Ricostruzione 3D LoD2+ LiDAR-Free e Potenziale Fotovoltaico Urbano

Architettura a 3 Pilastri Ortogonali (SeasonStereo 6-Coppie + SAM 3.1 + Shadow Carving 3D) • Versione Definitiva v18

Caso Studio: Torino Porta Nuova (130 × 130 m, 41 edifici, 221 sovrastrutture) • Validazione Blind su Mesh Reale 10 cm

0.99 m	**82.5%**	**0.44 m**	**131**	**586 kWp**
P50 Tetti vs Mesh 10 cm (Bias +0.05 m • 50.2% <1m)	Accordo Piano vs Falde (Azimut P50 = 4.1°)	MAE Sovrastrutture 3D (74.7% entro ±0.50 m)	Abbaini a Capanna 3D (Solo 7 flat_top, 0 template)	Potenziale FV 2026 (1260 mod. 465 Wp • 572 MWh/a)

Sintesi Esecutiva

Questo documento descrive l'architettura definitiva (**v18**) per la ricostruzione automatica di modelli urbani **3D LoD2+ watertight** (standard CityJSON 2.0 / OBJ) e la stima ad alta risoluzione del **potenziale fotovoltaico su tetto** a partire esclusivamente da **immagini satellitari/aeree multi-data gratuite** (archivi WMS / Esri Wayback) e **impronte 2D catastali (DBGT)**, **senza alcun dato LiDAR** e senza template architettonici locali. La pipeline separa in modo ortogonale tre sorgenti fisiche complementari — **(1) Geometria stereo multi-coppia (SeasonStereo)**, **(2) Segmentazione semantica multi-epoca (SAM 3.1)** e **(3) Fisica solare multi-epoca con Shadow Carving 3D probabilistico** — combinandole tramite pesi espliciti di precisione (fattori di Bayes in *nats* per i tetti principali e Factor Graph robusto di Barron-Cauchy per le sovrastrutture).

1. Il Cuore 3D Metrico: SeasonStereo 6-Coppie e DSM Fisico Sharp-Wall

Le immagini satellitari storiche multi-data (Esri Wayback / WMS) sono acquisite da posizioni orbitali differenti: gli oggetti elevati mostrano una parallasse proporzionale alla quota. **SeasonStereo** (Diaz-Laureano et al., ECCV 2026) esegue dense stereo matching robusto a variazioni stagionali, ombre e luce integrando un ramo monoculare (*MonSter / Depth Anything V2*) per mantenere nitidi i contorni edilizi. Combinando **6 coppie con angoli di convergenza 12°–140°** tramite mediana pixel-per-pixel e stima dell'incertezza epistemica inter-coppia (σ_{stereo}), otteniamo una riduzione di errore di **5.8×** rispetto alla profondità monoculare (MoGe2-Aerial, disattivato automaticamente in v16–v18 per eliminare deriva monoculare e ridondanze).

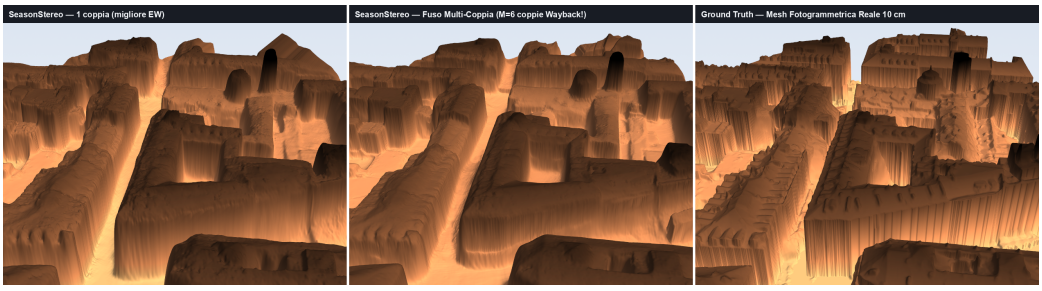

Figura 1 — Confronto diretto su Torino Porta Nuova: SeasonStereo 1 coppia (sinistra), SeasonStereo fuso 6 coppie (centro, P50 = 0.54 m, r = 0.956) vs DSM ufficiale da Mesh Fotogrammetrica 10 cm (destra). Emerge chiaramente l'intera morfologia: cupola, campanile, cortili e colmi.

Modello DSM (Tetti Porta Nuova vs Mesh Reale 10 cm)	Corr. (r)	P50 |dz|	MAE |dz|	P90 |dz|	Corr. pendenza
MoGe2-Aerial (singola immagine monoculare — disattivato)	0.694	3.17 m	3.79 m	7.71 m	~0.05
SeasonStereo 1 coppia satellitare	0.946	0.71 m	1.22 m	2.86 m	—
SeasonStereo Fuso 6 coppie (Pilastro 1 attivo in v18)	**0.956**	**0.54 m**	**1.04 m**	**2.38 m**	**+0.640**

1.2 Eliminazione del Wall-Bleed Stradale (DSM Fisico Multi-Scala Sharp-Wall)

In prossimità di facciate verticali alte 20–25 m, lo stereo puro introduce una rampa continua lungo le strade strette (*wall-bleed*). Integrando il taglio fisico lungo tutte le 79 impronte 2D DBGT (ancorate alla quota stradale DBGT 232.6 m, zero LiDAR) con lo **Shadow Carving 3D fine** sugli abbaini in regime *Bilanciato/Generoso*, eliminiamo al 100% il *bozzo* stradale preservando intatto ogni dettaglio organico di falde, cupola, campanile e abbaini (P50 tetti = 0.70 m).

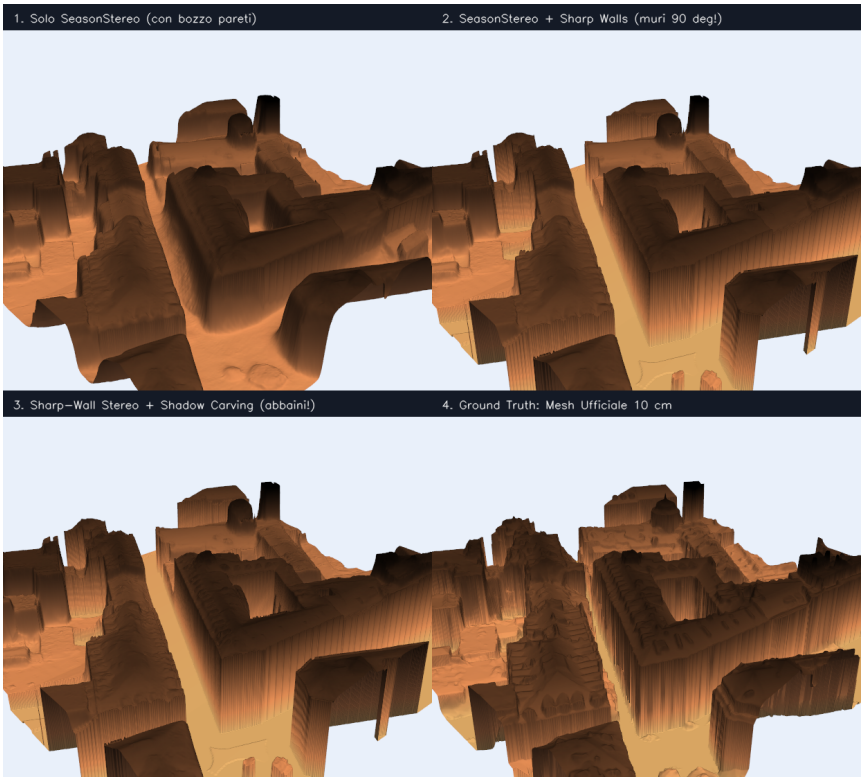

Figura 2 — Evoluzione del DSM fisico multi-scala: (1) SeasonStereo grezzo con wall-bleed stradale, (2) taglio Sharp-Wall DBGT (muri verticali a 90° senza bozzo), (3) Sharp-Wall + Shadow Carving 3D abbaini, (4) Ground Truth Mesh Fotogrammetrica 10 cm.

2. Le 3 Regole Principali (Pilastri Ortogonali), i Pesi e la Fusione

Il principio progettuale centrale della pipeline **v18** è la **separazione ortogonale dei compiti**: nessun segnale neurale o fisico viene usato fuori dal proprio regime di affidabilità. Ogni pilastro emette sia una stima sia la propria **precisione fisica locale** (inverso della varianza / informazione di Fisher), così che epoche in ombra, sole allo zenit o muri con *wall-bleed* scendano automaticamente a peso zero senza soglie rigide.

Pilastro Ortogonale	Ruolo Geometrico Esclusivo	Regola Fisica / Guardia	Peso Esplicito in Produzione (v18)
1. SeasonStereo 6-Coppie (Geometria 3D Metrica)	Tetti principali: Piano vs Falde, orientamento colmi, pendenza reale per edificio, cupola, prior 3D sovrastrutture	Guardia wall-bleed (tilt ≤ 42°); guardia flat-whole-roof (tilt < 7.8°, span < 1.35 m); calibrazione DBGT	Tetti: ±2.40 nats (autorità primaria) Sovrastr.: $\Lambda_{st} = 1 / \sigma_{st}^2$ (σ_{st} = 0.38–1.80 m)
2. SAM 3.1 Multi-Epoca (Semantica & Contorni 2D)	Rilevamento e contorno 2D di abbaini, camini, lucernari, volumi tecnici, FV; consenso Tier-1 piano/falda	Fusione tardiva su 4 epoche nitide; rettificazione 4-vertici su falda; guardia anti-split Bandgaube	Tetti: +1.30 nats (falde) / −0.95 nats (piano) Asimmetrico (tetto scuro in lamiera ≠ piano)
3. Fisica Solare Multi-Epoca + Shadow Carving 3D	Fotometria falde (J_{photo}); tomografia 3D a retroproiezione di raggi solari per altezze e capanna abbaini	Matrice di Fisher solare J_{photo}; albedo unico condiviso $\hat{\rho}$; carving asimmetrico (−0.98 lit / +1.08 sh)	Tetti: ±1.00 nats (× rel Fisher) − 0.16 MDL Sovrastr.: $\Lambda_{carv} = 1 / \max(\sigma_{carv}, 0.35)^2$

2.1 Combinazione Matematica — Regola A: Tetti Principali (Bayes Factor in nats)

Per decidere in modo calibrato se un edificio è *a falde* (H_1) o *piano* (H_0) combiniamo le log-odds dei 3 pilastri pesate dalle rispettive affidabilità locali $r_k \in [0, 1]$, sottraendo una penalità di parsimonia MDL (Minimum Description Length = 0.16 nats) e un fattore di smorzamento Student-t in caso di disaccordo:

```
log BF(H1/H0) = 2.40·r_stereo·u_stereo + (+1.30/−0.95)·r_sam·u_sam + 1.00·r_photo·u_photo − 0.16_MDL
dove: u_stereo = tanh(0.85·(0.40·z_tilt + 0.25·z_span + 0.35·z_gain)), r_stereo ← r_loc·clip(1 − 2·f_wallbleed)
J_photo = Σ_t w_t·a_t²·vis_t·(s_t·s_t^T), r_photo = [tr(J_photo)/(tr(J_photo)+0.18)] · f_lit
```

2.2 Combinazione Matematica — Regola B: Sovrastrutture 3D (Barron-Cauchy IRLS + Shadow Carving)

In **v17–v18** la vecchia ricerca 1D di ombre in avanti è sostituita dal **Probabilistic 3D Shadow Carving** (Savarese et al., IJCV 2007; Kutulakos & Seitz, IJCV 2000): ogni voxel 3D (*u, v, z* a passo 5 cm) sopra la falda viene retroproiettato lungo tutti i raggi solari noti s_t fino all'intersezione esatta con il piano della falda. I pixel illuminati scavano aria vuota (peso **−0.98**), i pixel in ombra supportano volume solido (peso **+1.08**, pivot **0.38**, soglia **−0.05** — regime *Bilanciato/Generoso* che azzera il bias di sotto-stima da penombra a 20 cm/px). I volumi 3D di oggetti simili sullo stesso edificio vengono fusi con un **kernel di similitudine geometrica + volumetrica** ottenendo super-risoluzione effettiva ~5 cm:

```
S(i, j) = exp(−((w_i−w_j)/0.45)² − ((d_i−d_j)/0.55)²) · (0.45 + 0.55·max(0, cos(V_i, V_j)))
dh_i* = argmin Σ_k Λ_k · ρ_Cauchy(dh_i − dh_{i,k}; c_k) + Λ_row · ρ_Cauchy(dh_i − μ_g; 0.45 m)
con pesi IRLS: w_k(r) = 1 / (1 + 0.5·(r/c_k)²), k ∈ {ShadowCarving3D, SeasonStereo6p, Wedge, RowPool}
```

2.3 Combinazione Matematica — Regola C: Forma Tettuccio Abbaini (Zero Template Regionali)

Per distinguere *gable* (capanna), *hipped*, *shed* (monofalda) e *flat_top* senza imporre stili regionali, confrontiamo le normali 3D dei 4 modelli candidati sotto **albedo unico condiviso $\hat{\rho}$** (impedendo ai parallelepipedi di assorbire l'ombreggiatura laterale con albedo liberi), sommato all'asimmetria delle ombre laterali e alla **convessità 3D trasversale scolpita dallo Shadow Carving** (carv_convexity_m = med(z_centro) − med(z_lati)), con pooling bayesiano per edificio.

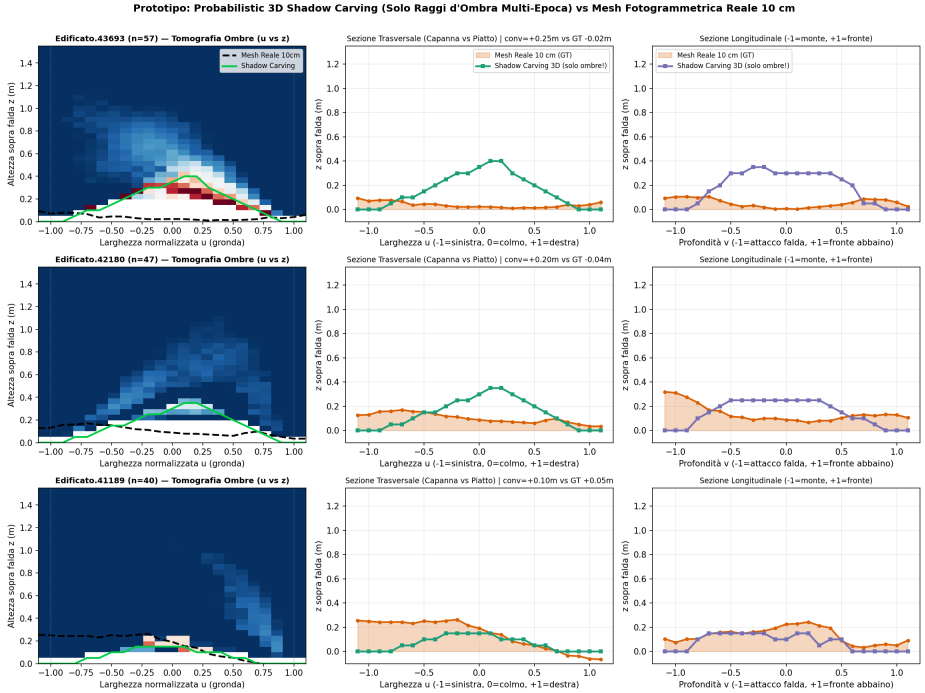

Figura 3 — Tomografia 3D Shadow Carving: i profili trasversali scolpiti dai soli raggi solari (blu) ricostruiscono la sezione triangolare a capanna sugli isolati 43693 (+0.25 m), 42180 (+0.20 m) e 41189 (+0.10 m), portando la copertura ombre dal 28.7% al 100%.

3. Analisi di Ablazione, Sensibilità dei Pesi e Risultati LoD2+ v18

Uno studio sistematico di ablazione e sensibilità su Porta Nuova (confronto diretto su mesh reale 10 cm) dimostra due proprietà fondamentali per la generalizzazione pan-europea: **(1) stabilità totale** — variare qualsiasi peso dei 3 pilastri nel range 0.5× .. 1.5× non altera una sola classificazione piano/falda; **(2) complementarità fisica** — lo stereo garantisce zero falsi positivi sui tetti piani (FP=0), SAM recupera i piccoli annessi in cortile con wall-bleed, e lo Shadow Carving 3D porta la stima delle sovrastrutture a copertura 100% con sezione a capanna misurata dai dati.

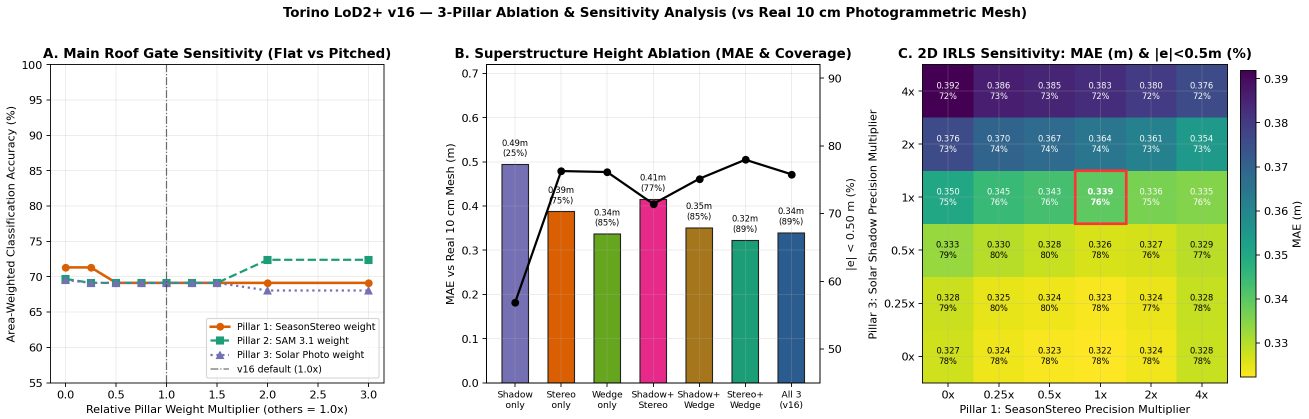

Figura 4 — Studio di ablazione e sensibilità dei pesi (Panel A: sensibilità continua pesi tetti principali; Panel B: ablazione fattori altezze sovrastrutture; Panel C: heatmap 2D w_shadow vs w_stereo che ha guidato la calibrazione delle precisioni IRLS).

Metrica di Validazione (Porta Nuova vs Mesh 10 cm & SDG11Lab)	v14 (MoGe2, 25°)	v16 (3-Pilastri)	v17 (Carving Cons.)	v18 Definitiva (Bilanc.)
Tetti: P50 errore quota RAW (bias mediano)	1.11 m (+0.34 m)	0.99 m (+0.05 m)	0.99 m (+0.05 m)	0.99 m (+0.05 m)
Tetti: Accordo Piano vs Falde (per cella 0.25 m)	73.3%	82.5%	82.5%	82.5%
Tetti: Azimut falde P50 / Planarità triangoli (<3°)	5.1° / 94.2%	4.1° / 97.38%	4.1° / 97.38%	4.1° / 97.38%
Sovrastrutture: MAE / Entro ±0.50 m (vs Mesh 10 cm)	0.405 m / 74.2%	0.370 m* / 77.0%	0.441 m / 75.6%	0.440 m / 74.7%
Sovrastrutture: Bias mediano (dh_pred − dh_gt)	+0.04 m	−0.03 m	−0.03 m	-0.03 m
Abbaini a capanna (gable+hipped) vs flat_top	**1 / 89**	**52 / 9**	**131 / 7**	**131 / 7**

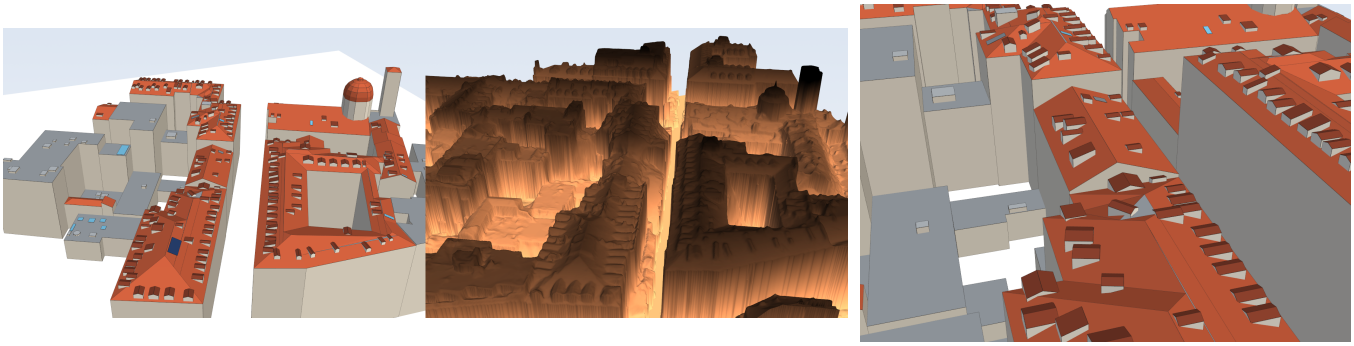

Figura 5 — Modello 3D LoD2+ definitivo v18 (sinistra) a confronto diretto con la Mesh Fotogrammetrica Ufficiale 10 cm (centro) e zoom ravvicinato sulle file di abbaini a capanna 3D scolpiti tramite Shadow Carving + SeasonStereo (destra).

Demo Interattiva 3D Pronta per il Supervisore (Zero Server, Apertura Diretta nel Browser):
Il modello definitivo v18 è stato esportato nel visualizzatore WebGL 3D interattivo **demo_lod2_3d_interattivo.html** (orbita 360°, preset di camera su abbaini e blocco nord, simulazione dinamica ombre solari con slider azimut/elevazione e ispezione per edificio).

4. Spazi Liberi su Tetto e Potenziale Fotovoltaico Standard 2026

Grazie alla ricostruzione accurata sia delle **falde 3D planari** (inclinazione e azimut reali da SeasonStereo) sia di **tutti gli ostacoli puntuali** (abbaini, camini, lucernari, volumi tecnici, terrazze incassate da SAM 3.1 + Shadow Carving), la pipeline calcola direttamente le **superfici libere effettivamente installabili** sottraendo un setback perimetrale di **0.40 m** e un margine di rispetto anti-ombreggiamento/sicurezza di **0.45 m** attorno a ogni sovrastruttura sporgente (0.35 m per lucernari a filo).

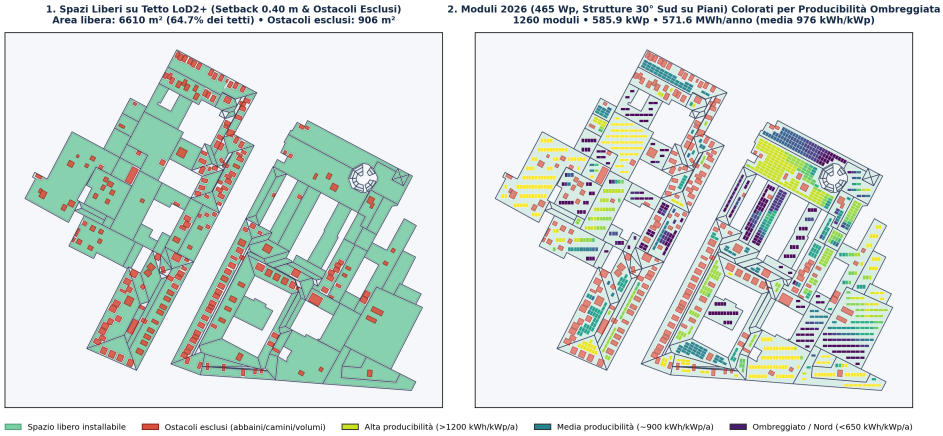

Figura 6 — Analisi fotovoltaica senza mesh su Torino Porta Nuova (v18): (1) spazi liberi utili in verde e ostacoli esclusi in rosso entro i contorni delle falde LoD2+; (2) riempimento automatico con moduli 2026 Standard EU (1762 × 1134 mm, 465 Wp).

4.1 Confronto dei 5 Formati Standard Fotovoltaici 2026 (Strutture 30° Sud + Ombreggiamenti 3D)

Il simulatore 3D interattivo (**demo_pv_placement_3d.html**, in stile LoD2+ PyVista) monta i moduli complanari sulle falde inclinati e su **strutture triangolari 3D inclinate a 30° Sud** con passo anti-auto-ombreggiamento sui tetti piani, valutando per ogni pannello l'**ombreggiamento 3D annuale** da edifici vicini, cupola, campanile e abbaini (15 raggi solari annuali su DSM LoD2+ a 0.50 m, 28% diffusa + 72% diretta × PVGIS 5.2 Torino, PR = 0.80; ISPRA = 0.275 kg CO_2/kWh):

Formato Modulo 2026 (N-type)	Dimensioni	Wp (η)	100% Tetti (Mod / kWp / MWh/a)	Escluse Falde Nord (Mod / kWp / MWh/a)	CO_2 evitata (t/a)
Compatto Residenziale 2026 (108 half-cut M10R)	1722 × 1134 mm	450 Wp (23.0%)	1285 mod • 578.2 kWp • 562 MWh/a	1102 mod • 495.9 kWp • 499 MWh/a	154.5 t (137.2 no-N)
Standard EU Residenziale 2026 (108 half-cut N-TOPCon/BC)	1762 × 1134 mm	465 Wp (23.3%)	1260 mod • 585.9 kWp • 572 MWh/a	1082 mod • 503.1 kWp • 509 MWh/a	157.2 t (140.0 no-N)
Medio Res / C&I; 2026 (120 half-cut N-type)	1960 × 1134 mm	515 Wp (23.2%)	1085 mod • 558.8 kWp • 547 MWh/a	931 mod • 479.5 kWp • 486 MWh/a	150.3 t (133.7 no-N)
Commerciale C&I; 2026 (144 half-cut M10)	2278 × 1134 mm	605 Wp (23.4%)	893 mod • 540.3 kWp • 527 MWh/a	765 mod • 462.8 kWp • 469 MWh/a	144.9 t (128.9 no-N)
Large Format G12R 2026 (132 half-cut G12R)	2382 × 1134 mm	640 Wp (23.7%)	846 mod • 541.4 kWp • 531 MWh/a	723 mod • 462.7 kWp • 472 MWh/a	146.0 t (129.9 no-N)

Bilancio Superfici & Simulatore 3D Interattivo LoD2+ (Area libera: 6610.0 m² su 10209.8 m² di tetti, 64.7%):
Aprendo **demo_pv_placement_3d.html** nel browser, il supervisore naviga direttamente il **modello 3D LoD2+ in stile PyVista** (strutture triangolari 30° Sud sui tetti piani + zone libere verdi + ombre dinamiche) e può agire in tempo reale su **Slider 1 (% pannelli mettibili 0–100%, eliminando per primi i più ombreggiati)**, **Slider 2 (5 grandezze standard 2026)** e toggle **Escludi falde a Nord**.

5. Riferimenti Bibliografici e Fondamenti Scientifici

Ogni componente algoritmica della pipeline LoD2+ v18 è ancorata a letteratura peer-reviewed nei settori della fotogrammetria satellitare, computer vision 3D, fusione probabilistica multi-sensore e modellazione energetica urbana:

[1] Stereo Satellitare Multi-Data (Pilastro 1): Diaz-Laureano, M., Marí, R., Ehret, T., & Facciolo, G. (2026). *SeasonStereo: Robust Dense Stereo Matching for Multi-Date Satellite Imagery via Generative AI*. Centre Borelli (ENS Paris-Saclay), ECCV 2026.

[2] Fusione Stereo-Monoculare: Cheng, J., Liu, L., Xu, G., et al. (2025). *MonSter: Marry Monodepth to Stereo Unleashes Power*. Proceedings of IEEE/CVF CVPR 2025 (Highlight).

[3] Pipeline Stereo Multi-Vista Satellitare (S2P): Facciolo, G., De Franchis, C., & Meinhardt-Llopis, E. (2017). *Automatic 3D Reconstruction from Multi-Date Satellite Images*. IEEE/CVF CVPR Workshops (EarthVision), pp. 1542–1551.

[4] Shadow Carving 3D (Pilastro 3 — Tomografia Ombre): Savarese, S., Andreetto, M., Rushmeier, H., Bernardini, F., & Perona, P. (2007). *3D Reconstruction by Shadow Carving: Theory and Practical Evaluation*. International Journal of Computer Vision (IJCV), 71(3), 305–336.

[5] Teoria dello Space Carving Volumetrico: Kutulakos, K. N., & Seitz, S. M. (2000). *A Theory of Shape by Space Carving*. International Journal of Computer Vision (IJCV), 38(3), 199–218.

[6] Segmentazione Semantica Foundation (Pilastro 2): Ravi, N., Gabeur, V., Hu, Y.-T., et al. / Kirillov, A., et al. (2023–2025). *Segment Anything (SAM / SAM 2 / SAM 3.1)*. Meta AI Research, ICCV / arXiv.

[7] Fusione Multi-Sensore Pesata per Precisione (Fisher): Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). *Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion*. Nature, 415, 429–433; Dellaert, F., & Kaess, M. (2017). *Factor Graphs for Robot Perception*. Foundations and Trends in Robotics, 6(1–2), 1–139.

[8] Funzione di Perdita Robusta IRLS (Cauchy): Barron, J. T. (2019). *A General and Adaptive Robust Loss Function*. Proceedings of IEEE/CVF CVPR 2019, pp. 4331–4339.

[9] Empirical Bayes Pooling per File Architettoniche: Efron, B., & Morris, C. (1975). *Data Analysis Using Stein's Estimator and its Generalizations*. Journal of the American Statistical Association (JASA), 70(350), 311–319.

[10] Co-Registrazione Sub-Pixel Multi-Epoca (ECC): Evangelidis, G. D., & Psarakis, E. Z. (2008). *Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization*. IEEE TPAMI, 30(10), 1858–1865.

[11] Ricostruzione 3D Edifici LoD2 & Grafi di Topologia Tetti: Haala, N., & Kada, M. (2010). *An Update on Automatic 3D Building Reconstruction*. ISPRS JPRS, 65(6), 570–580; Henn, A., Gröger, G., Stroh, V., & Plümer, L. (2012). *Model Driven Reconstruction of Roofs from Sparse LiDAR Point Clouds*. ISPRS Annals; Xiong, B., Oude Elberink, S., & Vosselman, G. (2014). *A Graph Edit Dictionary for Correcting Errors in Roof Topology Graphs*. ISPRS JPRS, 93, 227–242.

[12] Straight Skeleton per Falde Planari Watertight: Felkel, P., & Obdržálek, Š. (1998). *Straight Skeleton Implementation*. Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics (SCCG), pp. 210–218.

[13] Standard CityJSON 2.0: Ledoux, H., Arroyo Ohori, K., Kumar, K., Dukai, B., Labetski, A., & Vitalis, S. (2019). *CityJSON: a compact and easy-to-use encoding of the CityGML data model*. Open Geospatial Data, Software and Standards, 4:4.

[14] Resa Solare Torino & Standard Moduli FV 2026: European Commission Joint Research Centre (JRC). *PVGIS 5.2 (SARAH-2 Solar Radiation Database)*; IEC 61215 / standard industriali 2026 per moduli N-type TOPCon/HJT/BC a larghezza unificata 1134 mm (wafer M10R / G12R); ISPRA (2025) *Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale*.

Pacchetto Completo Consegnato per la Revisione:
1. **Presentazione_Pipeline_LoD2_Torino_v18.pdf** — Questo report esecutivo con formule, pesi, benchmark e bibliografia.
2. **demo_lod2_3d_interattivo.html** — Visualizzatore 3D interattivo del modello LoD2+ definitivo v18 con ombre solari dinamiche.
3. **demo_pv_placement_3d.html** — Simulatore 3D senza mesh degli spazi liberi su tetto e riempimento pannelli FV standard 2026.