



Simulazione Fluidodinamica del flusso aereo nasale nella maxillectomia mediana endoscopica classica versus modificata

BACKGROUND

La **maxillectomia mediana endoscopica** (EMM) è un intervento demolitivo che prevede la **rimozione di parete mediale del seno mascellare, turbinato inferiore in toto, processo uncinato e turbinato medio**, eseguito solitamente per il trattamento di neoformazioni naso-sinusal, come il papilloma invertito¹. Le conseguenze sull'anatomia naso-sinusale sono significative e a livello funzionale si possono evidenziare la **riduzione della capacità di condizionamento dell'aria inspirata e la formazione di croste** fino a configurare il quadro dell'*empty nose syndrome*; inoltre si possono verificare **ostruzione delle vie lacrimali e ipoestesia della regione malare**. Per ridurre l'entità di tali conseguenze sono state introdotte alcune versioni modificate dell'intervento (**maxillectomia endoscopica mediana modificata**, MEMM) che prevedono il risparmio delle vie lacrimali con miglioramento di epifora e ricorrenza di dacriocistiti, e del turbinato inferiore con benefici sulla funzionalità naso-sinusale. Nonostante queste osservazioni siano supportate dall'analisi degli outcomes clinici², nessuno studio ha valutato il ruolo specifico del risparmio del turbinato inferiore nel prevenire le alterazioni della fluidodinamica naso-sinusale. Al fine di fornire delle **basi teoriche a supporto della superiorità funzionale** della tecnica MEMM rispetto alla EMM, in questo studio è stata utilizzata la **fluidodinamica computazionale** (CFD), mediante la tecnica di simulazione LES (Large Eddy Simulation).

MATERIALI E METODI

Una **scansione TC** di un soggetto maschio di 67 anni con un'anatomia naso-sinusale normale è stata convertita in un **modello geometrico con il software open-source 3D-Slicer** e usata come punto di partenza per creare **due modelli di chirurgia virtuale che fossero rappresentativi di una tecnica EMM e MEMM**, in quest'ultimo caso sono stati risparmiati la porzione anteriore di turbinato inferiore e parete mediale del seno mascellare fino al dotto nasolacrimale²(fig.1). La chirurgia virtuale è stata eseguita sul lato destro, mentre setto e lato sinistro non sono stati modificati. La simulazione del comportamento del flusso d'aria è stata effettuata mediante il software open-source OpenFOAM, riproducendo un'**inspirazione stazionaria** della durata di 0.6 secondi prodotta da una differenza di pressione di 20 Pa tra l'esterno e la laringe. Al contrario della maggior parte degli studi disponibili di CFD, il nostro studio utilizza un approccio numerico più affidabile: le equazioni di Navier Stokes vengono infatti risolte numericamente attraverso l'approccio **LES**, che si colloca a metà strada tra il largamente diffuso, ma poco accurato, approccio RANS e la simulazione numerica diretta DNS³, e consente di predire più accuratamente le **caratteristiche di un flusso turbolento ad elevata instazionarietà** come quello che si incontra nella cavità nasale. La **statistica sui dati numerici è eseguita a posteriori** con un processo di *time-averaging*, analogamente a quanto svolto su dati ottenuti da un esperimento reale.

RISULTATI

L'analisi dei tre modelli mostrano che **l'EMM provoca un'evidente alterazione nel flusso aereo** mentre nella MEMM le caratteristiche del flusso sono simili a quelle riscontrate nel modello basale. In particolare:

- **Portata volumetrica (volumetric flow rate): esso aumenta in modo evidente nella EMM**, mentre nella MEMM tale aumento è più contenuto (tab.1)
- **Velocità** (fig.3): a causa della geometria intrinseca del naso la **massima velocità è raggiunta nel meato medio; EMM induce una modificazione sostanziale della velocità media determinando la comparsa di velocità maggiori e il raggiungimento delle porzioni laterale e craniale del seno mascellare** da parte di un flusso ad elevata velocità, inoltre provoca una riduzione della velocità massima nella fossa nasale controlaterale. **Nella MEMM, sebbene si evidenzino differenze rispetto al modello basale, non vi sono aree ad elevata velocità e i cambiamenti sono di minore entità** rispetto a quelli osservati nella EMM.
- **Fluttuazioni** (fig.4): i valori dello scarto quadratico medio quantificano le informazioni che rappresentano le **fluttuazioni della velocità**. Nel **modello basale** si evidenzia come le fluttuazioni nel meato medio e inferiore siano **trascurabili**, suggerendo la presenza di un flusso stazionario, mentre nei modelli **EMM e MEMM si osservano ampie fluttuazioni**: in EMM esse sono maggiori nella regione del seno etmoidale anteriore e del turbinato medio, mentre nella MEMM lo sono appena al di sotto della porzione residua di turbinato inferiore.
 - **Turbolenza** (fig.5): la dimensione del campo di turbolenza aumenta progressivamente dal modello basale verso il modello EMM; mentre il maggior valore di turbolenza non cambia in modo significativo da un modello all'altro, la distribuzione del campo di turbolenza si modifica raggiungendo la parete laterale del seno mascellare nel modello EMM ma restando più contenuta nel modello MEMM nel quale si concentra nella porzione mediale della fossa nasale.

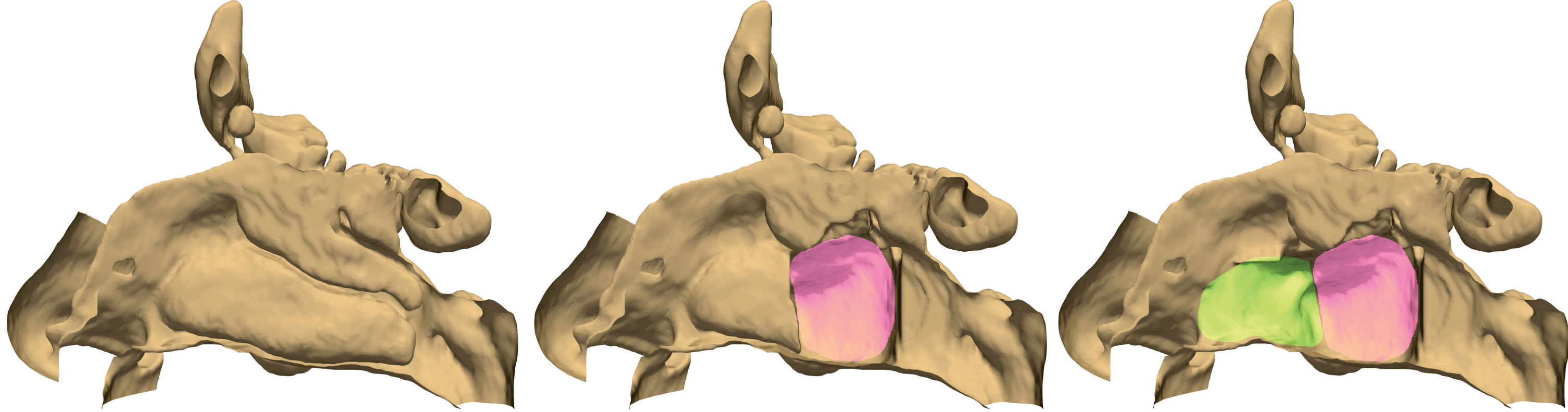


Fig.1: Immagine delle tre anatomie considerate nello studio: modello basale (sinistra), modello dopo chirurgia virtuale EMM (destra), modello dopo chirurgia virtuale MEMM (centro) nella quale si nota la conservazione della porzione anteriore del turbinato inferiore e della parete mediale del seno mascellare.

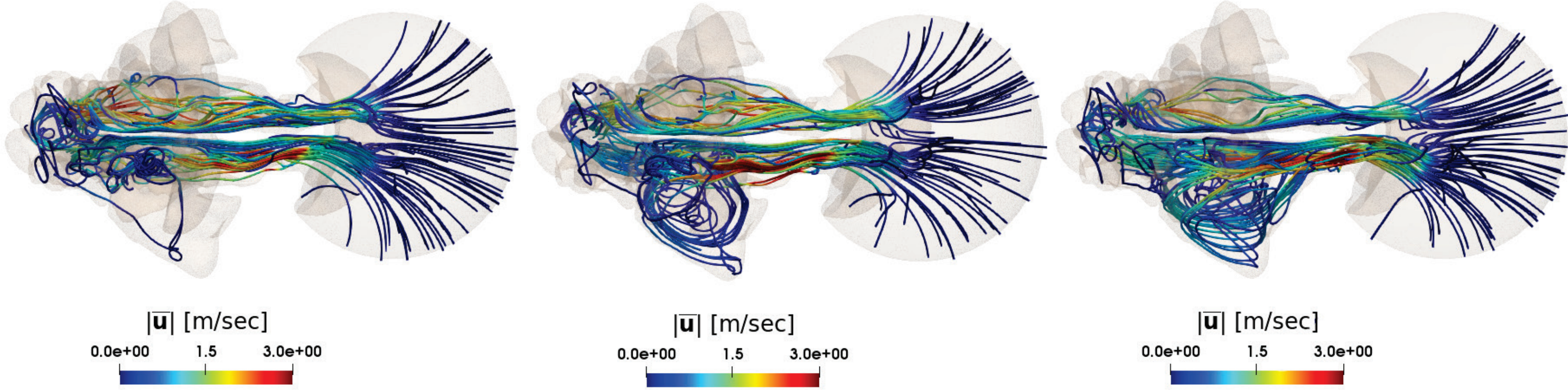


Fig.2: Visione tridimensionale delle *streamlines* nei modelli: basale(sinistra), MEMM (centro) e EMM (destra). Le *streamlines*, che rappresentano le linee di flusso, partono dall'ambiente esterno e penetrano nelle cavità naso-sinusal. Nei modelli sottoposti a chirurgia virtuale si può osservare come esse penetrino nel seno mascellare destro in modo tanto più consistente quanto più è ampia la resezione del turbinato.

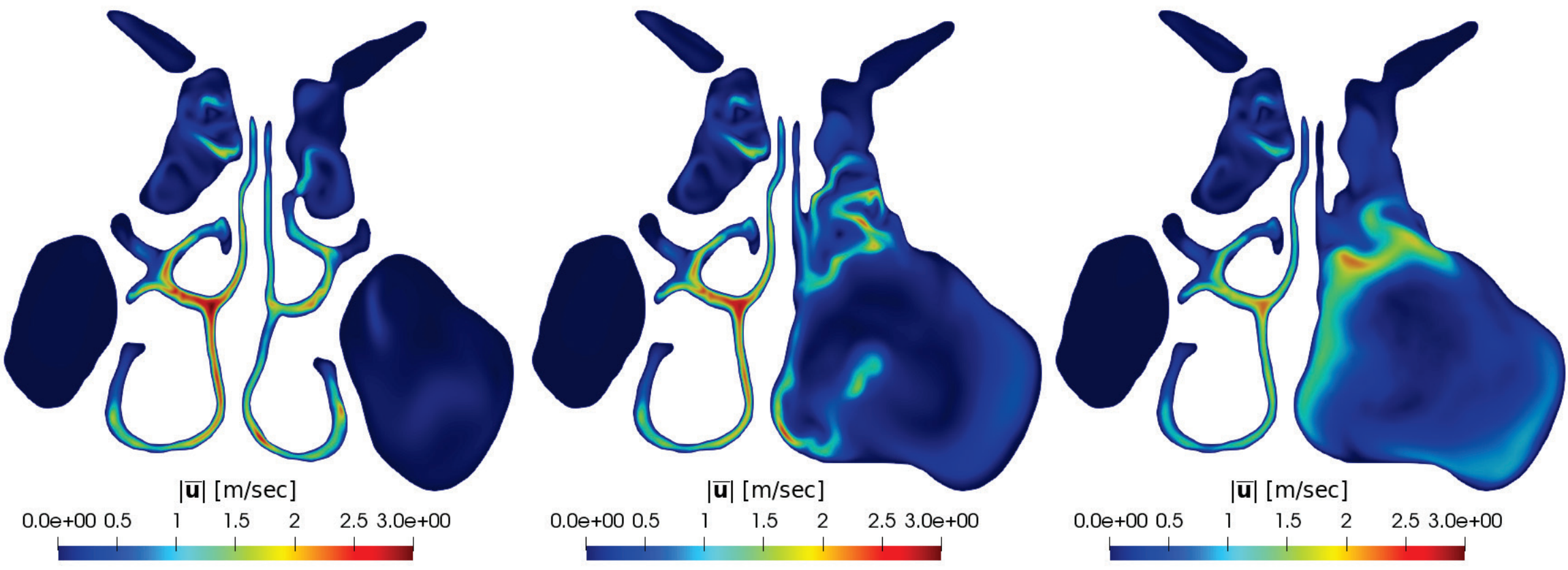


Fig.3 Modulo della velocità media in un piano coronale. Da sinistra verso destra: basale, MEMM, EMM

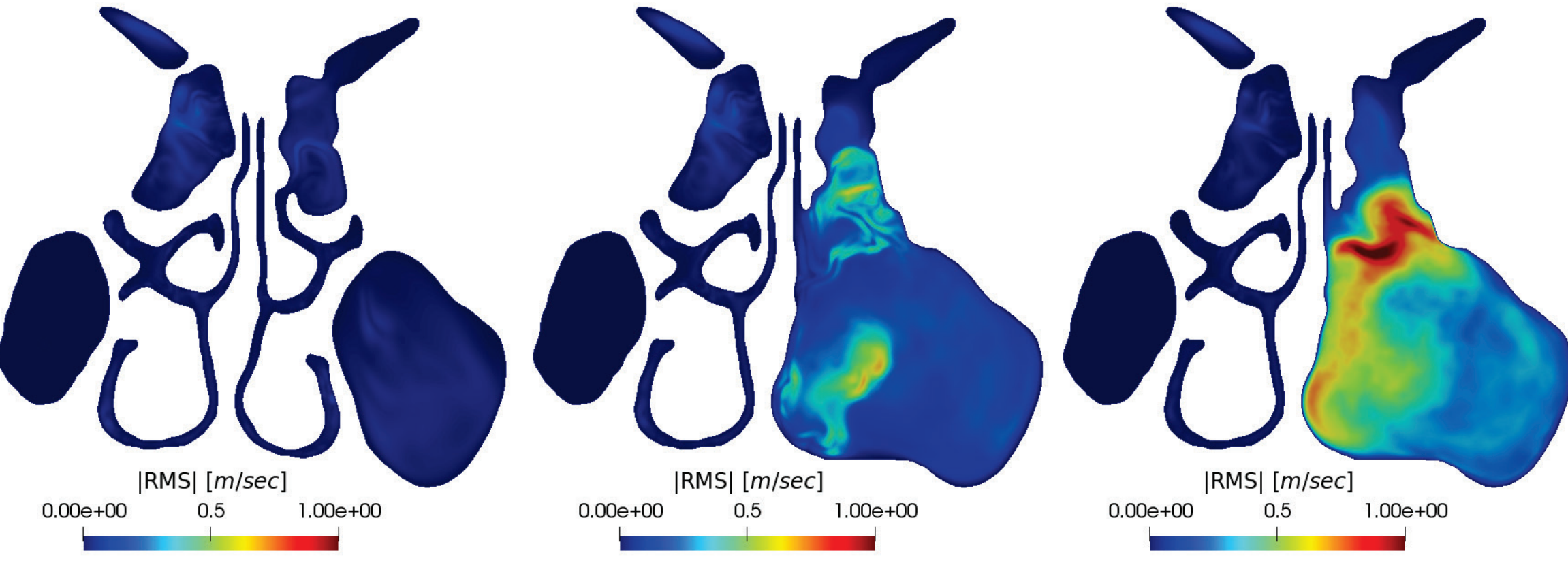


Fig.4 Scarto quadratico medio delle fluttuazioni della velocità. Da sinistra verso destra: basale, MEMM, EMM

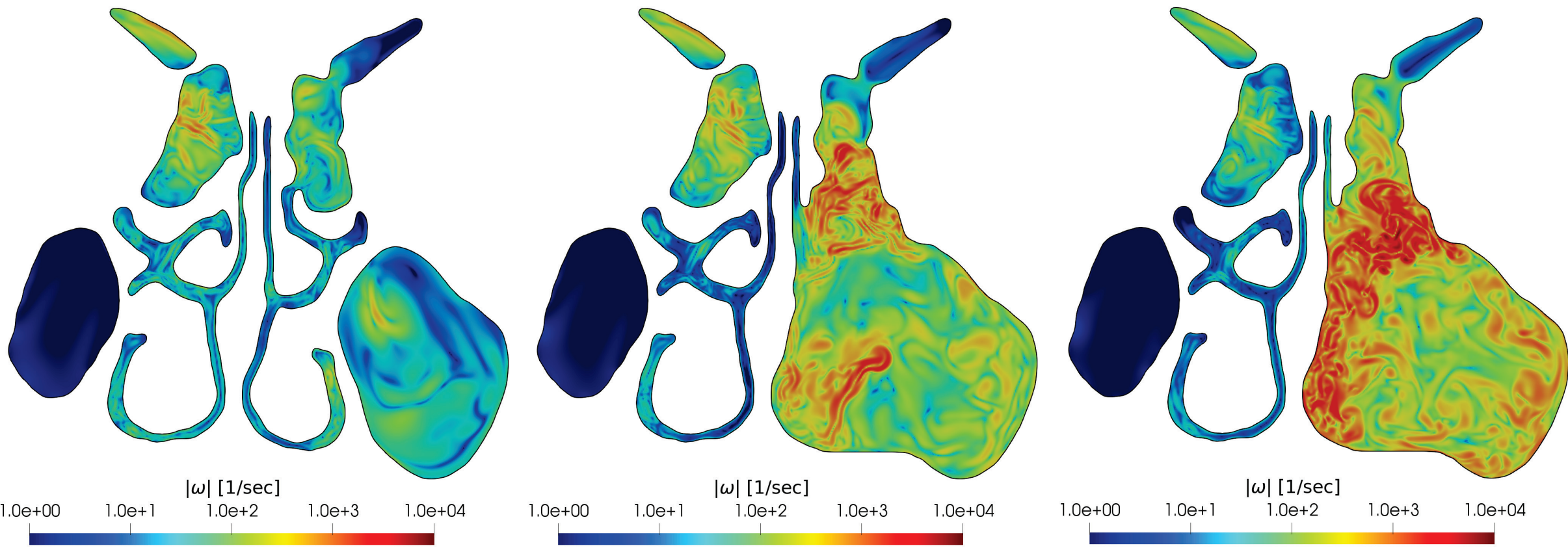


Fig.5: Magnitudo del campo di turbolenza istantanea in un piano coronale. Da sinistra verso destra: basale, MEMM, EMM

BIBLIOGRAFIA

1. Erbek SS, Koycu A, Buyuklu F. Endoscopic modified medial maxillectomy for treatment of inverted papilloma originating from the maxillary sinus. J Craniofac Surg. 2015 May;26(3):e244-6. ;
2. Pagella F, Pusateri A, Matti E, Avato I, Zaccari D, Emanuelli E, et al. "TuNa-saving" endoscopic medial maxillectomy: a surgical technique for maxillary inverted papilloma. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2017 Jul;274(7):2785–91.
3. Quadrio M, Pipolo C, Corti S, Lenzi R, Messina F, Pesci C, et al. Review of computational fluid dynamics in the assessment of nasal air flow and analysis of its limitations. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2014 Sep;271(9):2349–54.
4. Keck T, Leiacker R, Heinrich A, Kuhnemann S, Rettinger G. Humidity and temperature profile in the nasal cavity. Rhinology. 2000 Dec;38(4):167–71.
5. Garcia GJM, Baillie N, Martins DA, Kimbell JS. Atrophic rhinitis: a CFD study of air conditioning in the nasal cavity. J Appl Physiol. 2007 Sep;103(3):1082–92.
6. Lindemann J, Brambs H-J, Keck T, Wiesmiller KM, Rettinger G, Pless D. Numerical simulation of intranasal airflow after radical sinus surgery. Am J Otolaryngol. 2005;26(3):175–80.