale
- FASE 2 – Rilievi aerei con UAS su aree critiche

¹ *Città e climate change. La vulnerabilità delle aree urbane alle isole di calore*, Gaglione F. (2022)



*Perimetrazione del territorio comunale di Livorno
con identificazione aree critiche*

Per quanto concerne lo sviluppo delle mappature di ricognizione generale dei fenomeni sull'intero territorio comunale, AeroDron si è servita di piattaforme satellitari NASA e, nello specifico, ha elaborato dati registrati dal satellite Landsat-8 per ottenere:

- Mappe delle temperature superficiali
- Mappa della permeabilità delle superfici
- Mappa di albedo

Successivamente, per ogni area identificata si sono effettuati dei voli specifici servendosi di UAS con a bordo sensori specializzati per il rilevamento di informazioni multispettrali (bande del visibile e del vicino infrarosso), termiche e sulla qualità dell'aria.

I voli sono stati eseguiti con UAS **multirotores** (il piano di volo viene eseguito direttamente dal pilota sul posto) a un'altitudine operativa inferiore a 100 m AGL.

I fotogrammi sono stati eseguiti come serie di strisciate a quota costante. Le singole strisciate seguono la pendenza del terreno sottostante.

I fotogrammi consecutivi di una stessa strisciata hanno un ricoprimento in direzione longitudinale (overlap) maggiore del 70%; invece, il ricoprimento trasversale fra modelli appartenenti a strisciate contigue (sidelap) non è inferiore al 70%.

Con lo scopo di ottenere un esaustivo set di informazioni territoriali geospaziali utile all'Amministrazione Comunale e ad ogni altro ente preposto in merito allo studio del fenomeno "Isola di calore", AeroDron ha potuto, per ciascuna area designata, ottenere ed elaborare dati ascrivibili alle seguenti tematiche:

- Ortofoto
- Permeabilità delle superfici
- Albedo
- Temperature superficiali
- Qualità dell'aria

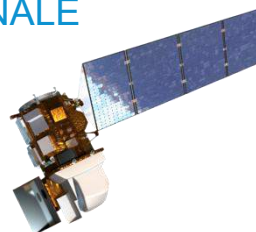
Nei prossimi capitoli verranno descritte le informazioni tecniche e i principali output ottenuti per ogni fase; la tabella, qui riportata, fa infine sintesi delle relazioni tra i sensori installati e i dati acquisiti.

ANALISI CLIMATICA			
STRUMENTO	SENSORE		DATI ACQUISITI
 Landsat-8		OLI e TIRS	Temperatura superficiale
			Indice NDVI / Permeabilità
			Albedo
 Multirotore		Multispettrale	Ortofoto
			Indice NDVI / Permeabilità
			Albedo
 Multirotore		Termico	Temperatura superficiale
 Multirotore		Qualità dell'aria	Temperatura dell'aria
			Umidità relativa
			Inquinanti (NO ₂ /SO ₂ /CO/PM _{1-2.5-10})

FASE 1

RILIEVI SATELLITARI SULL'INTERO TERRITORIO COMUNALE

La ricognizione conoscitiva dell'intero territorio comunale di Livorno, in merito ai temi di temperatura superficiale, permeabilità e albedo, è stata condotta mediante l'utilizzo di dati satellitari NASA, con copertura nuvolosa inferiore al 20%, registrati dalla piattaforma Landsat-8 (risoluzione 30 m x 30 m) nei seguenti giorni estivi:



- 5 giugno 2024 | ore 12:04 locali
- 16 luglio 2024 | ore 11:58 locali
- 1° agosto 2024 | ore 11:58 locali

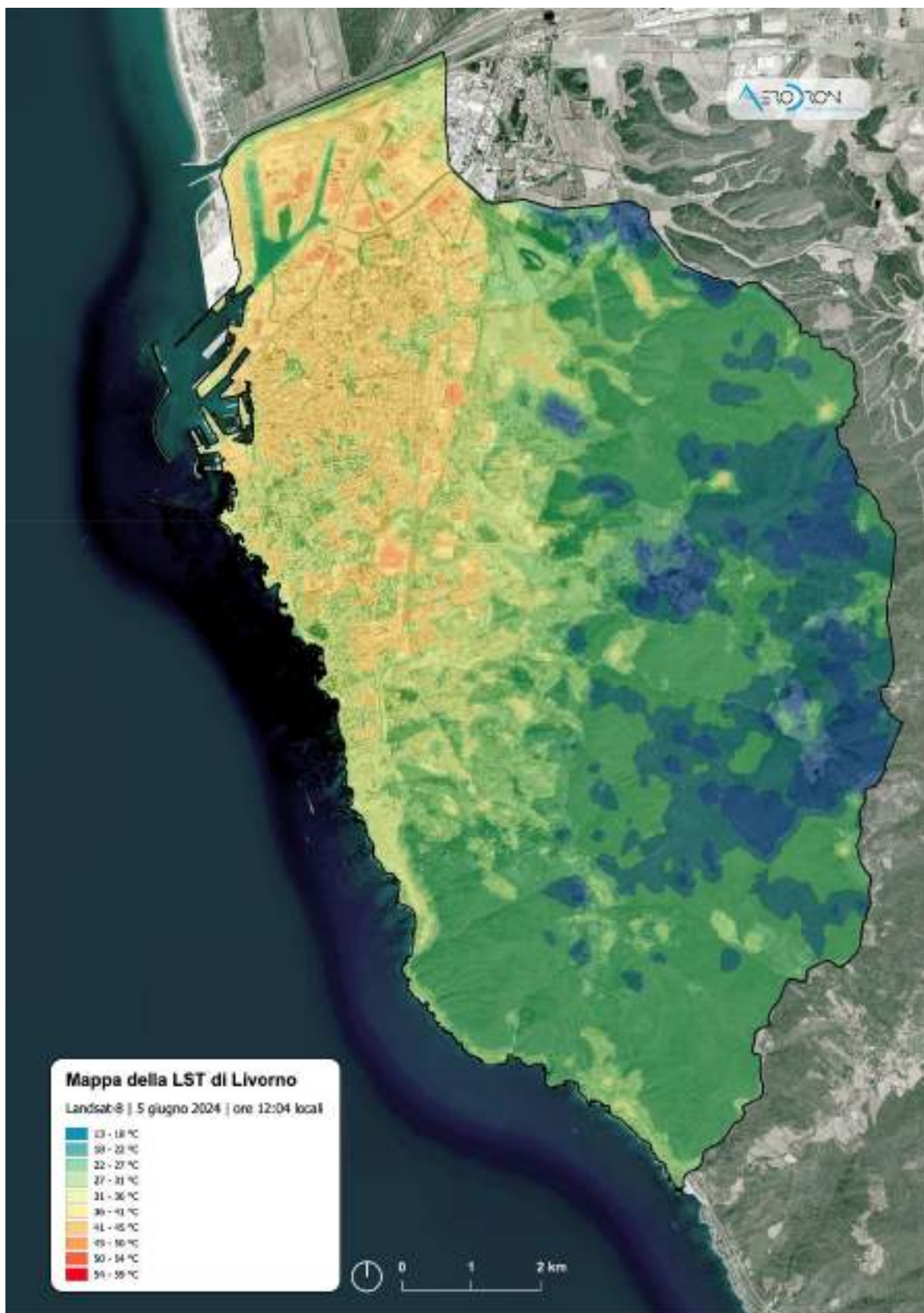
1.1 Le mappe delle temperature superficiali da satellite

Parametro principale per studiare il fenomeno isola di calore è la **temperatura superficiale**: come il nostro tessuto urbano risponde all'irraggiamento solare? Se il caldo in estate diventa quasi insopportabile durante un'ondata di calore, anche la composizione morfologica e i materiali usati in ambiente urbano ne sono una causa.

È stata, quindi, condotta una prima indagine preliminare per analizzare il fattore **LST** (*Land Surface Temperature*) entro i confini comunali della città di Livorno.

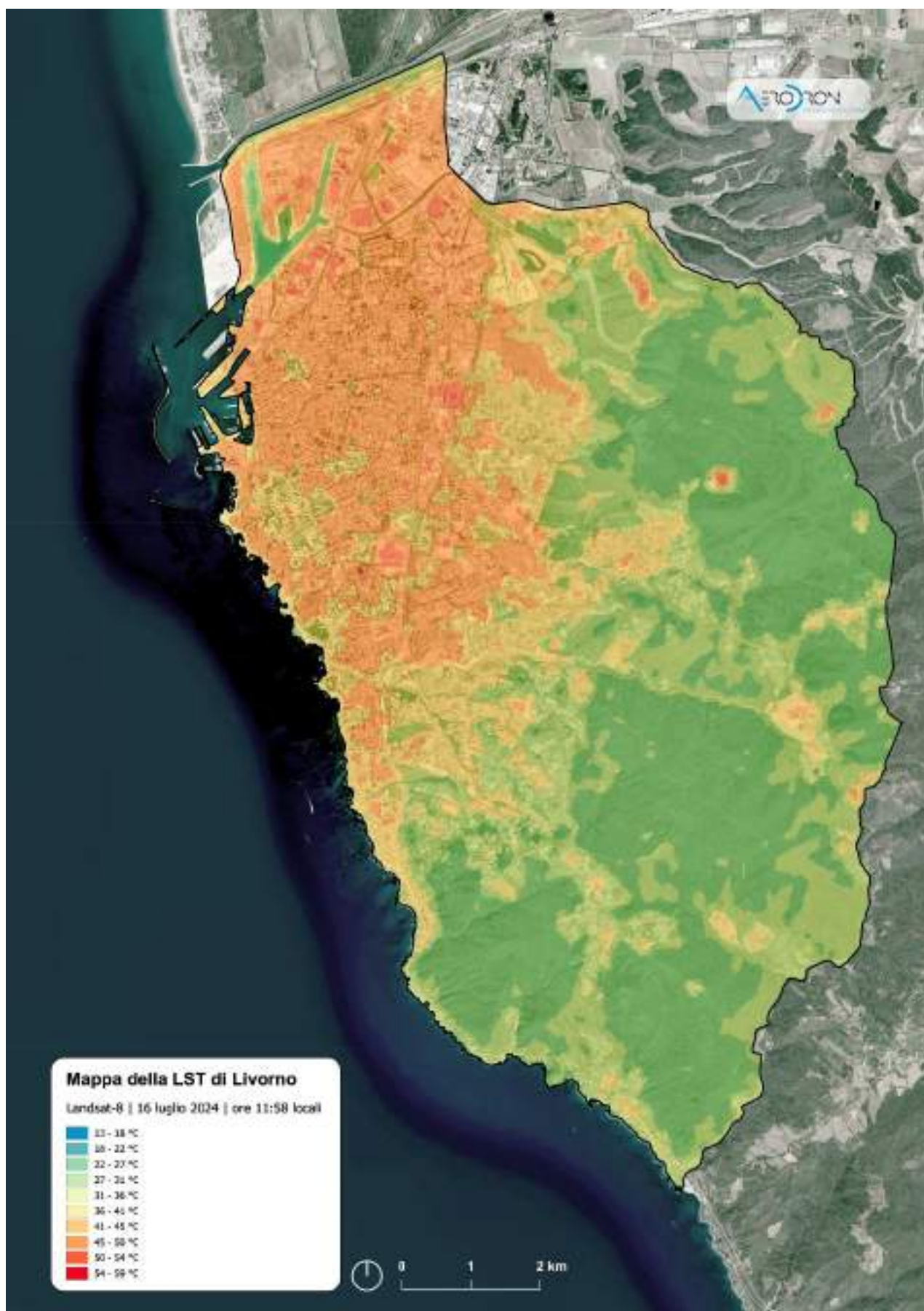
Sono state, dapprima, scelte tre giornate estive i cui dati reperibili fossero idonei a tale studio, tenendo in considerazione sia la disponibilità del dato (le immagini satellitari Landsat-8 hanno un tempo di rivedita di circa 16 giorni) che la copertura nuvolosa che andrebbe ad interferire con l'attendibilità del risultato ottenuto.

Dalle tre immagini tematiche seguenti è possibile, dunque, evincere un'evoluzione delle temperature superficiali registrate da Giugno ad Agosto 2024. Quest'ultima è risultata essere quella con le temperature più calde e, di conseguenza, è stata scelta come giornata significativa su cui effettuare anche le analisi successive. Pertanto, in un secondo momento, si è ritenuto opportuno rielaborare il dato della LST, classificandolo con un range di valori più ridotto, appartenenti proprio all'immagine di quel mese: la mappa rappresenta in blu le zone più fresche (min 29 °C) e in rosso le aree più calde (max 59 °C).

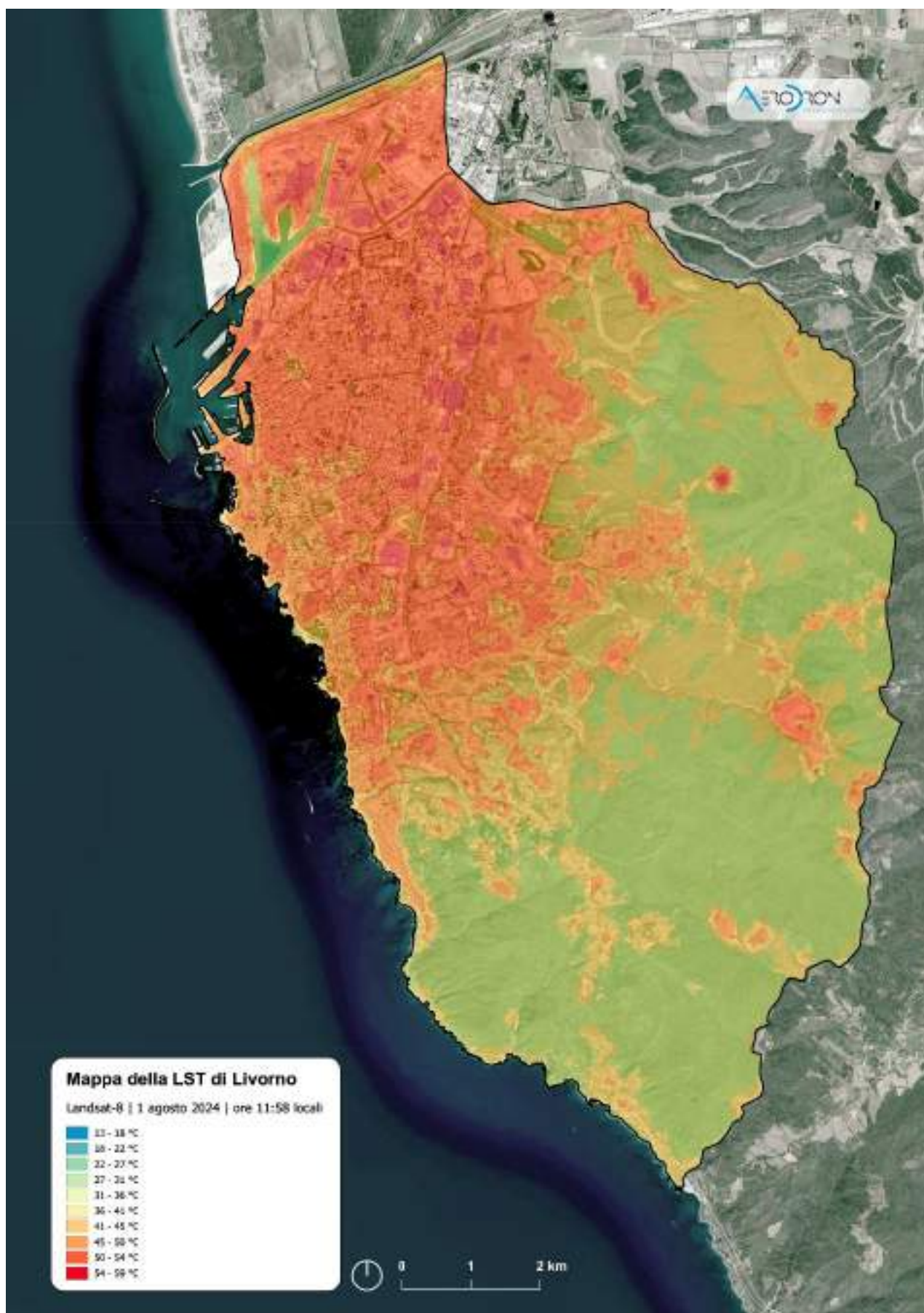


Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 5 giugno 2024

Si specifica che in questa mappa del 5 giugno 2024 la maggior parte delle aree blu in zona non urbanizzata corrisponde a copertura nuvolosa.



Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 16 luglio 2024



Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024



5 giugno 2024
ore 12:04 locali

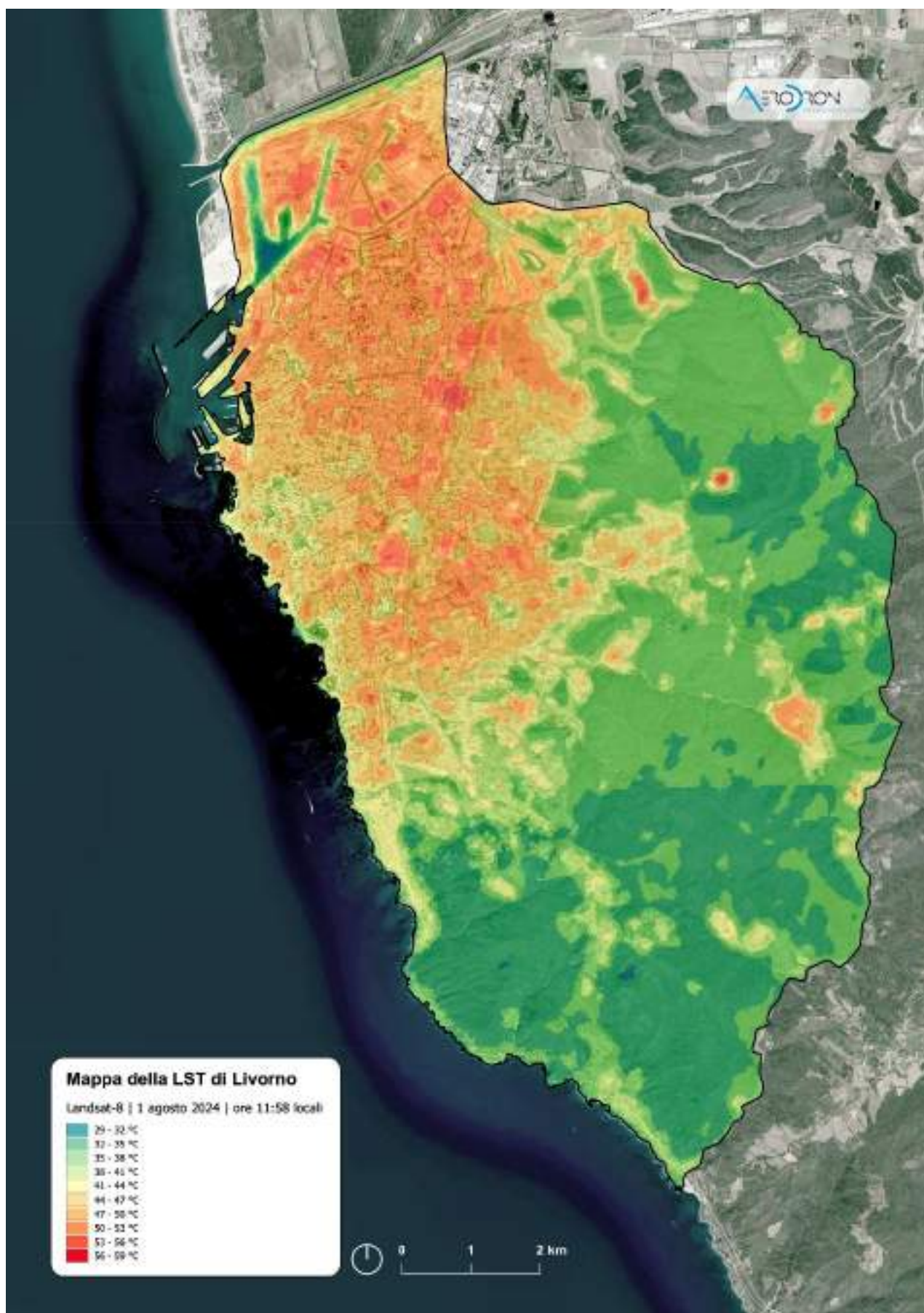


16 luglio 2024
ore 11:58 locali



1° agosto 2024
ore 11:58 locali

Confronto mappe di temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | giugno-agosto 2024



Mappa temperatura superficiale da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

1.2 La mappa della permeabilità delle superfici da satellite

Le funzioni e i benefici per l'essere umano delle cosiddette "Infrastrutture verdi" sono numerosi e ormai noti: riducono l'inquinamento acustico e dell'aria, contribuiscono alla gestione dell'acqua (cfr. il *runoff*), mitigano l'impatto dell'isola di calore, favoriscono l'integrazione sociale e concorrono alla formazione del patrimonio paesaggistico anche urbano.

Poter esaminare la presenza di aree verdi e permeabili in un contesto urbano costituisce, dunque, un indicatore cruciale per valutare la resilienza della città alle sfide legate al cambiamento climatico.

L'indice di vegetazione della differenza normalizzata (**NDVI** - *Normalized Difference Vegetation Index*) è il principale indicatore della presenza di vegetazione sulla superficie terrestre e del suo evolversi nel tempo. Valuta, infatti, la presenza di attività fotosintetica, poiché mette in relazione lo **spettro del rosso**, in cui c'è assorbimento da parte della clorofilla, e quello del **vicino infrarosso** in cui le foglie riflettono la luce per evitare il surriscaldamento.

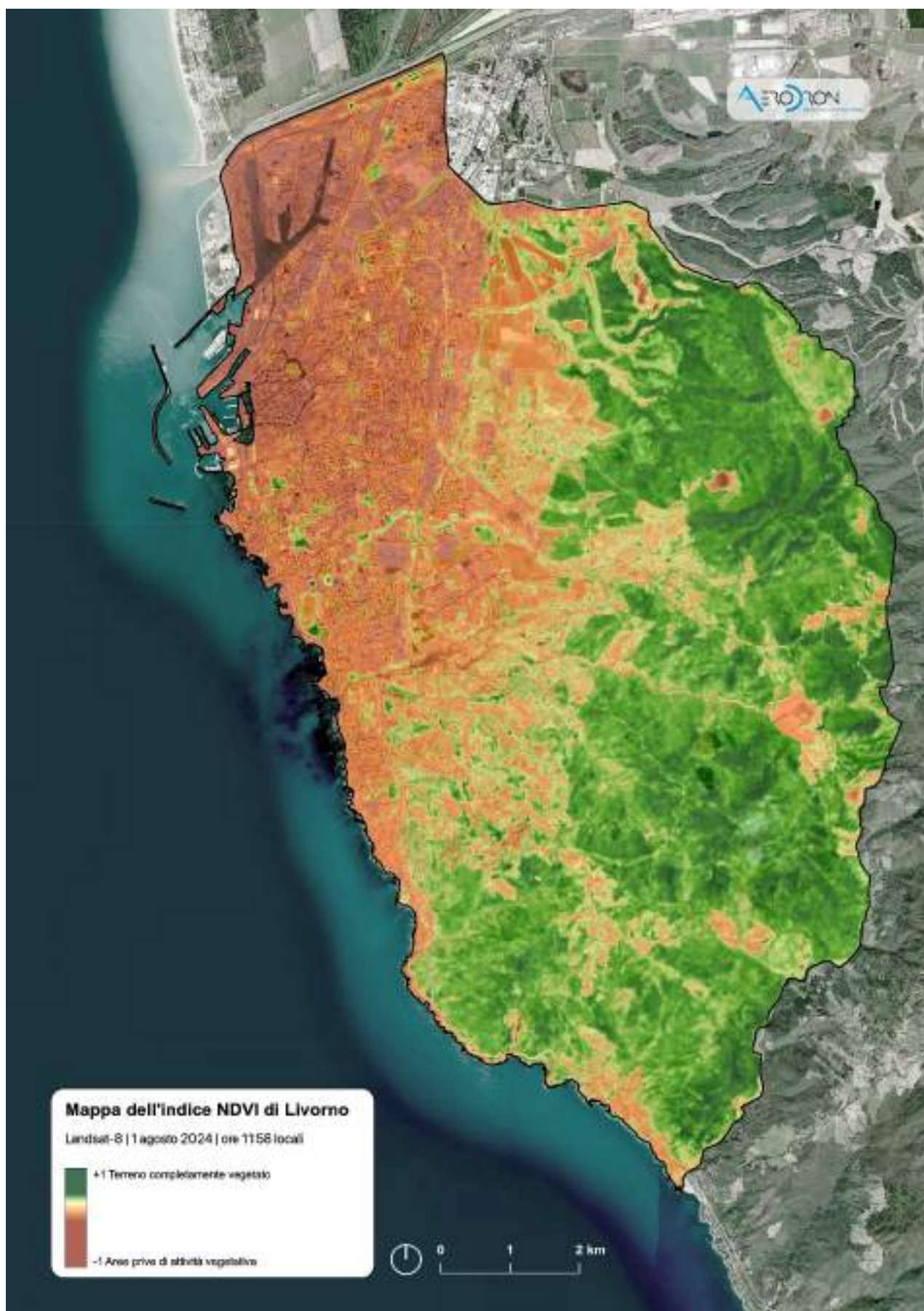
I valori dell'indice sono tipicamente compresi tra -1 e +1. La presenza di vegetazione assume valori maggiori di 0,2.²

Come precedentemente scritto, sono stati elaborati i dati satellitari del 1° agosto 2024 per ottenere una mappa in cui ogni pixel contenesse il valore dell'indice NDVI in quel punto. Nella seguente mappa a falsi colori vengono così identificati in marrone i valori più prossimi a -1 (aree prive di attività vegetativa) e in verde i valori più prossimi a 1 (terreno completamente vegetato).

Successivamente, dalla mappa NDVI è stato possibile creare la mappa della **permeabilità**, isolando solamente quelle aree considerate permeabili, cioè con valori > 0,2.

Nella seconda immagine riportata di seguito si può, quindi, notare la suddivisione del territorio in aree permeabili (verde) e impermeabili (nero).

² Rielaborato da Arpae <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/siccita/scopri-di-piu/scopri-indicatori-siccita/indicatori-ndvi>



Mappa indice NDVI da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024



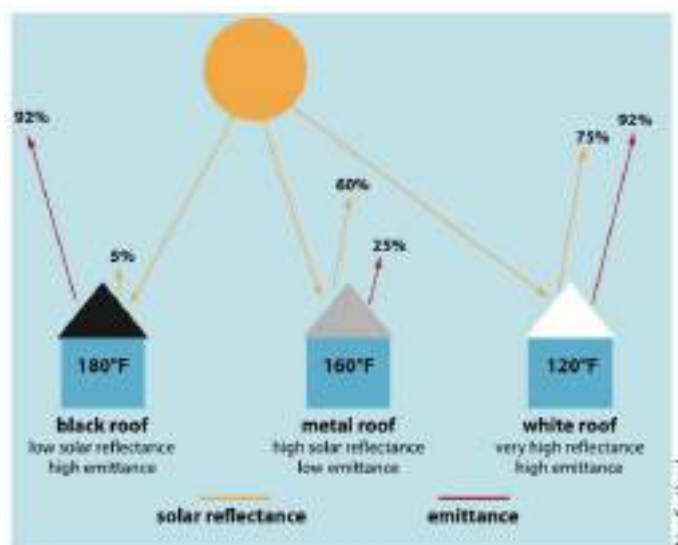
Mappa della permeabilità da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

1.3 La mappa di albedo da satellite

L'albedo è un coefficiente di riflessione della radiazione solare, con valori da 0 a 1. Nelle ore della giornata caratterizzate dalla presenza di radiazione solare, l'albedo è senz'altro la caratteristica che più influenza il comportamento termico del materiale. L'albedo, che è legato al **colore** e alla **rugosità** di un elemento, determina la quantità di radiazione solare incidente che ritorna all'ambiente una volta che viene intercettato dal materiale e di conseguenza la quantità che viene assorbita (e successivamente rimessa sotto forma di radiazione termica, cioè **calore**).

Un elemento chiaro e liscio come il marmo bianco, garantisce una riflessione quasi totale della radiazione solare che lo raggiunge, e dunque fa sì che il materiale rimanga relativamente fresco, o comunque quasi a regime con la temperatura dell'aria, perché la quantità di radiazione solare assorbita che si trasforma in calore è modesta. Un materiale

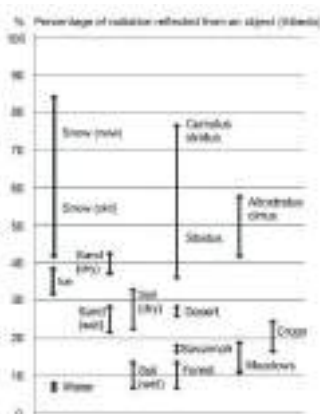
nero come l'asfalto, invece, definisce un comportamento opposto: il calore viene assorbito generando un alto aumento delle temperature.³



L'albedo delle superfici è dunque un parametro chiave nel bilancio energetico superficiale, e così gioca un ruolo importante nelle interazioni territorio-clima. Come proprietà biofisica chiave degli ecosistemi terrestri, l'albedo di superficie può cambiare durante le stagioni, a causa dei cambiamenti nella morfologia della vegetazione, e può anche essere influenzata dalle condizioni del cielo.

Nelle nostre città, l'albedo medio delle varie superfici che le compongono, assume valori all'intorno di 0,2.

Tipo di superficie	α
Nieve (caduta di fresco o con film di ghiaccio)	0,75
Superficie acquose	0,07
Suolo (pietra, marmo)	0,14
Strade staminate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno/campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superficie scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure...)	0,27
Superficie chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare...)	0,60



Surface	Albedo
Corrugated roof	0.1 - 0.15
Colored paint	0.15 - 0.35
Trees	0.15 - 0.18
Asphalt	0.05 - 0.2
Concrete	0.25 - 0.7
Grass	0.25 - 0.3
Ice	0.3 - 0.5

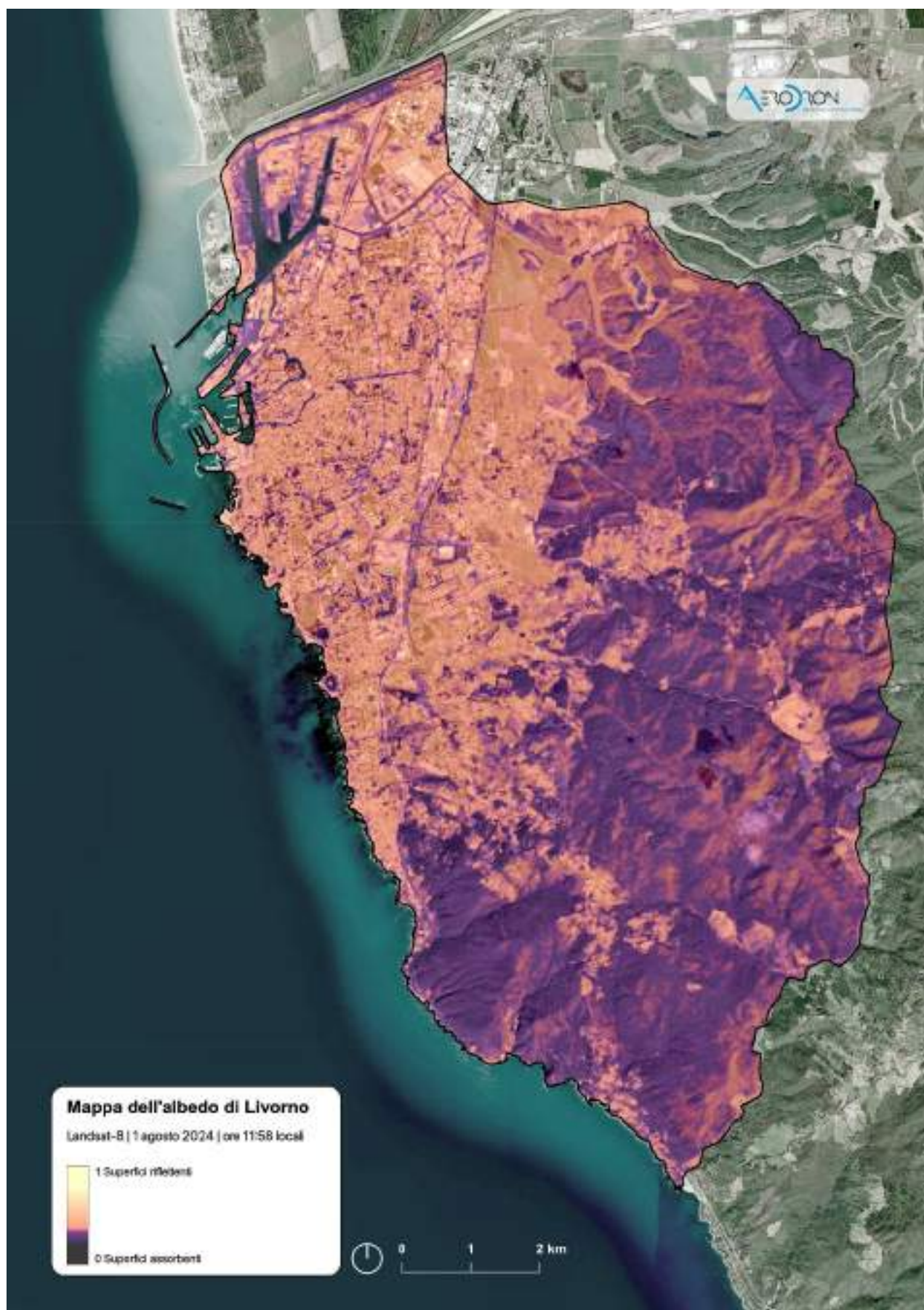
³ Tratto da *Rigenerare la città con la natura. Strumenti per la progettazione degli spazi pubblici tra mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici*. Regione Emilia-Romagna, Politecnico di Milano (2018).



Alcune tabelle di valori tipici dell'albedo in contesto urbano

Agli estremi ($< 0,1$) troviamo l'acqua del mare che assorbe quasi completamente la radiazione solare e viceversa la neve, che la riflette in maggior misura ($> 0,3$).

Dalla combinazione di più bande dello spettro elettromagnetico intercettate dal satellite, mediante algoritmo specifico, si è potuta ottenere la mappa di albedo del comune di Livorno per il 1° agosto 2024. La carta tematica, riportata qui di seguito, rappresenta il valore di albedo su una scala cromatica dal nero al giallo chiaro: le superfici più assorbenti la radiazione solare sono quelle marine con valori più prossimi allo zero (colore nero), più, invece, le superfici diventano chiare e riflettenti con valori superiori allo zero, più si schiarisce anche il colore in mappa.



Mappa di albedo da satellite Landsat-8 | Comune di Livorno | 1° agosto 2024

FASE 2

RILIEVI AEREI CON UAS SU AREE CRITICHE

All'interno del confine comunale della città si sono scelte **otto aree**, connotate da differenti tessuti e funzioni urbane, sulle quali si sono effettuati i rilievi in oggetto.

Le aree identificate sono definite nell'immagine di seguito e nello specifico:

- A - Picchianti | area urbana artigianale
- B - Sorgenti | area urbana con tipologie edilizie residenziali miste
- C - Pentagono | centro storico
- D - Porta a Terra | area urbana commerciale
- E - Stazione | area urbana con tipologie edilizie residenziali miste
- F - Fabbricotti | area urbana prevalentemente residenziale con Parco pubblico
- G - Scopaia | area urbana con tessuto residenziale rado
- H - Antignano | area urbana fronte mare

Nei prossimi capitoli verranno descritte le informazioni tecniche e i principali output ottenuti per ogni tipologia di dato acquisito tramite voli con UAS multirottore durante l'estate 2025.



Identificazione delle aree oggetto di rilievo

2.1 Rilievo aereo da UAS multirottore per la produzione di ortofoto ad elevata risoluzione spaziale

DATI TECNICI

Strumento utilizzato: drone multirottore

Sensore: multispettrale

Tipologia output: immagini raster

Risoluzione immagine: GSD 3 cm/px

Data esecuzione voli: agosto 2025



OUTPUT

I voli UAS con sensori RGB hanno permesso di ottenere immagini che, una volta processate con software per l'elaborazione di dati fotogrammetrici e GIS (dati geospaziali), hanno prodotto ortofoto geo-referenziate di notevole dettaglio.

Per gli scopi di questo modulo, ottenere quindi una visione generale del contesto territoriale in cui analizzare le caratteristiche del fenomeno “isola di calore”, ci si è serviti di dati geospaziali ottenuti da un drone multirottore.

In allegato le ortofoto ad elevata risoluzione spaziale realizzate per ognuna delle otto aree di indagine, affiancate dalla specifica datazione di esecuzione del volo.

2.2 Rilievo aereo da UAS multirottore per la mappatura della permeabilità delle superfici e dell'albedo

DATI TECNICI

Strumento utilizzato: drone multirottore

Sensore: multispettrale

Tipologia output: immagini raster

Risoluzione immagine: GSD 5 cm/px

Data voli eseguiti: agosto 2025



OUTPUT

Al fine di studiare la permeabilità delle superfici e di ottenere risultati di grande dettaglio per ogni area oggetto d'analisi, ci si è serviti dei dati rilevati dai voli con drone multirottore munito di sensore multispettrale.

Le immagini raster ottenute sono state elaborate mediante operazioni sulle bande del rosso e del vicino infrarosso (NIR) rilevate dal sensore, con il fine di creare mappature idonee all'identificazione dell'attività fotosintetica in atto sul territorio sorvolato.

Dapprima, sono stati elaborati i dati per ottenere una mappa in cui ogni pixel contenesse il valore dell'**indice NDVI** in quel punto. Nelle rispettive mappe a falsi colori vengono così identificati in marrone i valori più prossimi a -1 (aree prive di attività vegetativa) e in verde i valori più prossimi a 1 (terreno completamente vegetato).⁴

Successivamente e analogamente a quanto effettuato in FASE 1, dalle mappe NDVI è stato possibile creare le mappe di **permeabilità**, isolando solamente quelle aree considerate permeabili, cioè con valori > 0,2. Nelle immagini specifiche si può, quindi, notare la suddivisione del territorio in aree permeabili (verde) e impermeabili (grigio scuro).

Infine, dalla combinazione di più bande dello spettro elettromagnetico intercettate dal sensore multispettrale, mediante algoritmo specifico, si è potuta ottenere la mappa di **albedo** per ogni area analizzata. Dalle relative carte tematiche è possibile identificare il valore di albedo superficiale con una scala cromatica dal nero al giallo chiaro: le superfici più assorbenti la radiazione solare sono quelle marine con valori più prossimi allo zero (colore nero), più, invece, le superfici diventano chiare e riflettenti con valori superiori allo zero, più si schiarisce anche il colore in mappa. Grazie alla rappresentazione di alcuni punti campionati, in ciascuna area è possibile in modo rapido verificare la corrispondenza dei materiali ai range standard di albedo.

Le mappe tematiche ad elevata risoluzione spaziale realizzate per studiare l'indice NDVI, la permeabilità e l'albedo di ognuna delle otto aree di indagine, ciascuna con l'indicazione della specifica datazione di esecuzione del volo, sono disponibili tra gli allegati condivisi.

⁴ Si precisa che l'indice NDVI rappresenta la vigoria vegetativa e non va interpretato come indicatore di vegetazione su manufatti e superfici d'acqua.

2.3 Rilievo aereo da UAS multirottore per la mappatura delle temperature superficiali

DATI TECNICI

Strumento utilizzato: drone multirottore

Sensore: termico

Tipologia output: immagini raster

Risoluzione immagine: GSD 9 cm/px

Data voli eseguiti: agosto 2025



OUTPUT

Il parametro principale per studiare il fenomeno isola di calore, la **temperatura superficiale**, è stato anch'esso indagato tramite i rilievi aerei programmati per le aree d'analisi.

Il sensore termico installato sul drone multirottore ha permesso quindi di ottenere immagini raster in grado di rappresentare la temperatura superficiale di ogni superficie intercettata in quel momento.

Ogni pixel dell'immagine raster contiene il valore della temperatura espressa in gradi Celsius. Con il tematismo a falsi colori applicato a ciascuna mappa delle temperature superficiali, si può ben intuire quali siano le aree più calde (rosso) e quelle più fredde (blu).

In allegato le mappe tematiche ad elevata risoluzione spaziale realizzate per studiare le temperature superficiali in ognuna delle otto aree di indagine, recanti anch'esse la specifica datazione di esecuzione del volo.

In ciascuna mappa sono stati evidenziati anche dei punti campione corrispondenti a differenti tipologie di materiale, dall'acqua all'asfalto, dagli alberi alle coperture degli edifici. Questo tipo di rappresentazione intende facilitare l'interpretazione dell'informazione, permettendo una rapida acquisizione del dato specifico, utile per un proficuo confronto.

Successivamente, poiché i rilievi aerei sono stati effettuati in giorni differenti, i valori termici sono stati ricalibrati rispetto al momento in cui si sono registrate le temperature più elevate, individuato nel 12 agosto 2025 alle ore 15:15 (area B).

Tale procedura ha consentito di uniformare i range termici e di garantire una migliore confrontabilità tra le diverse aree analizzate.

Infine, a partire da questa elaborazione, per evidenziare con maggiore chiarezza le criticità termiche, ovvero le zone caratterizzate da temperature superficiali elevate, sono state prodotte due tavole tematiche basate su una soglia cromatica a due livelli.

Nella prima, le aree con temperature comprese tra 60 e 65°C sono rappresentate in giallo, mentre quelle con valori superiori a 65 °C sono indicate in rosso.

Nella seconda, al fine di evidenziare in modo più sensibile le aree soggette a riscaldamento superficiale in ambito urbano, le soglie sono state abbassate: in giallo le aree con temperature tra 57 e 62 °C, e in rosso quelle con valori superiori a 62 °C.

2.4 Rilievo aereo da UAS multirottore con sensore per l'acquisizione di dati 3D sulla qualità e temperatura dell'aria, umidità relativa e principali inquinanti

DATI TECNICI

Strumento utilizzato: drone multirottore

Sensore: qualità dell'aria

Tipologia output: immagini georeferenziate da campioni vettoriali

Data voli eseguiti: 5 settembre 2025



OUTPUT

Qualità dell'aria e cambiamenti climatici sono due sfide che le città sono chiamate sempre più ad affrontare per rendere l'ambiente urbano più vivibile e sostenibile. Si tratta anche di *due facce della stessa medaglia*⁵: stretta è infatti la correlazione tra emissioni di gas inquinanti, comfort urbano, benessere sociale e azioni di mitigazione al cambiamento climatico.

I voli UAS con sensoristica specializzata per il rilevamento delle **concentrazioni di gas in atmosfera** permettono di ottenere una serie di dati sulla qualità dell'aria in modo preciso e puntuale.

Oltre agli inquinanti principali (NO₂/SO₂/CO/PM_{1-2.5-10}) pericolosi per la salute dell'uomo se eccedenti specifici valori, il sensore intercetta anche la **temperatura dell'aria** e l'**umidità relativa**, queste ultime due utili alla definizione di situazioni di comfort/disagio bioclimatico.

Per quanto concerne l'analisi della qualità dell'aria puntuale, vale a dire l'esecuzione di tragitti aerei a più quote con drone multirottore in particolari zone della città, si sono identificate tre aree, tra le otto iniziali, dalle differenti caratteristiche ambientali. Nello specifico:

- A - Picchianti | area asfaltata in zona artigianale
- C - Pentagono | dall'area verde nella fortezza alla quella pavimentata della piazza
- H - Antignano | area verde e asfaltata fronte mare

Qui di seguito le prime analisi effettuate con i dati intercettati dal sensore per la qualità dell'aria.

INDICE TERMO IGROMETRICO

All'identificazione di zone critiche durante un evento di caldo intenso (ondate di calore), concorre anche l'informazione sul benessere bioclimatico.

L'**Indice Termo Igrometrico** (THI), valido anche per i periodi estremamente freddi, mettendo in relazione la temperatura dell'aria e l'umidità relativa rilevate ad **altezza uomo**, va ad esprimere una situazione di comfort o di stress termico percepito.

La classificazione climatica che ne deriva è rappresentata nella tabella e nelle immagini seguenti.

⁵ *Qualità dell'aria e cambiamenti climatici: due facce della stessa medaglia*, Facchini M.C., Fuzzi S. (2017)

AREA	T _a media	U _r media	THI	Categoria di THI
A - artigianale	24,69 °C	41,68 %	21,42	Caldo: Cautela. Leggero disagio. Possibile affaticamento in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica.
C - zona verde (fortezza)	21,97 °C	50,65 %	19,94	Confortevole: Benessere. Tutti sono a proprio agio.
C - zona pubblica (piazza)	23,73 °C	46,14 %	20,99	Caldo: Cautela. Leggero disagio. Possibile affaticamento in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica.
H - zona verde + parcheggio	23,61 °C	47,86 %	20,99	Caldo: Cautela. Leggero disagio. Possibile affaticamento in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica.

AREA A

T_a media
20-30 °C



U_r media
35-60,6 %



AREA C (fortezza)

T_a media
20-30 °C



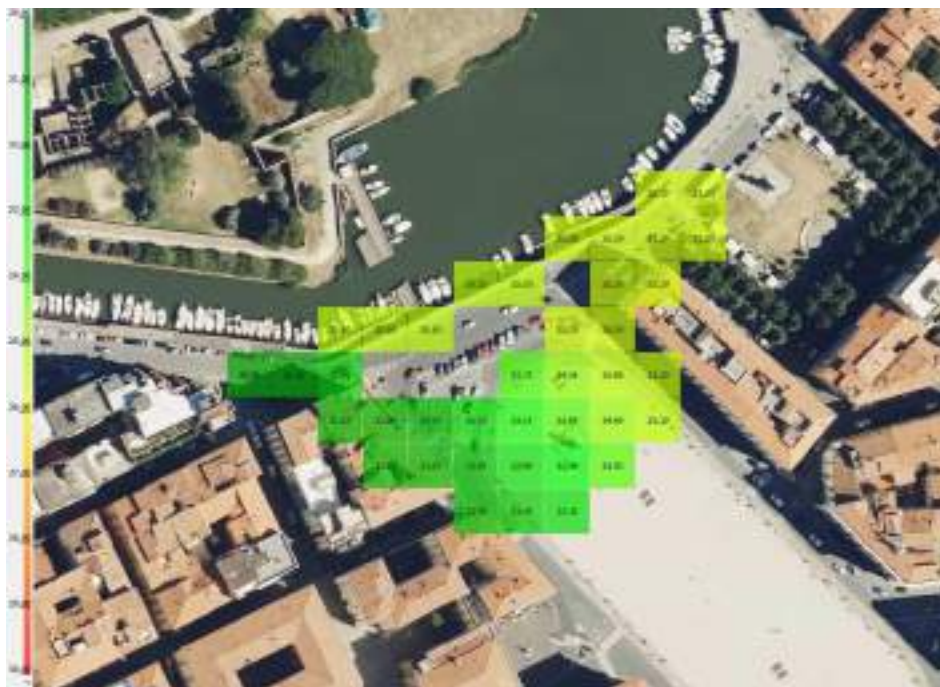
U_r media
35-60,6 %



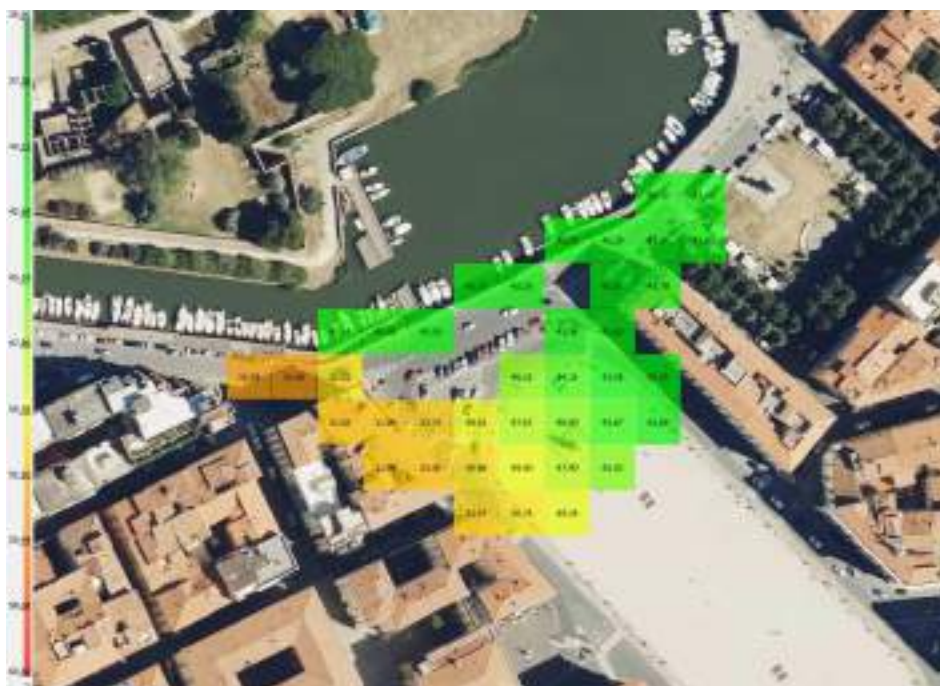
Dalla seconda mappa emerge chiaramente come le alberature influenzino il microclima: nella porzione di tragitto in prossimità del canale i valori di umidità risultano più elevati, mentre all'interno dell'area verde l'umidità è più moderata grazie all'effetto di ombreggiamento e mitigazione della vegetazione.

AREA C (piazza)

T_a media
20-30 °C



U_r media
35-60,6 %



Qui è evidente l'influenza della morfologia urbana sul microclima: il disegno rettilineo della piazza agevola il passaggio delle correnti d'aria dai canali, abbassando i valori di umidità, mentre la presenza dell'edificato a sud crea un effetto barriera.

AREA H

T_a media
20-30 °C



U_r media
35-60,6 %



In quest'ultimo caso si osserva un gradiente dei valori al variare della tipologia e della funzione dello spazio pubblico: dall'area verde, più fresca e umida, al parcheggio asfaltato, più caldo e tendenzialmente più secco.

PRINCIPALI INQUINANTI

Successivamente si è provveduto ad elaborare i dati rilevati dal sensore per quanto concerne le **concentrazioni dei principali gas inquinanti in atmosfera**.

L'utilizzo di UAS ha permesso di eseguire dei rilevamenti in quota (30/50 m) e ad altezza uomo lungo specifici tragitti, per verificare l'impatto dei gas in aree aperte ad uso pubblico.

L'esito di tale rilievo ha identificato la presenza di monossido di carbonio (CO), biossido di azoto (NO₂), e particolato fine PM_{1-2.5-10}. Non è stata invece rilevata la presenza di biossido di zolfo (SO₂).

Il confronto tra le diverse aree analizzate suggerisce che, salvo casi puntuali dovuti al passaggio di autoveicoli, i valori di particolato fine non presentano differenze marcate nonostante la diversa configurazione dei tessuti urbani. Questa relativa uniformità può essere attribuita, almeno in parte, alla prossimità della città di Livorno al mare e al conseguente ricambio d'aria indotto dalle correnti costiere.

Seguono in allegato le mappe di concentrazione per ogni elemento inquinante rilevato.

Materiale di consegna | FASE 1

Al termine della FASE 1 ed entro la data concordata con l'Amministrazione Comunale, sono stati consegnati i seguenti materiali preliminari finali:

CONSEGNA FASE 1		
Cartella	Sottocartella	Documento
Materiali consegna_FASE 1	Dati raster	LST del Comune di Livorno del 2024-06-05
		LST del Comune di Livorno del 2024-07-16
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01
		NDVI del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Albedo del Comune di Livorno del 2024-08-01
	Mappe in pdf	LST del Comune di Livorno del 2024-06-05_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-07-16_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01_range50-71
		LST del Comune di Livorno del 2024-08-01_range59-71
		NDVI del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Permeabilità del Comune di Livorno del 2024-08-01
		Albedo del Comune di Livorno del 2024-08-01
	Report	Report preliminare FASE 1

Materiale di consegna | FASE 2

Al termine della FASE 2 ed entro la data concordata con l'Amministrazione Comunale, sono stati consegnati i seguenti materiali finali:

CONSEGNA FASE 2			
Cartella	Sottocartelle		Documento
Materiali consegna_FASE 2	Dati raster e vettoriali_UAS	Albedo	8 raster di albedo e Punti Albedo
		Aree Livorno_UAS	Shapefile poligonale delle aree di analisi
		Fabbricati traslato...	Shapefile poligonale dell'edificato
		NDVI	8 raster di NDVI
		Ortofoto	8 raster di ortofoto
		Temperature superficiali	14 raster di temperatura superficiale e relativi Punti
	Mappe in pdf_Satellite	LST Livorno	LST Livorno del 2024-06-05_13-59
			LST Livorno del 2024-07-16_13-59
			LST Livorno del 2024-08-01_13-59
			LST Livorno del 2024-08-01_29-59
	Mappe in pdf_UAS	Aria	Mappe Aria
		PNG singoli	50 mappe degli inquinanti

			Mappe Albedo
			Mappe NDVI
			Mappe Ortofoto
			Mappe Permeabilità
			Mappe Temperature superficiali
			Mappe Temperature superficiali normalizzate e UHI
	Report finale		Report finale FASE 2

Piattaforma Web-GIS

È stata aggiornata la piattaforma Web-GIS dalla quale poter consultare online i risultati del presente progetto.

Credenziali di accesso riservato



Conclusioni

La FASE 1 di questo progetto ha permesso di ottenere una ricognizione generale per l'intero territorio comunale della città di Livorno in merito ad alcune specifiche caratteristiche morfologiche e climatiche finalizzate allo studio di potenziali isole di calore urbane.

In relazione all'analisi climatica proposta, si è dapprima raccolto ed elaborato un set informatizzato di dati raster satellitari geospaziali utili alla pianificazione per una corretta localizzazione dell'informazione e una conoscenza generalizzata dei fenomeni che incidono sulla città. In particolare, si è dimostrato il manifestarsi di temperature più elevate nei contesti urbanizzati mediante lo studio della LST e il confronto con la carta della permeabilità.

Alla FASE 2 l'obiettivo di identificare aree critiche, e strategiche allo stesso tempo, sulle quali poter effettuare approfondimenti per un'urbanistica di precisione mediante UAS.

L'utilizzo quindi di droni dotati di sensoristica specialistica, ha permesso di effettuare rilievi aerei ad elevata risoluzione spaziale per un'accurata analisi di dettaglio delle caratteristiche di alcune aree tipiche del territorio comunale. Le informazioni raccolte in questa seconda fase formano anch'esse un data-set informatizzato di dati raster e vettoriali geospaziali.

Come esito della FASE 2 sono state prodotte carte tematiche delle superfici sorvolate relative ad **ortofoto di precisione, permeabilità, albedo e temperature al suolo**. Questi elaborati costituiscono uno strumento di supporto alle decisioni per individuare nel dettaglio criticità microclimatiche e indirizzare interventi di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici nelle aree urbane maggiormente esposte. A corredo, è stata inoltre condotta l'analisi sulla **qualità dell'aria** in alcune delle aree oggetto di studio, al fine di integrare gli indicatori termici con quelli chimico-fisici.

Le criticità osservate variano in funzione della morfologia urbana, del tipo di coperture utilizzate e della presenza di vegetazione e alberature. Le temperature più elevate sono state registrate in aree con scarsa vegetazione e in presenza di materiali scuri (asfalti, coperture edilizie), con differenze superficiali anche di 15/20 °C rispetto alle stesse superfici poste in ombra. Questo dato è indicativo di un potenziale effetto isola di calore urbana, riscontrabile soprattutto in corrispondenza del reticolo stradale in aree artigianali e commerciali.

Il confronto tra le mappe ha permesso di evidenziare anche il differente comportamento dei materiali nel rilascio del calore: superfici con valori simili di albedo possono presentare risposte termiche molto diverse per le loro caratteristiche intrinseche, come dimostra il caso dell'erba naturale rispetto all'erba sintetica. Ciò suggerisce la necessità di considerare non solo l'indice di riflettanza, ma anche le proprietà fisiche e le capacità di accumulo e rilascio del calore dei diversi materiali.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda l'**area H**, il **quartiere Antignano** fronte mare a sud della città. L'area sorvolata si estende per circa 300 m dalla costa e ha consentito di constatare l'influenza diretta del mare sulle condizioni microclimatiche. Le temperature aumentano progressivamente allontanandosi dalla linea di costa (cfr. i valori dell'asfalto e degli alberi in prossimità del mare rispetto a quelli più nell'entroterra), indicando un gradiente termico che si riflette anche sul comfort bioclimatico e sulla dispersione degli inquinanti atmosferici.

L'indagine svolta con il sensore dedicato alla raccolta dei parametri ambientali ha permesso di ottenere un quadro complessivo della **qualità dell'aria** nel comune di Livorno, con particolare attenzione alle variazioni alle diverse quote (30/50 m e altezza uomo) e in differenti contesti urbani.

La relazione tra temperatura dell'aria e umidità relativa ha permesso ad AeroDron di valutare le condizioni di benessere bioclimatico percepito. Mediante le mappe dell'**indice THI** è infatti possibile apprezzare ulteriormente i benefici di una vigorosa vegetazione in contesti urbani, evidenziando la presenza di una situazione di comfort migliore rispetto alle aree prive o con scarse alberature e vegetazione attiva. Il confronto tra aree con vegetazione vigorosa e zone prive di copertura arborea, mostra come le aree alberate favoriscano microclimi più confortevoli con effetti benefici sulla salute e sulla vivibilità complessiva.

La morfologia del territorio e la **prossimità al mare** costituiscono quindi dei fattori determinanti: rispetto alle aree urbane padane, da noi già in precedenza analizzate, il comune di Livorno beneficia di un naturale ricambio d'aria indotto dallo scambio di correnti tra costa ed entroterra. Ciò si traduce in una minore persistenza degli inquinanti e in contrasti meno marcati tra zone diverse, pur con alcune eccezioni puntuali.

Tra queste spiccano le concentrazioni di biossido di azoto (NO₂) rilevate in quota, soprattutto nell'area H, rimanendo tuttavia entro il limite normativo di riferimento. L'analisi del particolato fine conferma invece una distribuzione più legata alla presenza di sorgenti emissive localizzate (es. autoveicoli in moto) rispetto alle condizioni microclimatiche. In senso opposto, i tratti esclusivamente pedonali, come l'accesso alla spiaggia dell'area H, si distinguono per valori minimi di inquinanti, se non addirittura assenti, evidenziando i benefici della lontananza dal traffico veicolare.

I risultati ottenuti rafforzano quindi l'idea che la qualità dell'aria e il comfort microclimatico non dipendano da un singolo fattore ma dall'interazione tra caratteristiche ambientali, scelte urbanistiche e condizioni meteo-climatiche.

L'integrazione tra rilievi termici, analisi dei materiali e monitoraggio della qualità dell'aria fornisce un quadro completo delle dinamiche microclimatiche della città di Livorno, evidenziando come fattori naturali (vicinanza al mare) e antropici (materiali e coperture) interagiscano nel determinare il comfort urbano e la distribuzione degli inquinanti.

Infine, i rilievi effettuati tramite UAS possono così confermare quanto previsto e mostrato nelle mappe satellitari, nello specifico si conferma:

- la presenza di temperature elevate estive (50/60 °C) nell'area artigianale (A) e in quella commerciale (D)
- il beneficio di aree verdi e parchi urbani come zone "fresche" (cfr. aree F e H)

Questo tipo di studio invita quindi ad una pianificazione, attenta e idonea a ciascuno spazio urbano, di azioni per l'adattamento e il contrasto ai cambiamenti climatici. Incrementare l'albedo delle superfici, con l'utilizzo di materiali freddi (*cool materials*), materiali riflettenti che possono mantenere basse le temperature superficiali, o aumentare la presenza di aree verdi e permeabili a discapito di aree inutilmente impermeabilizzate, sono solo alcune misure adottabili.

Altri riferimenti a possibili misure di mitigazione/adattamento da adottare per ridurre gli impatti da ondate di calore sono rintracciabili nei seguenti documenti:

- **Abaco di azioni di adattamento ai cambiamenti climatici.** *Verso paesaggi dell'abitare e del lavorare a prova di clima: adattamento ai cambiamenti climatici e miglioramento del comfort degli spazi pubblici e delle aree produttive nel territorio peri-urbano.* (2020) [link](#)
- **Liberare il suolo.** *Linee guida per migliorare la resilienza ai cambiamenti climatici negli interventi di rigenerazione urbana.* (2020) [link](#)
- **Mantova resiliente.** *Verso il Piano di Adattamento Climatico - Linee Guida.* (2018) [link](#)
- **Rigenerare la città con la natura.** *Strumenti per la progettazione degli spazi pubblici tra mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.* (2018) [link](#)

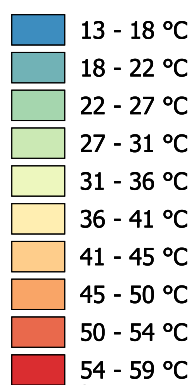
...le città a prova di clima sono anche città per le persone perché la maggior parte delle misure, sicuramente quelle più efficaci sia per l'adattamento che per la mitigazione, sono misure basate sulla reintroduzione della natura nelle aree urbane, che rendono le città più sane, belle, confortevoli, accessibili, vivibili, vitali ed attrattive.

Jan Gehl - architetto danese



Mappa della LST di Livorno

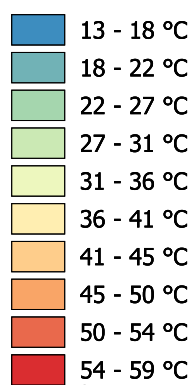
Landsat-8 | 5 giugno 2024 | ore 12:04 locali



2 km

Mappa della LST di Livorno

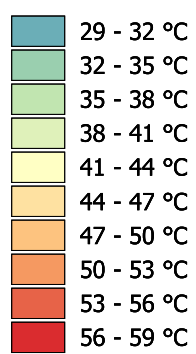
Landsat-8 | 16 luglio 2024 | ore 11:58 locali



2 km

Mappa della LST di Livorno

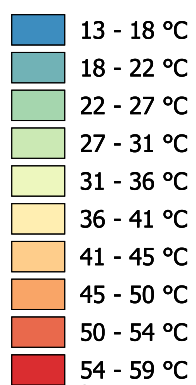
Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali



2 km

Mappa della LST di Livorno

Landsat-8 | 1 agosto 2024 | ore 11:58 locali



2 km

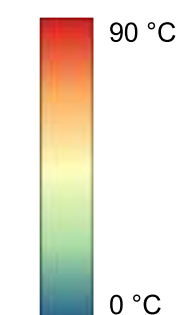


Livorno

Temperature superficiali Area A - Picchianti

Rilievo aereo con UAS
11 agosto 2025 | 16:30 | Temp. ambiente 39 °C

● Punti campionati



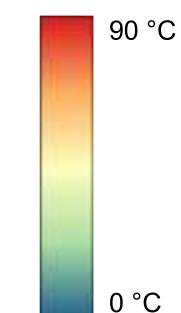


● Livorno

Temperature superficiali Area B - Sorgenti

Rilievo aereo con UAS
12 agosto 2025 | 15:15 | Temp. ambiente 48 °C

● Punti campionati

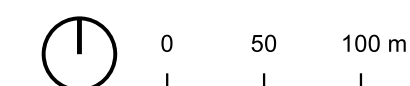
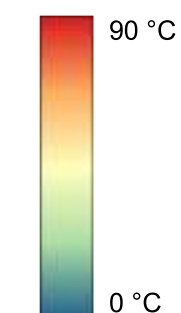


● Livorno

Temperature superficiali Area C - Pentagono

Rilievo aereo con UAS
12 agosto 2025 | 12:00 | Temp. ambiente 36 °C

● Punti campionati



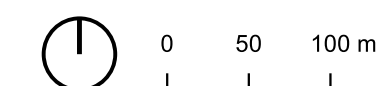
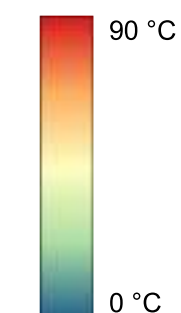


Livorno

Temperature superficiali Area D - Porta a Terra

Rilievo aereo con UAS
27 agosto 2025 | 11:00 | Temp. ambiente 26 °C

● Punti campionati



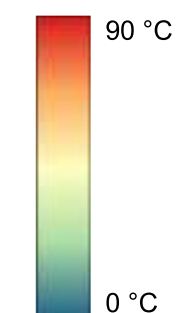


● Livorno

Temperature superficiali Area E - Stazione

Rilevo aereo con UAS
11 agosto 2025 | 15:15 | Temp. ambiente 38 °C

● Punti campionati



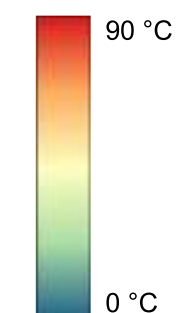


● Livorno

Temperature superficiali Area F - Fabbricotti

Rilievo aereo con UAS
27 agosto 2025 | 12:30 | Temp. ambiente 26 °C

● Punti campionati



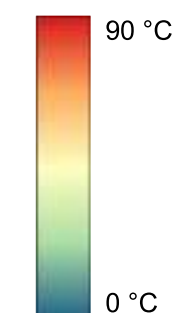


● Livorno

Temperature superficiali Area G - Scopaia

Rilievo aereo con UAS
11 agosto 2025 | 10:45 | Temp. ambiente 35 °C

● Punti campionati



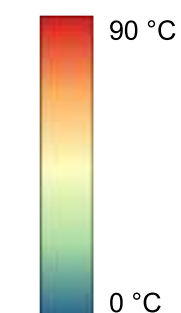


● Livorno

Temperature superficiali Area H - Antignano

Rilievo aereo con UAS
11 agosto 2025 | 11:45 | Temp. ambiente 30 °C

● Punti campionati





● Livorno

Albedo

Area A - Picchianti

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

● Punti campionati

1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo Area B - Sorgenti

Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025

● Punti campionati

1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo

Area C - Pentagono

Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025

● Punti campionati

1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



● Livorno

Albedo

Area D - Porta a Terra

Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025

● Punti campionati

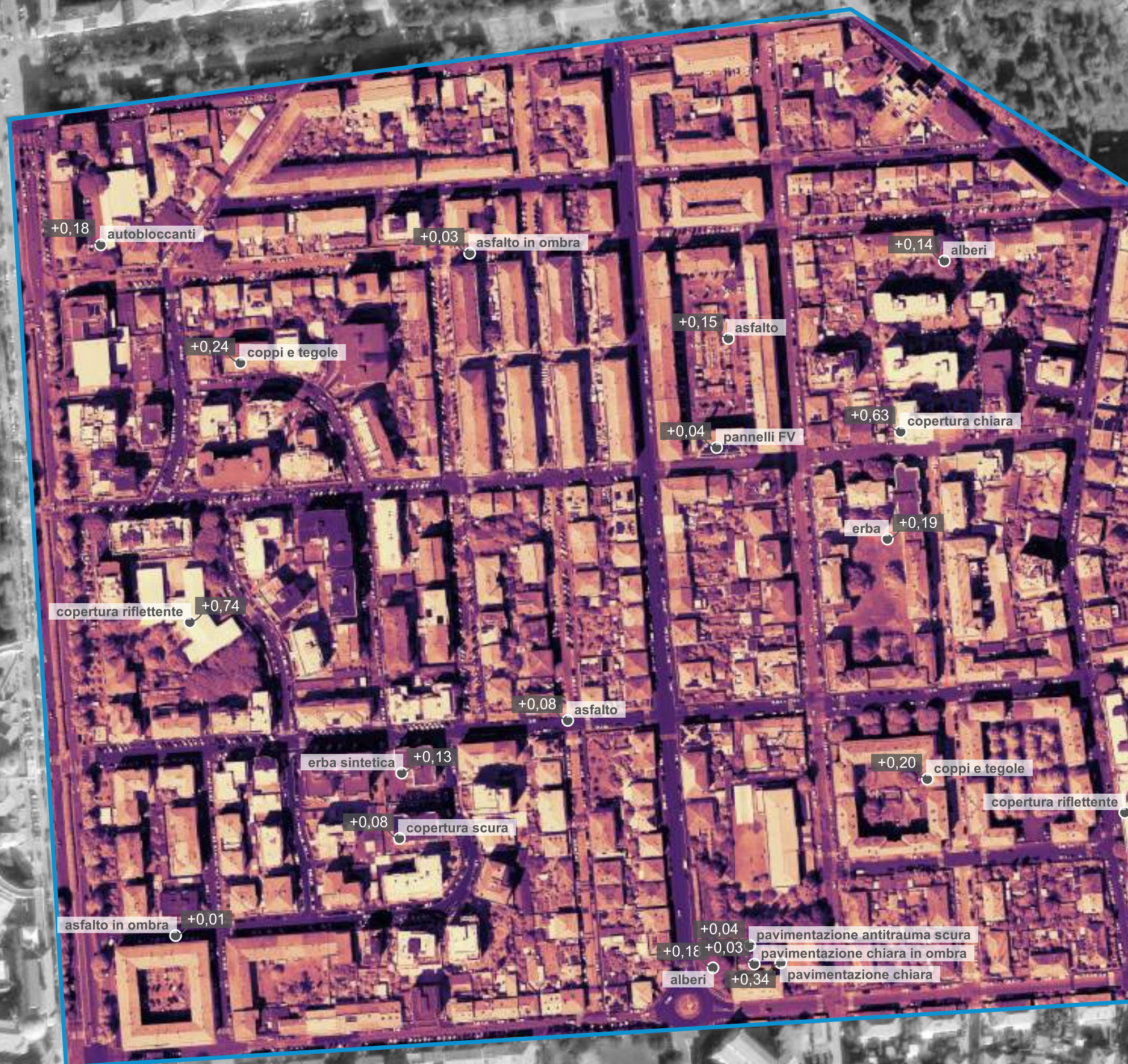
1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo

Area E - Stazione

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

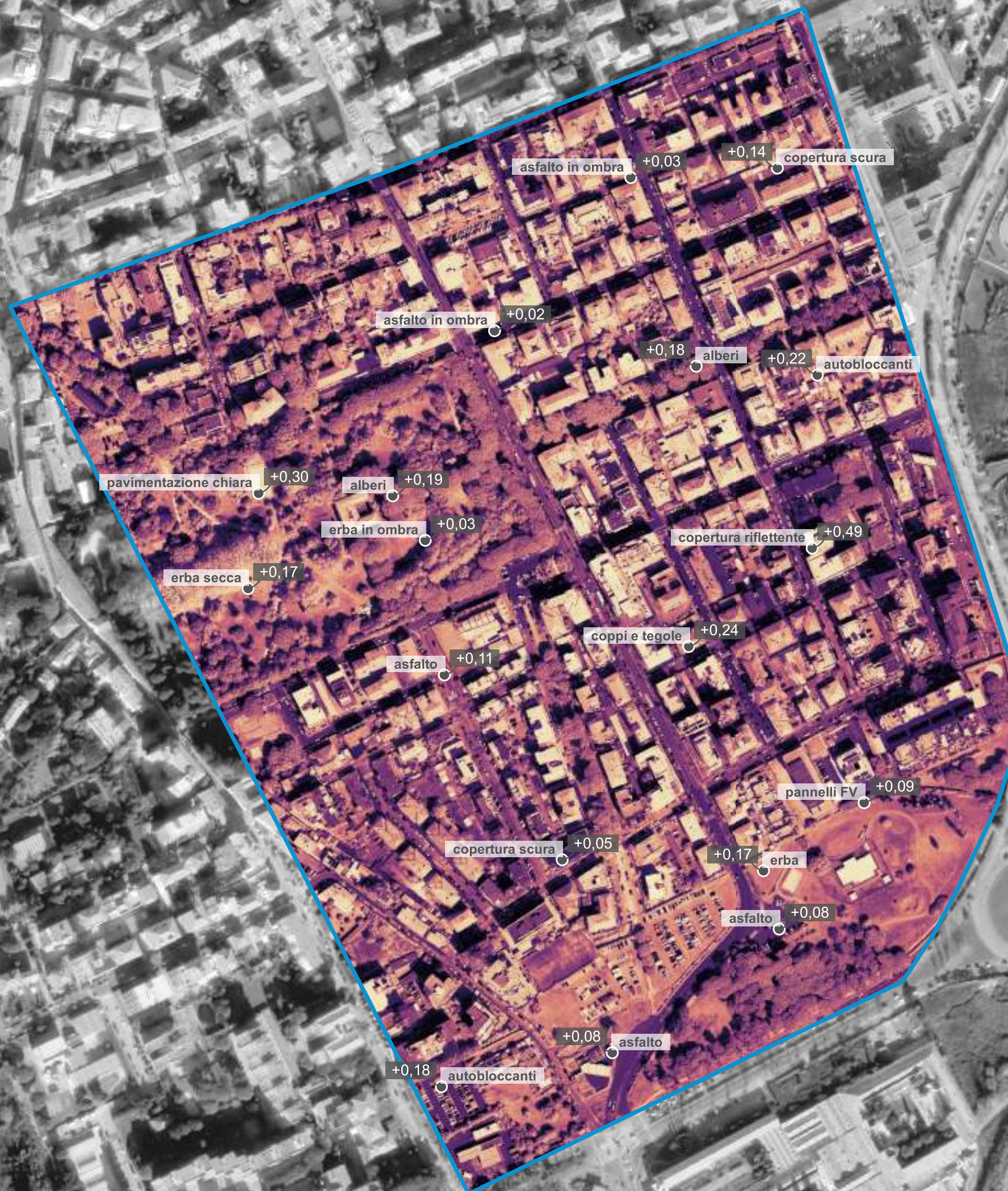
● Punti campionati

1 Superfici riflettenti

0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo

Area F - Fabbricotti

Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025

● Punti campionati

1 Superfici riflettenti

0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo

Area G - Scopaia

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

● Punti campionati

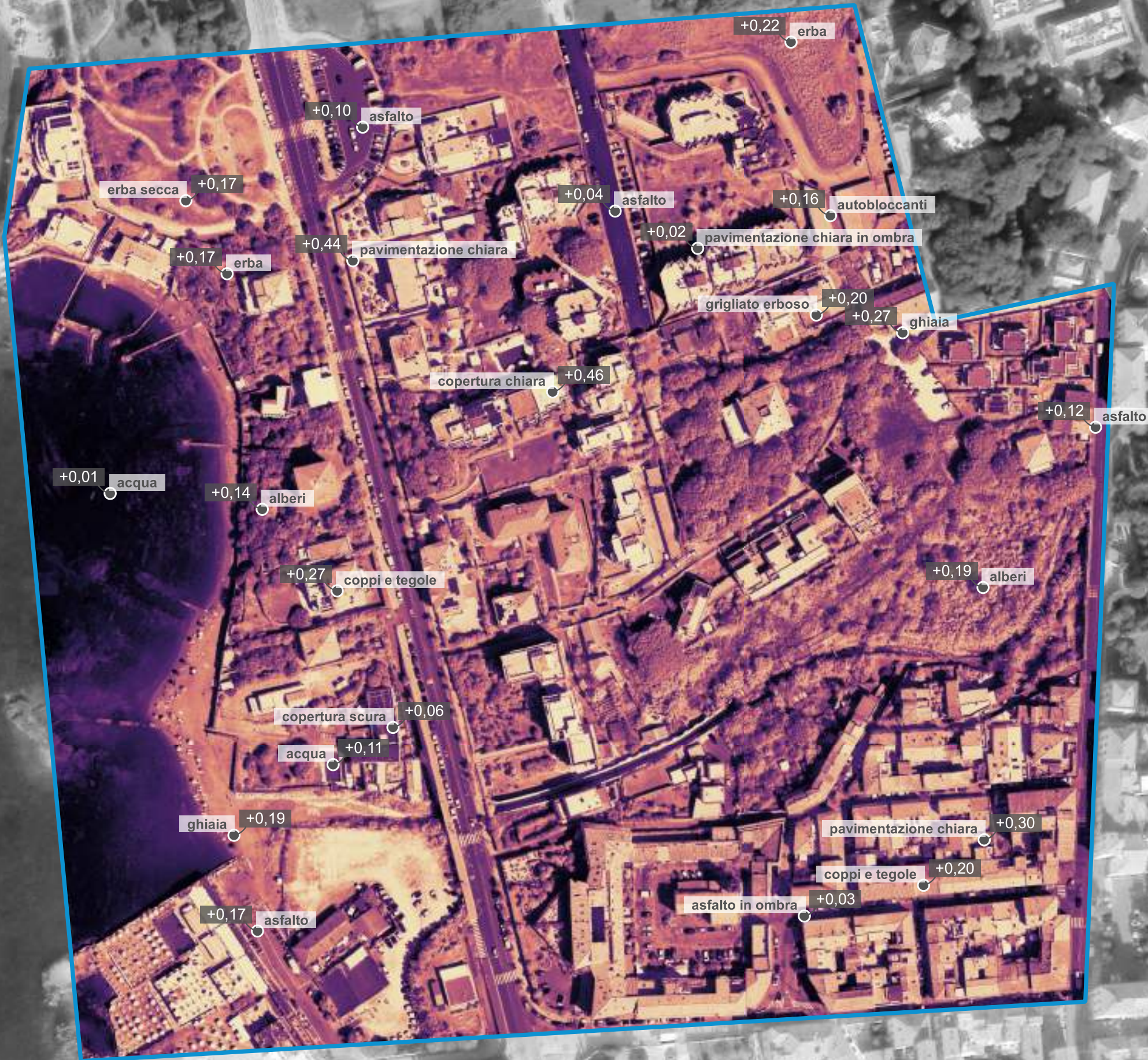
1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



Livorno

Albedo

Area H - Antignano

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

● Punti campionati

1 Superfici riflettenti



0 Superfici assorbenti



0 50 100 m



📍 Livorno

Ortofoto Area A - Picchianti

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025





 Livorno

Ortofoto Area B - Sorgenti

Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025





 Livorno

Ortofoto Area C - Pentagono

Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025



0 50 100 m



 Livorno

Ortofoto Area D - Porta a Terra

Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025



0 50 100 m



📍 Livorno

Ortofoto Area E - Stazione

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025





 Livorno

Ortofoto Area F - Fabbricotti

Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025



0 50 100 m



 Livorno

Ortofoto Area G - Scopaia

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025



0 50 100 m



Livorno

Ortofoto Area H - Antignano

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025



0 50 100 m



 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area A - Picchianti

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area B - Sorgenti

Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici **Area C - Pentagono**

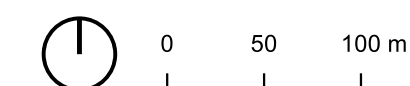
Rilievo aereo con UAS | 12 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area D - Porta a Terra

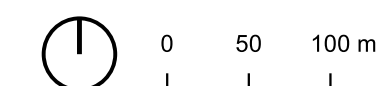
Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area E - Stazione

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area F - Fabbricotti

Rilievo aereo con UAS | 27 agosto 2025

 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

**Permeabilità delle superfici
Area G - Scopaia**

Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

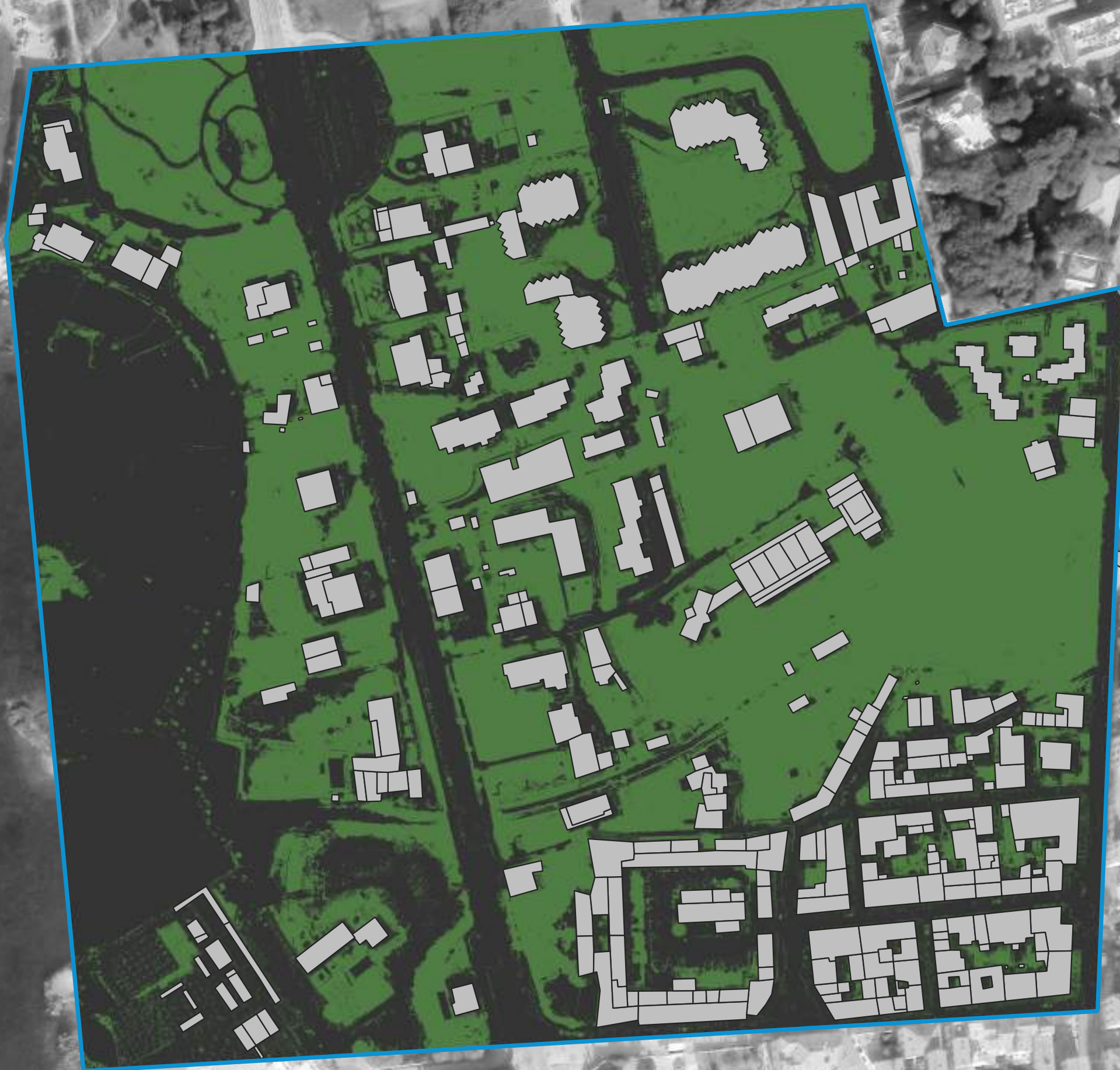
 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





 Livorno

Permeabilità delle superfici
Area H - Antignano

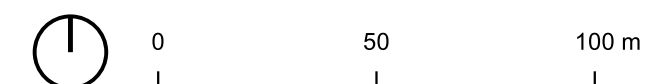
Rilievo aereo con UAS | 11 agosto 2025

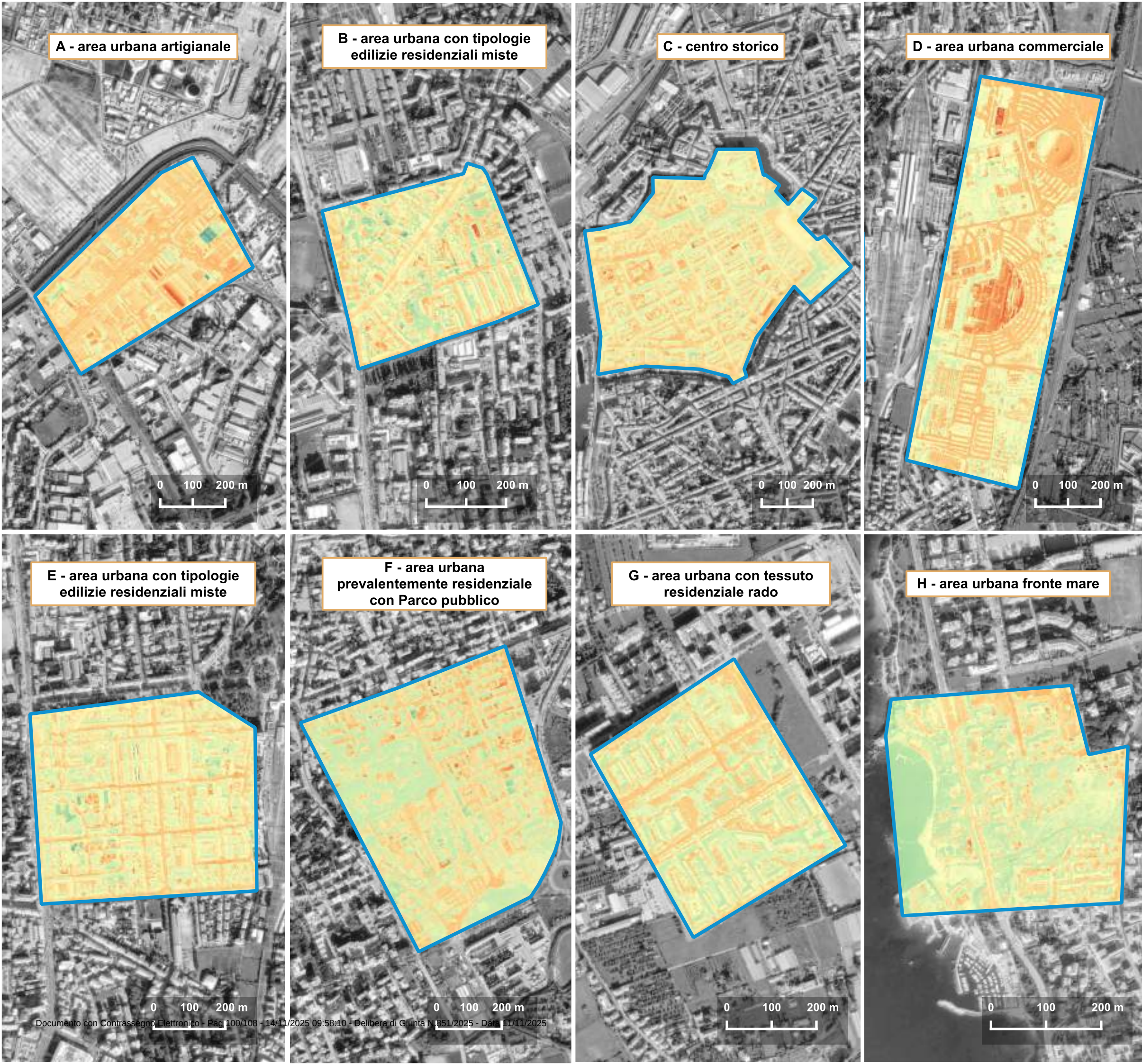
 Edificato

Indice NDVI

 $\leq 0,20$ Aree impermeabili

 $> 0,20$ Aree permeabili





Identificazione delle aree oggetto di rilievo

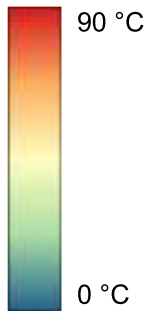
In questa tavola sono riportate, per le otto aree oggetto di rilievo, le temperature superficiali espresse in °C.

Al fine di rendere le mappe tra loro comparabili, i valori termici sono stati rapportati al giorno in cui si sono registrate le temperature più elevate, poiché i rilievi aerei sono stati effettuati in date differenti. In questo modo è possibile uniformare i range termici, garantendo una migliore confrontabilità tra le diverse aree analizzate.

Livorno

**Temperature superficiali
normalizzate per il confronto**

Rilievo aereo con UAS
giorno più caldo di riferimento: 12-08-2025 | 15:55





Identificazione delle aree oggetto di rilievo

In questa tavola sono riportate, per le otto aree oggetto di rilievo, le zone caratterizzate da temperature superficiali elevate.

Al fine di evidenziare con maggiore chiarezza le criticità riscontrate, le mappe tematiche sono state realizzate utilizzando una soglia cromatica a due livelli: in giallo le aree con temperature comprese tra 60 e 65 °C, e in rosso quelle con valori superiori a 65 °C.



**Temperature superficiali
normalizzate per il confronto
e l'identificazione di isole di calore**

Rilievo aereo con UAS
giorno più caldo di riferimento: 12-08-2025 | 15:55

Range di temperature critiche:

60,00 - 65,00 °C

> 65,00 °C





Identificazione delle aree oggetto di rilievo

In questa tavola sono riportate, per le otto aree oggetto di rilievo, le zone caratterizzate da temperature superficiali elevate.

Al fine di evidenziare in modo più sensibile le aree soggette a riscaldamento superficiale in ambito urbano, le soglie di temperatura sono state abbassate utilizzando sempre un tematismo cromatico a due livelli: in giallo le aree con temperature comprese tra 57 e 62 °C, e in rosso quelle con valori superiori a 62 °C.

Livorno

Temperature superficiali normalizzate per il confronto e l'identificazione di isole di calore

Rilievo aereo con UAS
giorno più caldo di riferimento: 12-08-2025 | 15:55

Range di temperature critiche:

	57,00 - 62,00 °C
	> 62,00 °C

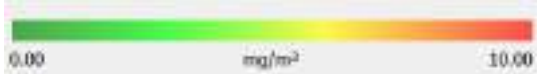


Inquinante
MONOSSIDO DI CARBONIO - CO

Rilievo aereo con UAS | 05 settembre 2025

AREA	Quota di volo
A1 - artigianale	50 m
A2 - artigianale	altezza uomo
C1 - zona pubblica (fortezza)	altezza uomo
C2 - zona pubblica (fortezza/canale/piazza)	50 m
C3 - zona pubblica (piazza)	altezza uomo
H1 - zona verde + parcheggio	30 m
H2 - zona verde + parcheggio	altezza uomo
H3 - tragitto zona verde/spiaggia	altezza uomo

(10 mg/m³ media massima giornaliera su 8h)



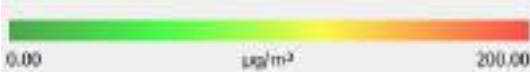


Inquinante
BIOSSIDO DI AZOTO - NO₂

Rilievo aereo con UAS | 05 settembre 2025

AREA	Quota di volo
A1 - artigianale	50 m
A2 - artigianale	altezza uomo
C1 - zona pubblica (fortezza)	altezza uomo
C2 - zona pubblica (fortezza/canale/piazza)	50 m
C3 - zona pubblica (piazza)	altezza uomo
H1 - zona verde + parcheggio	30 m
H2 - zona verde + parcheggio	altezza uomo
H3 - tragitto zona verde/spiaggia	altezza uomo

(200 µg/m³ max per la media oraria)





Inquinante
CONCENTRAZIONE DI PARTICOLATO FINE - PM₁

Rilievo aereo con UAS | 05 settembre 2025

AREA	Quota di volo
A1 - artigianale	50 m
A2 - artigianale	altezza uomo
C1 - zona pubblica (fortezza)	altezza uomo
C2 - zona pubblica (fortezza/canale/piazza)	50 m
C3 - zona pubblica (piazza)	altezza uomo
H1 - zona verde + parcheggio	30 m
H2 - zona verde + parcheggio	altezza uomo
H3 - tragitto zona verde/spiaggia	altezza uomo

(per il PM₁ non sono previsti valori limite di legge)



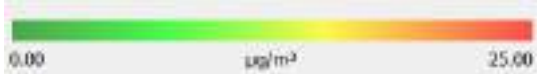


Inquinante
CONCENTRAZIONE DI PARTICOLATO FINE - PM_{2,5}

Rilievo aereo con UAS | 05 settembre 2025

AREA	Quota di volo
A1 - artigianale	50 m
A2 - artigianale	altezza uomo
C1 - zona pubblica (fortezza)	altezza uomo
C2 - zona pubblica (fortezza/canale/piazza)	50 m
C3 - zona pubblica (piazza)	altezza uomo
H1 - zona verde + parcheggio	30 m
H2 - zona verde + parcheggio	altezza uomo
H3 - tragitto zona verde/spiaggia	altezza uomo

(25 µg/m³ max per la media annuale)





Inquinante
CONCENTRAZIONE DI PARTICOLATO FINE - PM₁₀

Rilievo aereo con UAS | 05 settembre 2025

AREA	Quota di volo
A1 - artigianale	50 m
A2 - artigianale	altezza uomo
C1 - zona pubblica (fortezza)	altezza uomo
C2 - zona pubblica (fortezza/canale/piazza)	50 m
C3 - zona pubblica (piazza)	altezza uomo
H1 - zona verde + parcheggio	30 m
H2 - zona verde + parcheggio	altezza uomo
H3 - tragitto zona verde/spiaggia	altezza uomo

(50 µg/m³ max per la media giornaliera)



Contrassegno Elettronico

TIPO CONTRASSEGNO: QR Code

IMPRONTA (SHA-256): 3a1f1b9aea32446f637413a7a93536bfab6bfd78e29ae26c6d323bdcf95de851

Firme digitali presenti nel documento originale

LEONARDO GONNELLI

Dati contenuti all'interno del Contrassegno Elettronico

Delibera di Giunta N.851/2025

Data: 11/11/2025

Oggetto: TRANSIZIONE ECOLOGICA – ASSET CONTRASTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI (ACC).
STUDIO DEL FENOMENO DENOMINATO ISOLA DI CALORE URBANA NEL TERRITORIO DI LIVORNO



Ai sensi dell'articolo 23-ter, comma 5, del D.Lgs. 82/2005, le informazioni e gli elementi contenuti nel contrassegno generato elettronicamente sono idonei ai fini della verifica della corrispondenza al documento amministrativo informatico originale. Si precisa altresì che il documento amministrativo informatico originale da cui la copia analogica è tratta è stato prodotto dall'amministrazione ed è contenuto nel contrassegno.



URL: http://www.timbro-digitale.it/GetDocument/GDOCController?qrc=ac4ddd377a525351_p7m&auth=1

ID: ac4ddd377a525351